

Абашенков И.И., Уртаев Д.А.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ LVMflow 6.65 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ В ФГУП «НАМИ»

Аннотация. Современные программные решения в области моделирования литейных процессов позволяют значительно снизить себестоимость продукции путём проведения виртуальных симуляций важнейших литейных процессов, таких как: заполнение формы сплавом, процессы кристаллизации и охлаждения, что позволяет уменьшить время на разработку технологии, проверить технические решения для каждой конкретной отливки, оптимизировать расход материалов, увеличить выход годного и т. д. Однако иногда результаты моделирования литейных процессов имеют большие отклонения от практических испытаний. Таким образом, повышение результатов сходимости моделирования литейных процессов и практических испытаний является актуальной задачей. Цель работы: раскрыть возможности программного продукта LVMflow и повысить результаты сходимости математического моделирования и практических испытаний. В работе использованы методы компьютерного моделирования, компьютерной томографии и результаты натурных испытаний. В статье представлены сравнительные результаты компьютерного моделирования литейных процессов на примере литой заготовки «кронштейн» из алюминиевого сплава АК8Л с использованием программного пакета моделирования литейных процессов LVMflow 4.5 и 6.65 в различных результирующих полях. Установлены зависимости результатов моделирования в различных результирующих полях и мест возникновения дефектов. Показаны процесс оптимизации технологии методом литья под низким давлением, основанный на результатах моделирования, и результаты практического применения.

Ключевые слова: моделирование литейных процессов, параметры, сплав, кристаллизация, результирующее поле, дефекты, оптимизация

Объектом исследования является литая заготовка «кронштейн» из алюминиевого сплава АК 8Л ГОСТ 1583-93, получаемая в песчано-полимерной форме, изготовленная на 3D-принтере (далее ППФ) методом литья под низким давлением. ППФ представляет собой стержневой пакет, изготовленный по фуран-процессу. Согласно техническим требованиям чертежа, к отливке предъявляются довольно высокие требования, 3-я группа по ОСТ 37.002.0927-90. Также отливки проходят 100%-й рентген-контроль. Средняя толщина стенки отливки 5 мм. Отливка имеет развитую сеть рёбер рис. 1.

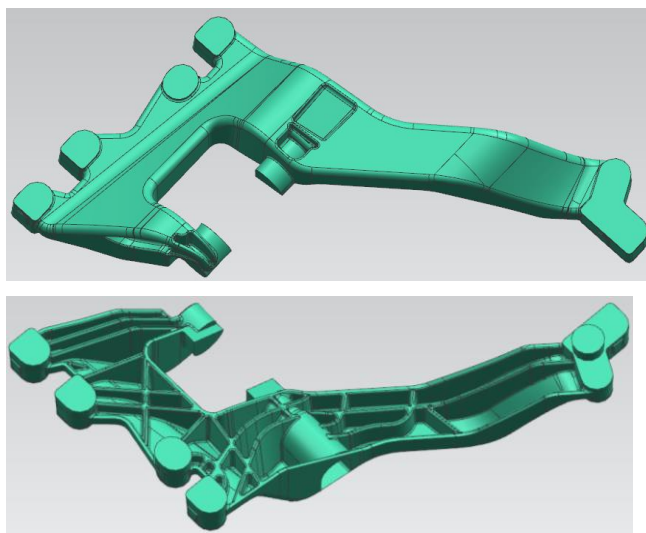


Рис. 1. Общий вид отливки «кронштейн»

Для изготовления отливки решили использовать технологию литья под низким давлением. Метод литья под низким давлением основан на заполнении формы расплавленным металлом под действием избыточного (выше атмосферного) давления газа (обычно осушенный воздух), подаваемого в герметичную полость печи. Технологический процесс разрабатывался под установку KURTZ 1215 с одним металлопроводом. Установка позволяет корректировать давление на разных этапах заливки с помощью высокоскоростного регулятора давления, управляемого автоматикой литейной установки. Управление скоростью заполнения формы позволяет получать качественные тонкостенные отливки (толщина стенки до 3 мм) сложной формы с высокими требованиями. После полного заполнения формы металл дополнительно подпрессовывается избыточным давлением, что дополнительно позволяет предотвратить образование усадочных раковин и других дефектов.

Перед запуском производства пробной партии отливок проводили моделирование в LVMflow 4.5, которые показали, что дефектов в отливке нет. Однако на этапе контроля на наличие внутренних дефектов посредством компьютерной томографии были выявлены дефекты (рис. 2).

После проведённого анализа изображений компьютерной томографии было принято решение выполнить моделирование литейных процессов на более современной версии программы LVMflow – версии 6.65, имеющей дополнительные функции для более полного анализа причин возникновения дефектов.

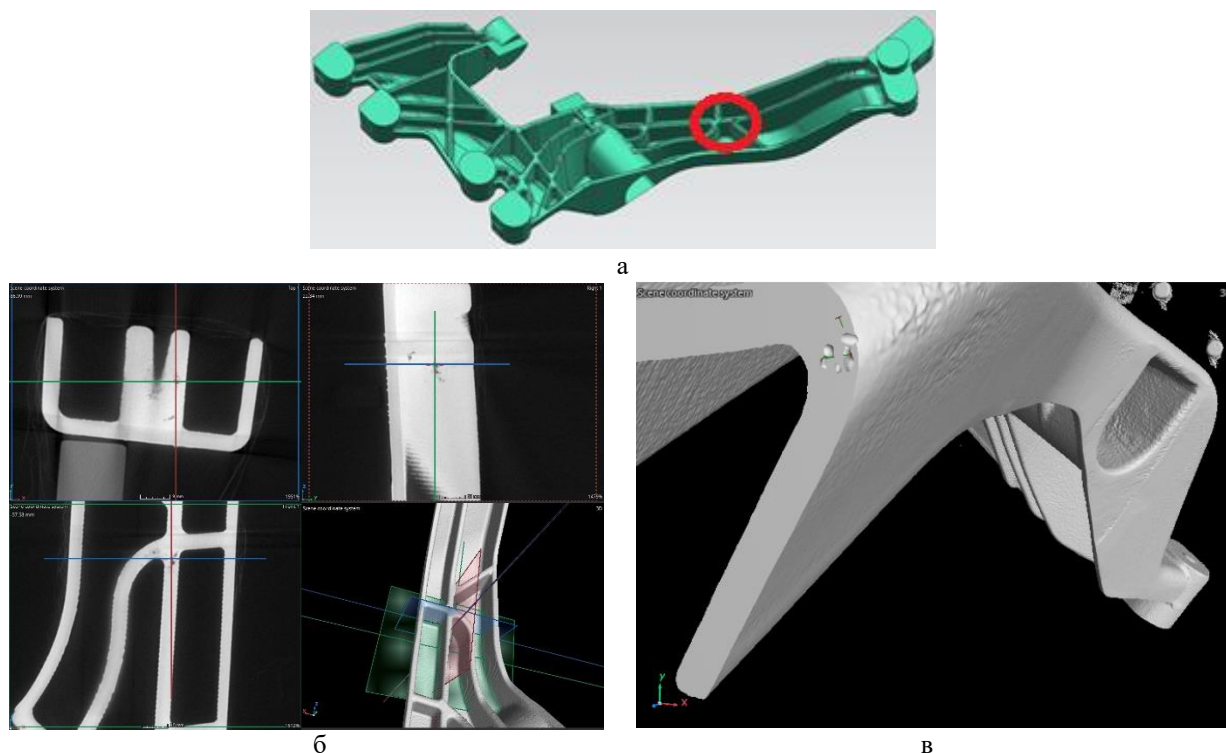


Рис.2. Расположение дефектов в отливке:
а – в зоне пересечения рёбер; б – дефекты усадочного характера;
в – газовые дефекты неясного происхождения

В модуле «3D-конвертер» преобразовали STL модель из CAD-системы в модель формата CVG для дальнейшей работы в модуле «Начальные установки».

Для запуска процесса моделирования использовали следующие параметры литейной конфигурации:

- Высота отливки 400 мм.
- Высота ЛПС 160 мм. 2 отливки в форме.
- Вес отливок с ЛПС 26 кг.
- Температура заливки 710 °С.

Режим заливки формы показан в табл. 1.

Таблица 1

Режим заливки литейной формы

Время, с	Давление, мБар (Па)
0	115 (11500)
5	160 (16000)
11	275 (27500)
15	275 (27500)
25	380 (38000)

В модуле «Начальные установки» установили размер сетки 3 мм, так как меньший размер ячейки значительно увеличит время моделирования и объём занимаемой памяти, при этом никак не улучшит качество моделирования. Задали толщину формы 50 мм, граничные условия по всем плоскостям – излучение, материалы для моделирования. Проверили сетку на наличие плотного контакта между телом отливки и бокса (формы) при помощи инструмента «Редактиро-

вать модель». Задали максимальный приведенный размер тел зазора в ячейке 1% и проверили сетку. В результате проверки были выявлены ячейки с зазором. Закрыли зазор. Моделирование проводили без учёта конвекции, с учётом газа при заполнении и с учётом «пузырей», но без учёта ликвации. Установили давление подпрессовки 380 мБар (38000 Па). Установили граничные условия для литника как нормальные с температурой 710 °С, для выпора как излучение с температурой 20 °С.

В модуле «Полная задача» установили критерии автостопа по объёму жидкой фазы 0%. Также установили необходимые поля для записи. Моделирование проводили с нерегулярной сеткой.

После моделирования процессов заполнения и кристаллизации сплава в модуле «Полная задача» получили результаты. Проведем анализ основных результирующих полей:

1. Поле «Жидкая фаза» (рис. 3). Анализ количества жидкой фазы в объёме отливки позволяет увидеть направление фронта кристаллизации и разрывы жидкой фазы вокруг теплового узла. Образование разрыва жидкой фазы свидетельствует о возможном образовании усадочных дефектов в этих местах. Из анализа изображений можно сказать, что в целом фронт имеет правильное направление сверху вниз и от отливки к ЛПС, но также имеется 6 мест с разрывом фронта, что свидетельствует о возможном появлении в этих местах усадочных дефектов.

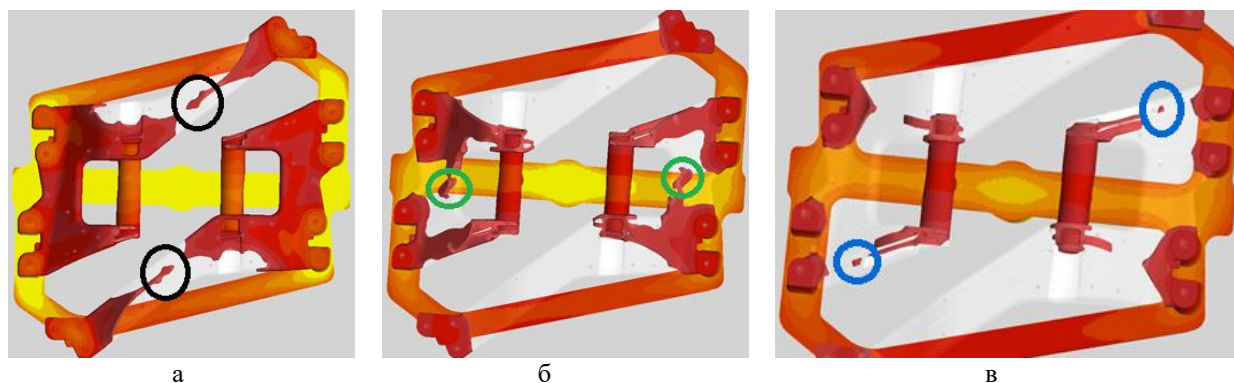


Рис. 3. Результаты моделирования в поле «Жидкая фаза»

2. Поле «Усадка» (рис. 4). Отрегулировали шкалу для поля усадка таким образом, чтобы получить более контрастное отображение усадочных дефектов. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования линейной шкалы. Минимальный уровень 0,1%, максимальный 10%. Усадочные дефекты порядка 3% выявлены в следующих местах.

Места расположения усадочных дефектов практически полностью соответствуют изолированным областям с разрывом фронта кристаллизации вокруг теплового узла (см. поле «Жидкая фаза»), а также местам расположения дефектов в отливках из пробной партии (рис. 2, б и 4, а), кроме 4-х мест (рис. 3, б, в и 4, б). Отсутствие усадочных дефектов в этих местах возникает из-за не совсем правильно подобранного соотношения порогов текучести/протекания и про-

давливания сплава, то есть фильтрации сплава через дендритный каркас.

3. Поля «Захват воздуха» (рис. 5) и «Пузыри» (рис. 6) показывают наличие воздуха, который при определенных условиях заливки может захватываться металлом, заполняющим форму. Поле «Захват воздуха» показывает наличие крупных воздушных пузырей внутри расплава, которые могут являться причиной непроливов и других дефектов. Поле «Пузыри» отображает наличие газовых пузырей меньше размера сетки. Отрегулировали шкалу для поля «Пузыри» таким образом, чтобы получилось более контрастное отображение. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования линейной шкалы. Минимальный уровень 0%, максимальный 10%.

На моделях мы не обнаружили мест, где воздух не выходит и остаётся в полости формы.

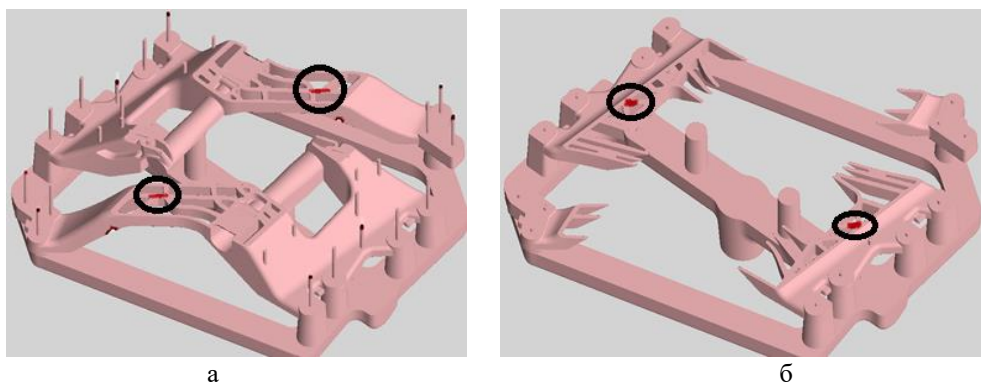


Рис. 4. Результаты моделирования в поле «Усадка»

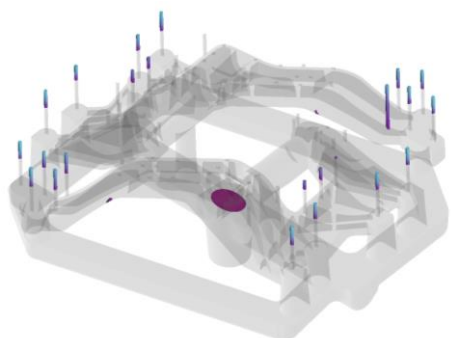


Рис. 5. Результаты моделирования в поле «Захват воздуха»

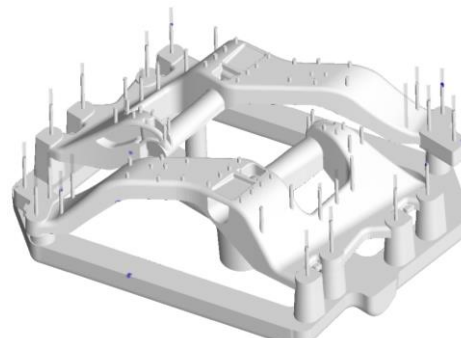


Рис. 6. Результаты моделирования в поле «Пузыри»

4. Поле «Время контакта с воздухом» (рис. 7). Анализ данного результирующего поля позволяет оценить вероятность возникновения дефектов, связанных с окислением сплава кислородом воздуха, находящегося в полости формы. По мере продвижения зеркала металла через полость формы он активно окисляется, «замешивая» оксиды и оксидные плёнки в металл. Чем длиннее путь и площадь контакта, тем больше плёнок и оксидов будет образовываться. Из геометрии отливки и ЛПС можно увидеть, что в отливке есть место, в котором сойдутся два потока металла, довольно длительное время находящиеся в контакте с воздухом. В этом месте можно прогнозировать появление не только неслитин, но и неметаллических включений, пористости и других дефектов. Отрегулируем шкалу для результирующего поля таким образом, чтобы получить более контрастное отображение. Регулировка осуществлялась путём изменения уровней. Уровни изменяли индивидуально для формирования нелинейной шкалы. Минимальный уровень 0 с, максимальный 1 с. Анализ изображений показал, где возможно появление неслитин и других дефектов, связанных с окислением металла.

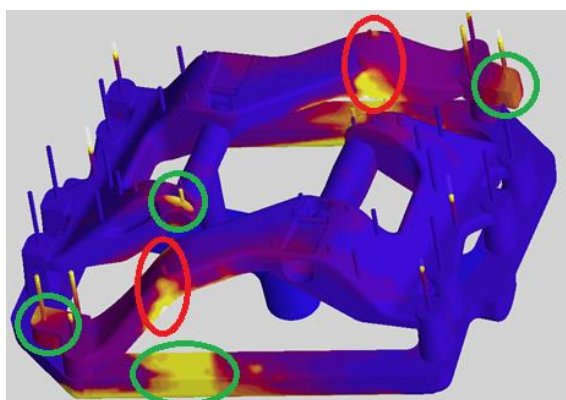


Рис. 7. Результаты моделирования в поле «Время контакта с воздухом»

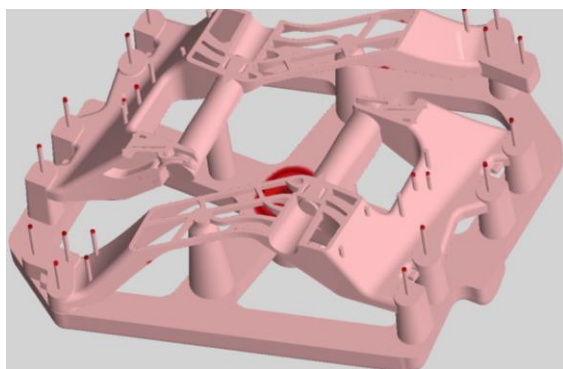
В местах, обозначенных красным (см. рис. 7), видны неслитины в тонких сечениях отливки, а также места с наибольшей концентрацией неметаллических включений. Наличие дефектов в этой зоне подтвер-

ждается в отливках пробной партии (см. рис. 2, в). В местах, обозначенных зелёным (см. рис. 7), вероятность возникновения такого рода дефектов можно считать довольно низкой вследствие движения металла только в направлении от полости формы к стенкам формы и высокой толщины стенок.

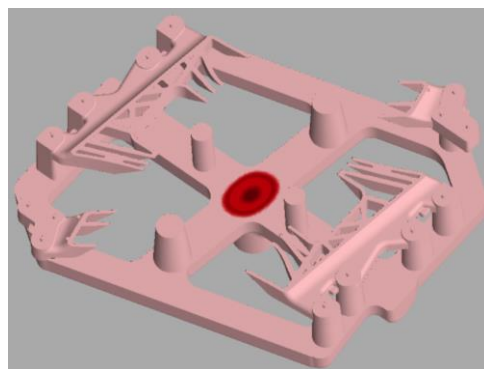
После проведённого анализа результирующих полей наблюдается некоторое противоречие между прогнозируемыми усадочными дефектами (см. рис. 3, б, в и 4, б) и дефектами в отливках опытной партии. Предположили, что это связано с разницей между реальными теплофизическими свойствами ППФ и теплофизическими свойствами формы из банка материалов LVMflow, или со свойствами сплава, или другими свойствами, поскольку регулируемых параметров очень много. Для устранения этого противоречия была выполнена корректировка теплофизических свойств материала формы в модуле «Тест» из программного пакета LVMflow 6.65. Существенных изменений в результате моделирования это не принесло. Далее были выполнены корректировки значений порогов текучести, протекания и продавливания для сплава. Эти корректировки оказали более существенное влияние на точность результата. Моделирование с конвекцией позволило приблизить результаты моделирования к результатам, полученным на пробной партии отливок, но расчёт с конвекцией занял большое количество времени, около 16 ч против 4 ч без конвекции. По результатам моделирования с корректными данными для пороговых значений были выполнены мероприятия по ликвидации дефектов в обозначенных местах.

Для ликвидации усадки (см. рис. 4, а) и уменьшения времени контакта сплава с воздухом (см. рис. 7) организовали подвод металла в эту область.

Для ликвидации усадки (см. рис. 3), в возможно организовать направленное затвердевание для этой зоны, для этого установим в эту область стальной холодильник. Далее провели моделирование заполнения и кристаллизации с необходимыми изменениями для проверки выбранных технических решений. В результате выполненных корректировок были ликвидированы усадочные дефекты и неслитины (рис. 8, 9).



а



б

Рис. 8. Результаты моделирования в поле «Усадка» после оптимизации технологии

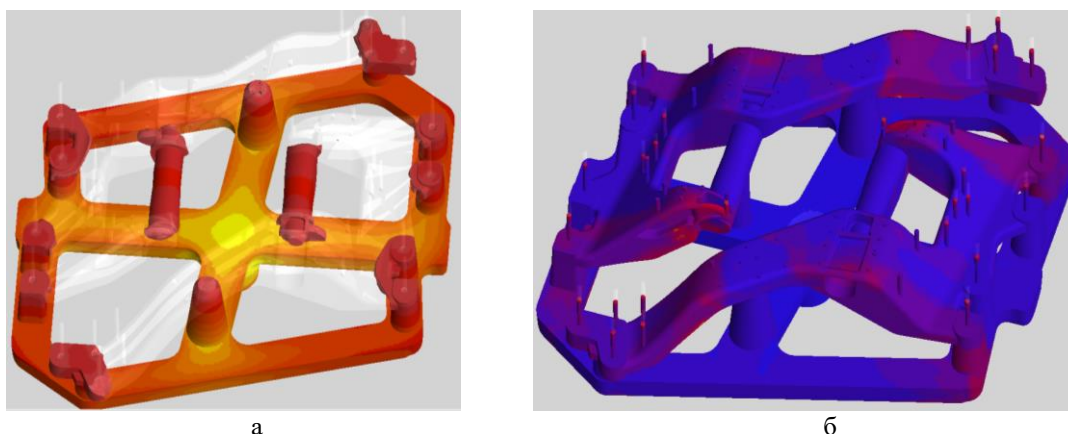


Рис. 9. Результаты моделирования в поле «Жидкая фаза» после оптимизации технологии

По оптимизированной технологии были изготовлены пробные отливки и произведена их компьютерная томография (рис. 10). На фото изображены критические зоны отливки, выявленные в результате анализа, где вероятность возникновения дефектов была очень велика. Как видно из снимков, проведенная по результатам моделирования оптимизация технологии позволила устранить дефекты.

Выводы. На примере литой заготовки «кронштейн» были смоделированы литейные процессы заполнения и кристаллизации, проанализированы ре-

зультаты и выполнена оптимизация технологии. На основании полученных результатов можно сказать, что LVMflow является надёжным инструментом для сокращения времени на разработку технологии, проверку технических решений для каждой конкретной отливки. Однако есть важные нюансы. При работе в данном программном пакете настройка параметров программы, параметров материалов и интерпретации результатов может занять довольно продолжительное время, особенно на этапе внедрения данного программного обеспечения.

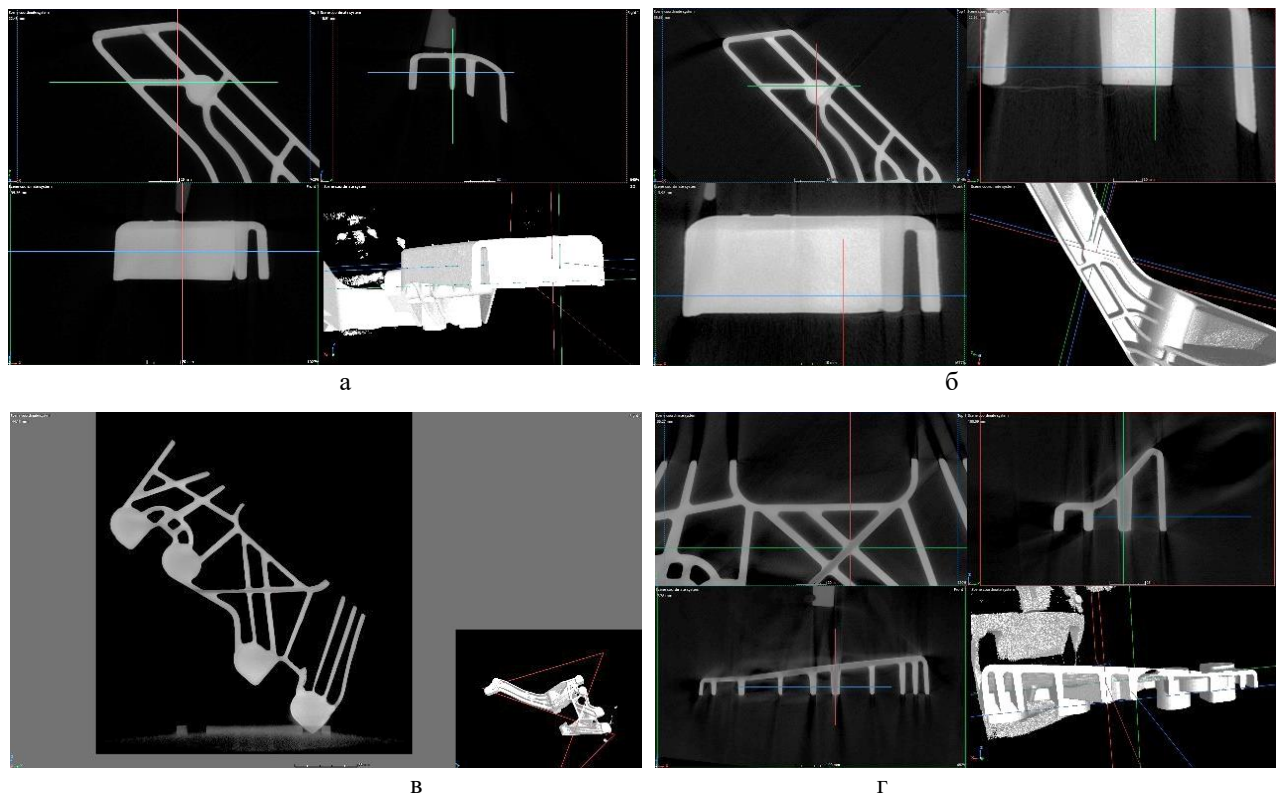


Рис. 10. Результаты компьютерной томографии критических зон отливки

Сведения об авторах

Абашенков Илья Игоревич – ведущий инженер-технолог, отдела главного металлурга, конструкторско-технологическое управление, ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия. E-mail: ilya.abashenkov@nami.ru

Уртаев Денис Алексеевич – кандидат технических наук, главный металлург, конструкторско-технологическое управление, ФГУП «НАМИ», г. Москва, Россия. E-mail: denis.urtaev@nami.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

APPLICATION OF THE LVMFLOW 6.65 CASTING SIMULATION SOFTWARE IN DEVELOPING A LOW-PRESSURE CASTING PROCESS AT FSUE NAMI

Abashchenkov Ilya I. – Leading process engineer, department of the chief metallurgist, Design and Technology Department, FSUE “NAMI”, Moscow, Russia. E-mail: ilya.abashenkov@nami.ru

Urtaev Denis A. – Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist, Design and Technology Department, FSUE “NAMI”, Moscow, Russia. E-mail: denis.urtaev@nami.ru

Abstracts. Modern software solutions in the field of modeling casting processes make it possible to significantly reduce production costs by conducting virtual simulations of key casting processes, such as filling the mold with alloy, crystallization and cooling processes, which helps reduce the time required to develop the technology, test technical solutions for each specific casting, optimize material consumption, increase the yield, etc. However, sometimes the results of modeling casting processes show significant deviations from practical tests. Thus, improving the convergence of modeling casting process results and practical tests is an urgent task. The aim of the work is to reveal the capabilities of the LVMflow software product and to improve the convergence results of mathematical modeling and practical tests. The work uses methods of computer modeling, computed tomography, and the results of field tests. The article presents comparative results of computer modeling of casting processes using the example of a cast workpiece “bracket” made of AK8L aluminum alloy, with the use of the LVMflow 4.5 and 6.65 software package for modeling casting processes in various resulting fields. Dependencies between the modeling results in various resulting fields and the locations where defects occur have been established. The process of optimizing the technology using low-pressure casting, based on the modeling results, and the results of practical application are presented.

Keywords: simulation of casting processes, parameters, alloy, crystallization, resulting field, defects, optimization

Ссылка на статью:

Абашенков И.И., Уртаев Д.А. Опыт применения программного пакета моделирования литейных процессов LVMflow 6.65 при разработке технологического процесса литья под низким давлением в ФГУП «НАМИ» // Теория и технология металлургического производства. 2026. №3(58). С. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-29-34)

Abashchenkov I.I., Urtaev D.A. Application of the LVMflow 6.65 casting simulation software in developing a low-pressure casting process at FSUE NAMI. *Teoria i tecnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 58, no. 3, pp. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3\(58\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-3(58)-29-34)