

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЬЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ ЧУШКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Ильин А.А.<sup>1</sup>, Солдатов С.В.<sup>1</sup>, Белоусова Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация: В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования процессов заливки и кристаллизации малогабаритной чушки из алюминиевых сплавов, которое было выполнено с целью выявления и уменьшения усадочной пористости в теле отливки. Расчет гидродинамической задачи проводился на базе программного комплекса ProCAST.

Малогабаритная чушка является одним из наиболее распространённых видов товарной продукции, выпускаемой алюминиевыми заводами. Для всех типов мелкой чушки характерны одинаковые виды брака: в процессе кристаллизации образуются открытые усадочные трещины, рыхлоты и поры. При длительной транспортировке готовой продукции к потребителю в образовавшихся полостях слитков скапливается влага, что приводит к бурлению и даже выбросам жидкого металла из печей при переплавке чушки.

Известно, что образование усадочных дефектов связано с явлениями уменьшения объема и линейных размеров отливки [1] при ее охлаждении вследствие неравномерного затвердевания сплава и разности коэффициентов термического сжатия внешних, закристаллизовавшихся, слоев и внутренних, находящихся в жидком состоянии. К числу других факторов, влияющих на появление дефектов усадочного происхождения, относят положение сплава на диаграмме состояния и теплофизические условия кристаллизации, которые определяются геометрией и технологией изготовления литейной формы.

Практический опыт литья позволяет сделать вывод о том, что существенным фактором, влияющим на ход кристаллизации чушки, является

воздушный зазор, образующийся в результате усадочных процессов, протекающих во время кристаллизации слитка [2]. Немаловажным параметром, влияющим на конечные дефекты в отливке, является водород, растворенный в алюминии или адсорбированный на взвешенных в расплаве оксидных включениях, которые могут оказаться очагами газовой пористости [3].

Современный подход к улучшению качества выпускаемой продукции предполагает использование математического моделирования, которое дает возможность спрогнозировать поведение материалов в различных условиях и рассчитать, в частности, оптимальные конструкции литейных форм. Метод, позволяющий на модели воспроизвести действующий процесс производства алюминиевой чушки, дает очень важную информацию, так как зачастую скрытность протекания процесса затвердевания расплава в форме существенно затрудняет выявление причины развития дефекта внутри отливки [4]. Современные комплексы для моделирования позволяют проводить многофакторный анализ термодинамических процессов с учетом гидродинамического расчета течения металла в форме. Одним из таких комплексов является программный пакет ProCAST.

Математическое моделирование позволит спрогнозировать места и характер распределения усадочной пористости в теле отливки, оценить распределение температурного поля в слитке и направление фронта кристаллизации, выполнить оценку качества при помощи критериальной функции Нияма, которая используется для предсказания пористости, возникновение которой зависит от питания двухфазной зоны при пологом градиенте температуры [5]. Кроме того, можно провести анализ гидродинамики с использованием разливочного колеса, оценить начальный температурный градиент жидкого металла в форме, который окажет влияние на ход кристаллизации [6].

Цель данной работы – моделирование процесса заливки и кристаллизации малогабаритной чушки из алюминиевых сплавов с целью

выявления и снижения количества таких литейных дефектов как усадочная пористость в теле отливки.

### **Постановка задачи**

Расчет гидродинамической задачи заливки сплава в изложницу проводился на базе программного комплекса ProCAST с использованием алгоритма “Пересекающихся сеток”. В качестве материала для слитка был выбран стандартный сплав A356 (табл. 1) из базы данных ProCAST, в качестве материала изложницы – серый чугун (СЧ 20).

При математическом моделировании кристаллизации малогабаритной чушки (15 кг) были использованы следующие исходные данные:

1. Начальная температура изложницы - 130°C;
2. Начальная температура металла - 691°C;
3. Время заполнения формы - 9 секунд.

Таблица 1 – Химический состав сплава, масс. %

<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Si</b>	<b>Ti</b>	<b>Zn</b>
91.6	0.2	0.2	0.35	0.35	7	0.2	0.1

С использованием термодинамической базы данных были рассчитаны температурные зависимости теплопроводности, плотности, динамической вязкости и соотношения твердой и жидкой фаз сплава данного состава.

Для учета теплопередачи между жидким металлом и формой использовалась температурная зависимость коэффициента теплопередачи с учетом образования воздушного зазора между сплавом и стенкой изложницы при кристаллизации.

При задании граничных условий процесса использовались следующие параметры:

1. Условие охлаждения поверхности металла с учетом коэффициента излучения;

2. Условия заливки металла – расчетное значение объема металла с заданным временем заполнения через зону заливки, соответствующей площади заливного сечения. Также дополнительно вектор скорости был разбит на две компоненты  $YZ$  для имитации заливки под углом, как в действующем технологическом процессе;

3. Условия воздушного охлаждения поверхности изложницы с учетом значений конвекции для вертикальных и горизонтальных поверхностей.

Для решения поставленной задачи была построена рабочая модель изложницы со слитком. Разбиение на конечно-элементную тетрагональную сетку выполнено в программном модуле Mesh\_Cast. Количество объемных элементов составило 2012845.

## **2 Результаты моделирования**

На первом этапе исследований были смоделированы процессы заливки и кристаллизации слитка в изложницах M145.

Результаты моделирования заполнения изложницы с распределением температуры по сечению слитка представлены на рисунках 1, 2. Слева указана температурная шкала. Заполнение металла проходит без интенсивного перемешивания и разбрызгивания, что важно для алюминиевого сплава. Следует отметить небольшой захват воздуха, когда поток металла возвращается назад после столкновения с противоположной направлению заливки стенкой изложницы.

На рисунках 3, 4 представлены результаты моделирования процесса кристаллизации слитка. Цветовая шкала слева от каждого рисунка показывает количество твердой фазы в сплаве в текущий момент времени, где красный цвет соответствует жидкому металлу (выше температуры ликвидус), а серый – затвердевшему (ниже температуры солидус). Кристаллизация металла начинается с боковых стенок и дна изложницы,

вследствие значительной теплопередачи от слитка к изложнице. В последнюю очередь остывает металл в верхней части слитка.

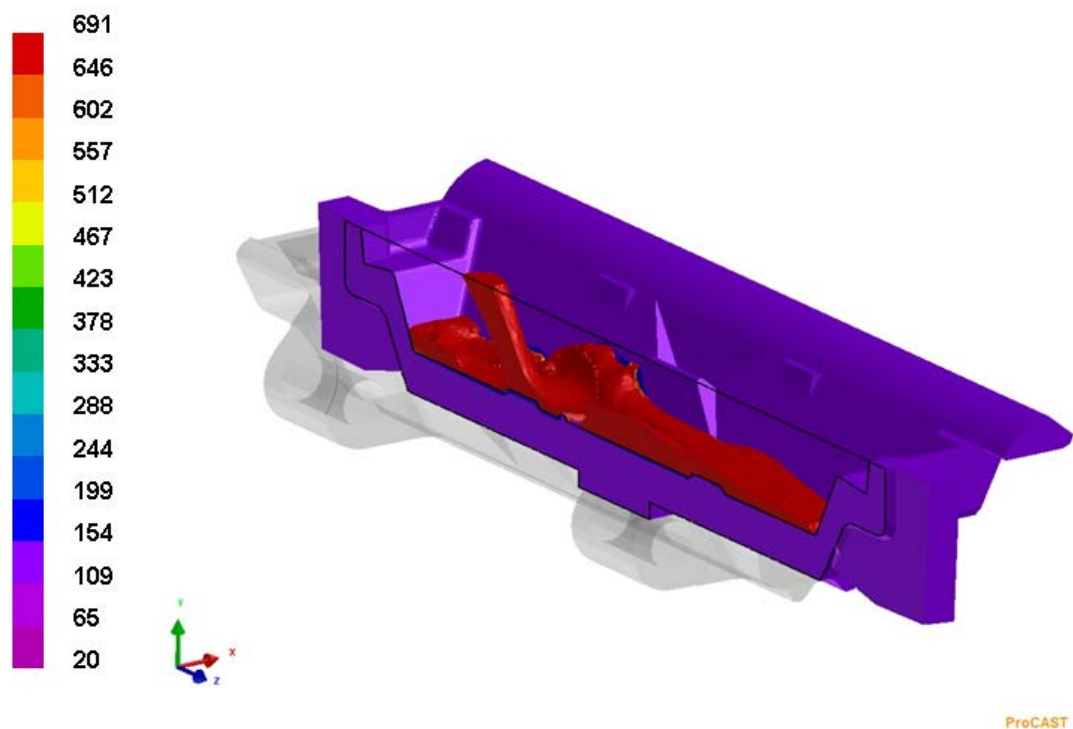


Рисунок 1 – Температура металла по сечению слитка через 1 секунду от начала заполнения формы.

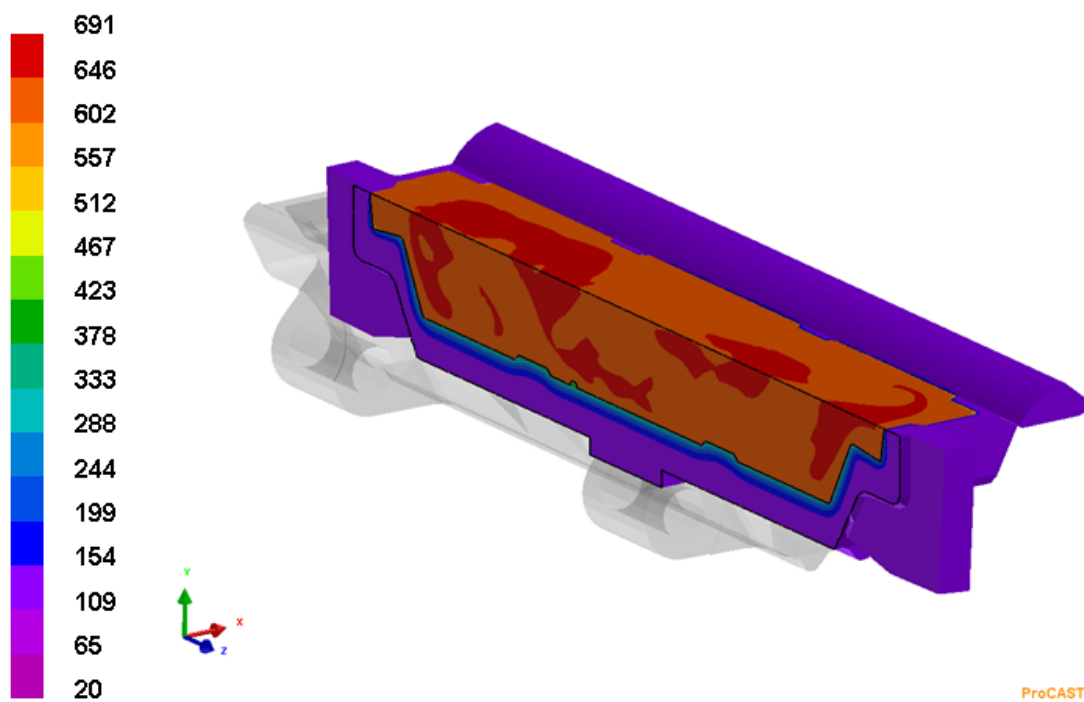


Рисунок 2 – Температура металла по сечению слитка через 9 секунд от начала заполнения формы.

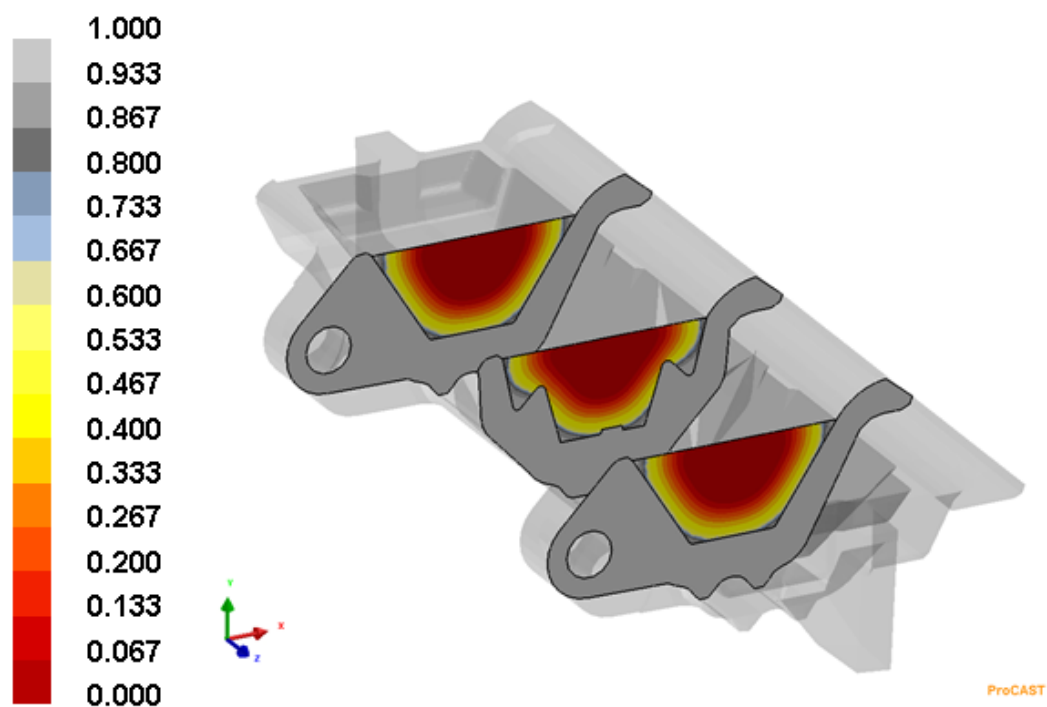


Рисунок 3 – Кристаллизация металла по сечению слитка через 35 секунд после заполнения.

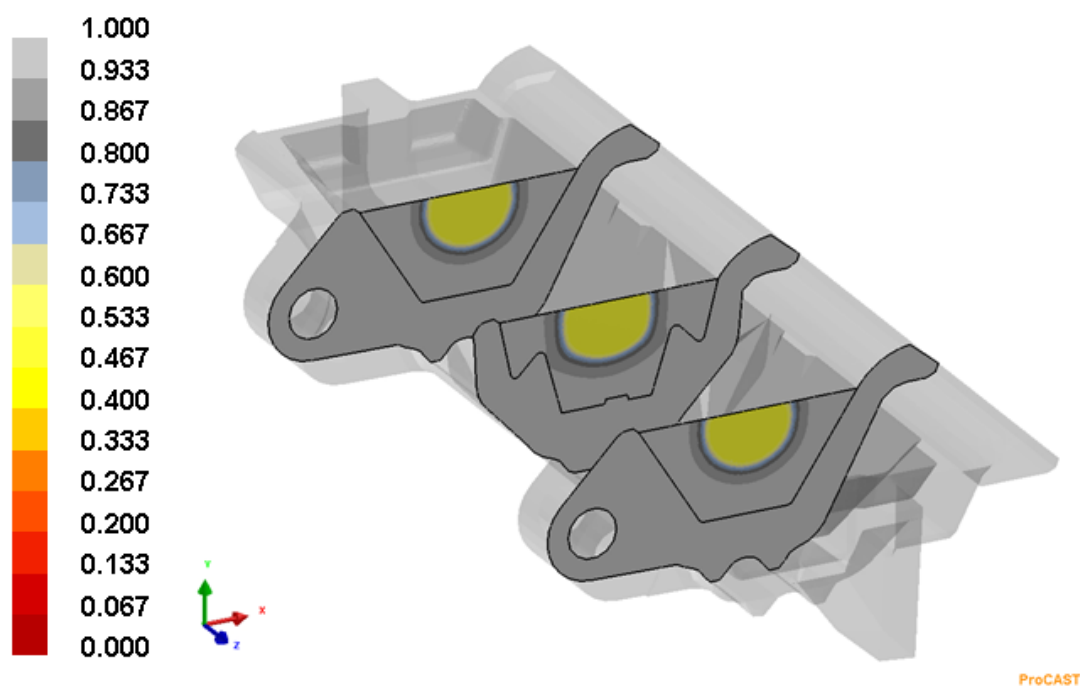


Рисунок 4 – Кристаллизация металла по сечению слитка через 180 секунд после заполнения.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования усадочных дефектов. Красным цветом обозначена полость усевшего при

кристаллизации металла, интервал от оранжевого до голубого отображает усадочные рыхлоты в металле.

В качестве более узкой задачи было смоделировано влияние тепловой изоляции в верхней части изложницы. Для этого в расчетах был уменьшен коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка до  $1 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  после окончания заливки формы. Согласно полученным данным, теплоотвод с боковых стенок изложницы также остается преобладающим. Общий характер рыхлот в металле не изменился, однако данная мера позволила немного уменьшить глубину усадочных дефектов по высоте слитка. Изменение высоты усадочной раковины по высоте составило  $0,13 \text{ мм}$ , по ширине наблюдались незначительные локальные изменения в пределах  $0,1 \text{ мм}$ .

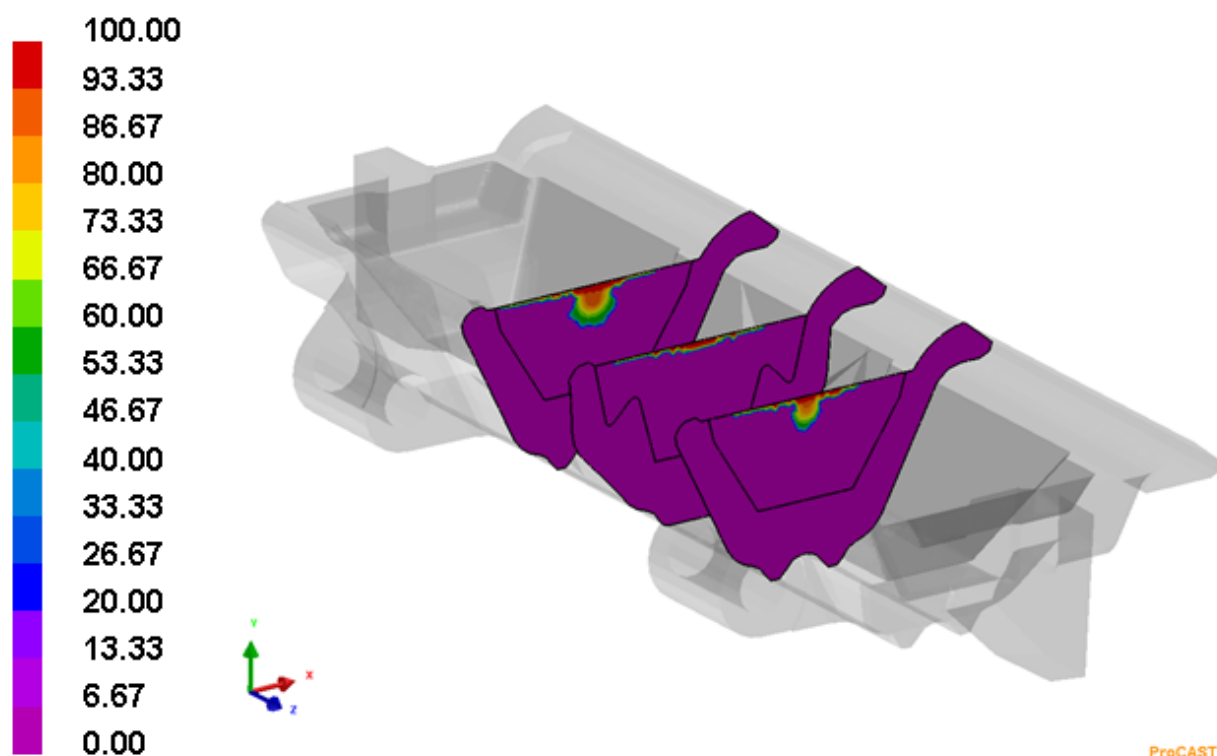


Рисунок 5 – Распределение усадочных дефектов по сечению слитка.

Для уменьшения глубины усадочных рыхлот по высоте слитка одним из вариантов моделирования была выбрана изложница с измененным днищем. Данная мера направлена на изменение аккумулирующей способности дна изложницы.

На рисунке 6 показана геометрическая 3d модель изложницы.

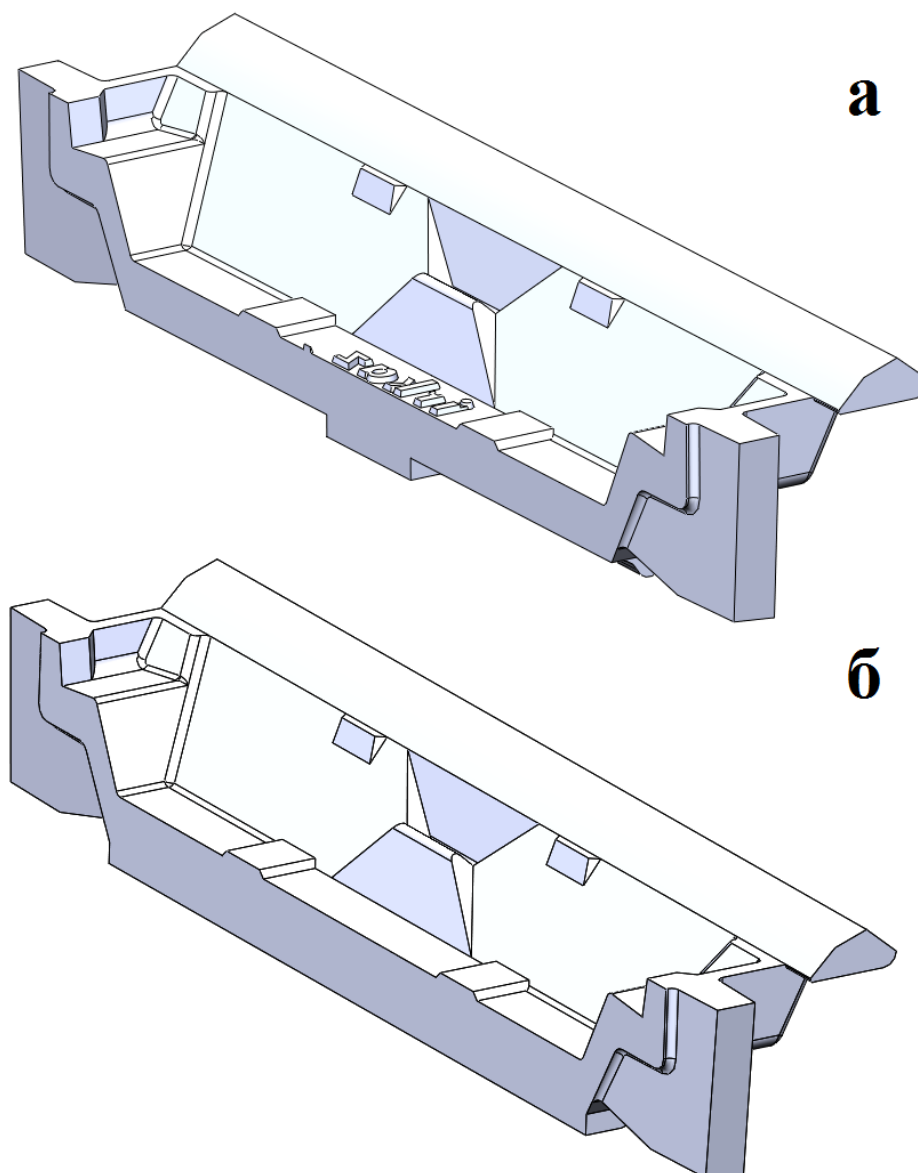


Рисунок 6 – 3d модели базовой изложницы (а) и изложницы с измененным дном (б) в разрезе по центральному продольному сечению.

Результаты моделирования показали, что кристаллизация металла также начинается с боковых стенок и дна изложницы, вследствие значительной теплопередачи от слитка к изложнице. Снижения концентрации рыхлот достичь не удалось, однако высота усадочных дефектов снизилась с 33,4 мм до 29,2 мм.



В следующей модели для уменьшения глубины усадочных рыхлот по высоте слитка была выбрана изложница с увеличенной длиной внутренних «карманов» изложницы (210 мм). Основная цель этого – увеличение времени кристаллизации металла от боковых стенок формы для более длительного питания металлом нижних слоев отливаемой чушки.

Кристаллизация металла также начинается с боковых стенок и дна изложницы, вследствие значительной теплопередачи от слитка к изложнице. Характер затвердевания слитка не изменился. Усадочная пористость заметно уменьшается в центральной части изложницы, по сравнению с базовой моделью. Увеличение длины «карманов» не повлияло на глубину рыхлот в чушке в торцах – её уровень остался таким же, как в предыдущей модели.

Еще одним вариантом модифицированной изложницы стала модель с поднятыми бобышками во внутренней полости формы. Высота была изменена с 5 до 15 мм. Основная цель этого мероприятия – уменьшение пористости над данными «приливами» вследствие ускорения кристаллизации в этой области.

В этом случае кристаллизация металла также начинается с боковых стенок и дна изложницы. Характер кристаллизации остается неизменным, но при этом наблюдается уменьшение количества пор над «приливами» и смещение их в центральную зону. Также можно отметить, что резкое снижение пористости происходит над «приливом», находящимся в противоположной от заливки стороне. Кроме того, изменяется глубина усадочных дефектов – с 33,4 до 26,5 мм (в сравнении с базовой моделью), что говорит о положительном эффекте от такого изменения формы изложницы.

Еще одна модель изложницы представляет собой некоторую вариацию базовой модели с небольшим изменением толщины стенок, добавлением внешних «карманов» и применением ребрения по днищу формы с целью интенсификации теплопередачи от донной части и стенок формы.

На рисунке 7 представлены новая и базовая модель изложницы в разрезах по двум плоскостям для более наглядного представления изменений конструкции.

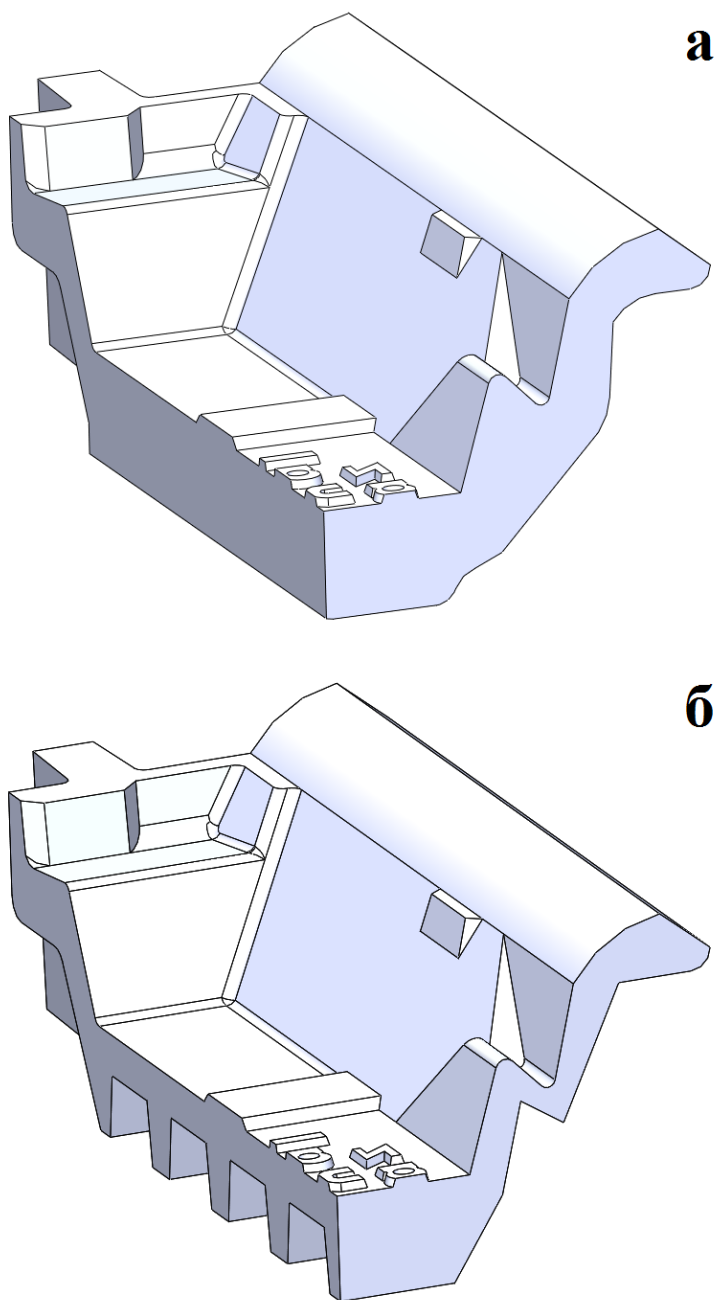


Рисунок 7 – 3d модели базовой (а) и новой изложницы (б) в разрезе по продольному и поперечному сечению.

Кристаллизация металла также начинается с боковых стенок и дна изложницы и при этом, несмотря на принятые меры, время застывания слитка, по сравнению с базовой моделью, увеличивается (примерно на 50%).

Характер рыхлот, в целом, не изменяется, а глубина усадочной пористости уменьшается с 33,4 до 29,4 мм.

На втором этапе исследований было проведено сравнение базовой модели изложницы M145 с изложницей компании «Бефеса».

Установлено, что характер кристаллизации в последнем случае отличается от описанного выше: фронт кристаллизации поднимается с донной части быстрее. Вероятно, это обусловлено наличием ступенек в центральной части формы. Кроме того, отмечены меньшие, чем в базовой изложнице M145, пористость и глубина усадочных дефектов (33,4 мм – M145, 28,9 мм – «Бефеса»).

### **ВЫВОДЫ**

1. Утепление верхней части изложницы посредством установки специальных отражающих экранов для снижения теплоотдачи излучением с поверхности жидкого металла во время кристаллизации не дает существенного эффекта.
2. Изменения внешней конфигурации изложницы, включающие увеличение толщины днища для повышения аккумулирующей способности днища изложницы и сохранения жидкими нижних слоев металла в форме, изменений с положительным результатом не дало.
3. Вариант с увеличением приливов на дне изложницы на 10 мм дает снижение пористости на 10-15% на поверхности в зоне приливов, однако в целом усадочная пористость в теле чушки остается на прежнем уровне.
4. Увеличение выработок для замков во внутренней части изложницы позволяет развести зону пористости в торцы формы, перераспределяет зону пористости в горизонтальной плоскости.
5. Модернизированная форма с ребрами охлаждения в донной части изложницы немного перераспределяет зону пористости в вертикальном и горизонтальном направлении, однако существенного эффекта по сравнению с базовой конструкцией не дает.

6. Дополнительный расчет изложницы «Бефеса», характеризующейся ступенчатой конфигурацией формы, дает наиболее приемлемые результаты по пористости в теле чушки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К.В. Кобяков, Ю.А. Николайчук. Моделирование процессов образования усадочных дефектов при изготовлении отливок // Литье и металлургия 4(77) 2014.
2. J.F. Grandfield. Remelt ingot production technology // Light Metals 2009.
3. Kun-Dar Li, Edward Chang. A mechanism of porosity distribution in A356 aluminum alloy castings: Materials Transactions Vol. 43, No 7 2002.
4. Д.Ю. Куликов. Автоматизация диагностики и устранения дефектов усадочного происхождения из железоуглеродистых сплавов: Автореферат. 2008.
5. M. Riedler, S. Michelic, C. Bernhard. Formation of shrinkage porosity during solidification of steel: Numerical simulation and experimental validation: International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting 2015 (LMPC 2015).
6. J. Grandfield, P. Cleary, M. Prakash, M. Sinnott, K. Oswald, V. Nguyen. Mathematical modeling of ingot caster filling systems // Light Metals 2004.