

**СОВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОРИСТОСТИ
СКМ ЛП «ПОЛИГОСОФТ»
И ПУТИ ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ**

Относительно точное описание процессов, протекающих в затвердевающей отливке

Уравнение энергии:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad} T \right) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_L$$

Уравнение движения массы i -о го компонента в жидкой части двухфазной зоны:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad} C = \text{div}(D \text{grad} C) + q_c$$

Уравнение движения расплава:

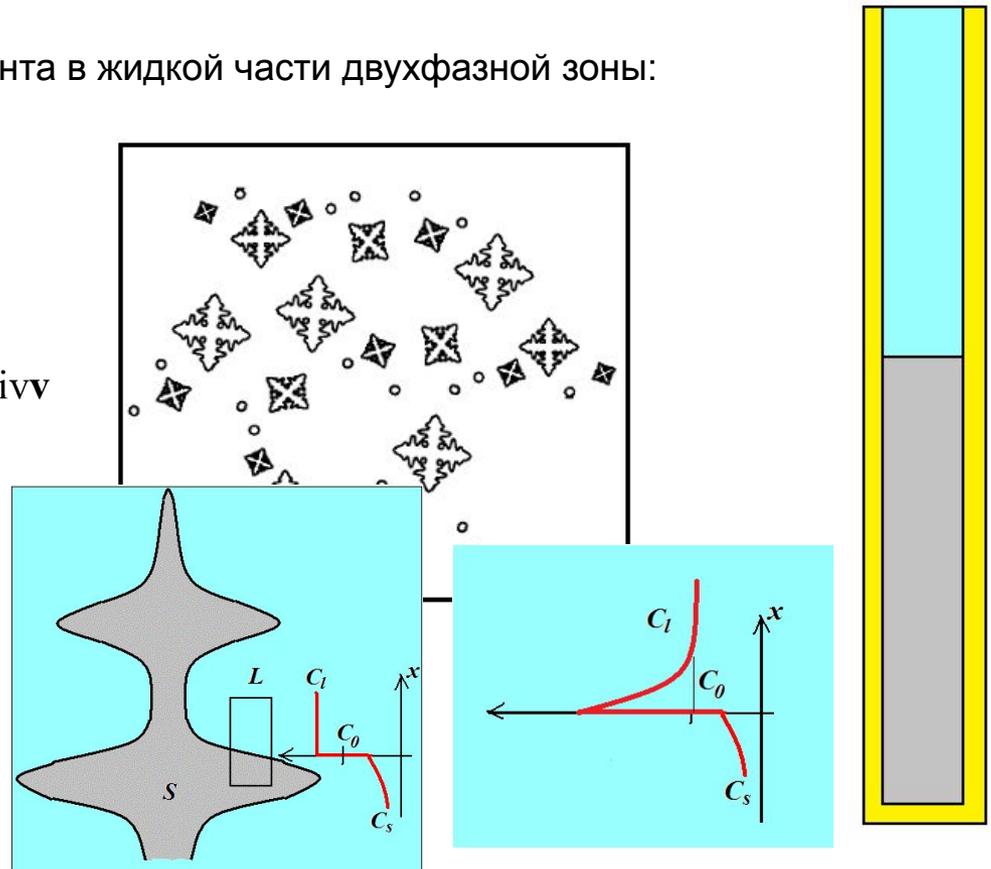
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + \mathbf{v} \text{grad} \mathbf{v} = g \beta_T (T - T_0) - \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \frac{\mu}{\rho} \text{div} \mathbf{v}$$

Уравнение состояния двухфазной зоны

$$T = \phi_L(C_i) \quad T = \phi_S(C_i)$$

Уравнение неразрывности среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div}(\rho_L \mathbf{v})$$



Упрощенное описание процессов, протекающих в отливке.

Имитационная модель пористости

1. Уравнение теплопроводности (для отливки постоянного объема).

$$\left(\rho C_p + \rho_L L \frac{df_s}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T)$$

2. Модель кристаллизации для расчета доли твердой фазы (правило рычага, уравнение Шайла, и модель обратной диффузии). Определяет температуры ликвидус и солидус, а также порядок выделения теплоты кристаллизации.

$$f_s = f_s(T)$$

3. Модель усадочной раковины (гравитационное течение)

$$M = \text{const}$$

4. Модель фильтрационного течения

$$f_L \mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad}(P + \rho_L g z),$$

5. Модель зарождения поры

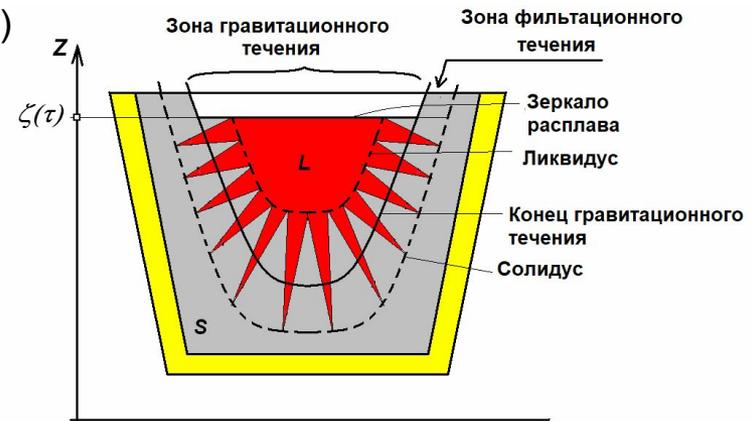
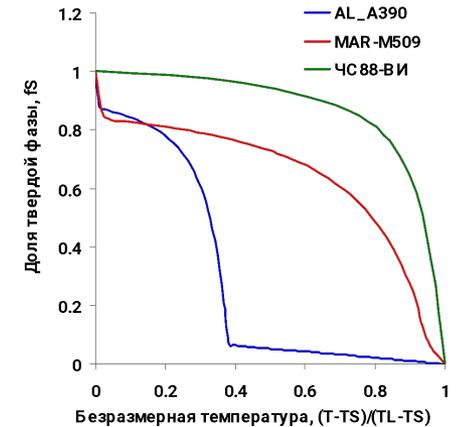
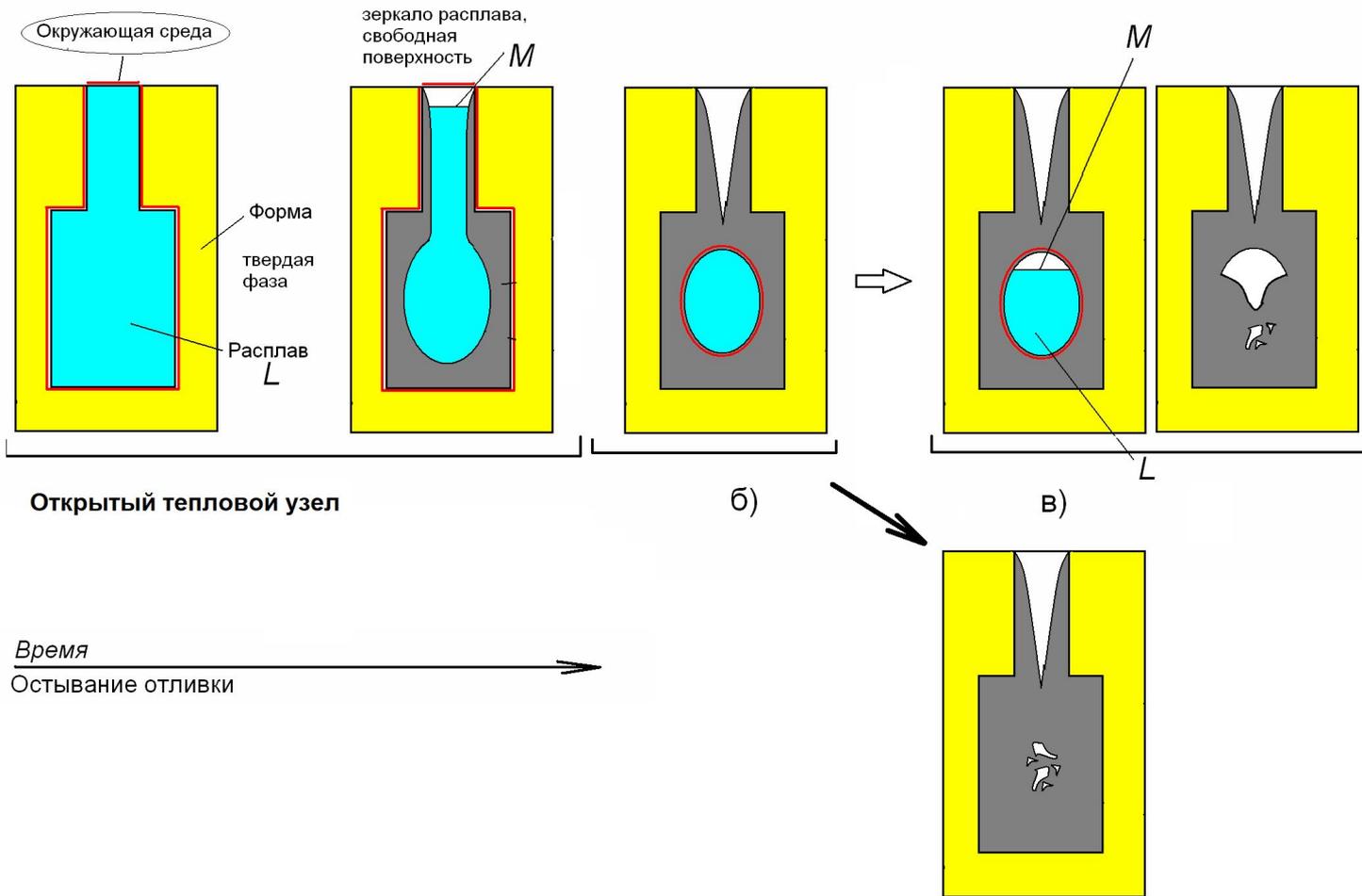


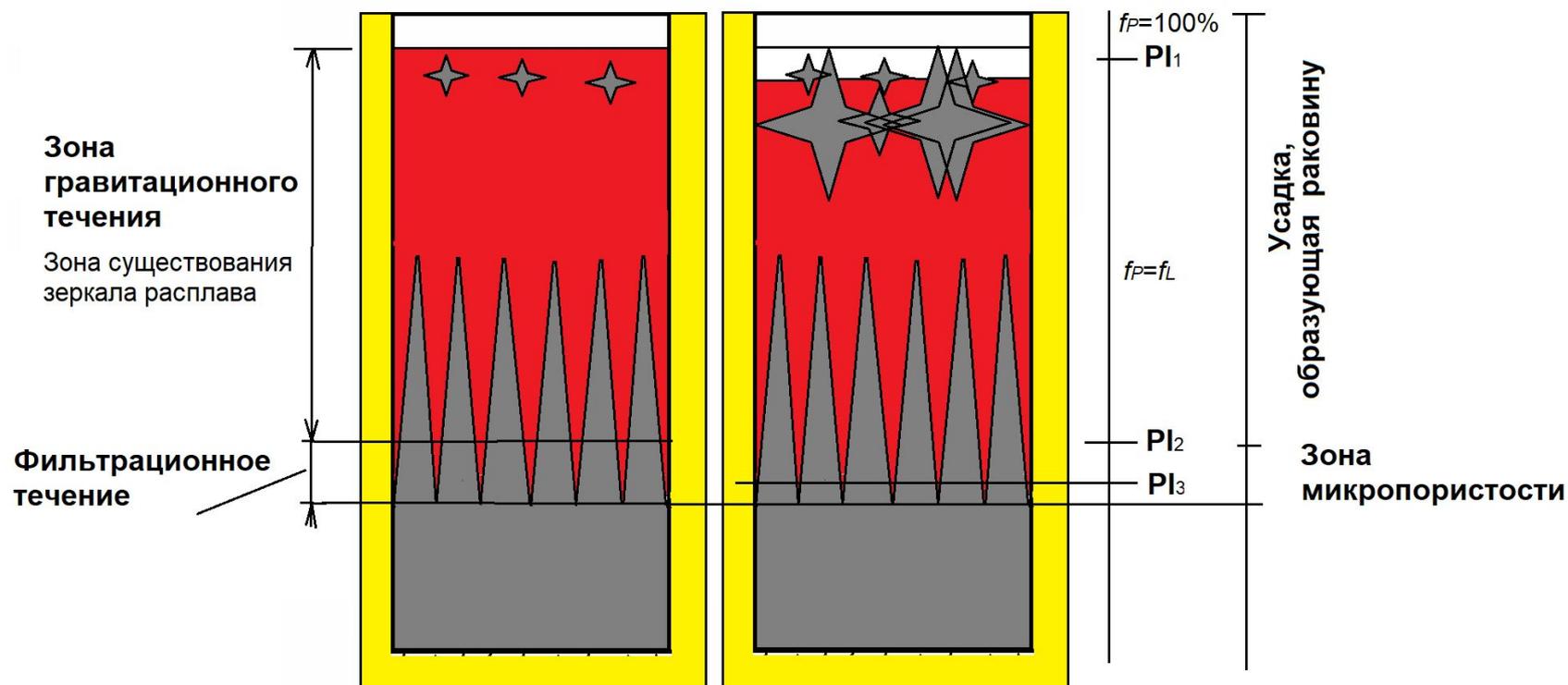
Рис. Зоны действия имитационных моделей

Модель усадочной раковины

Гравитационное течение



Образование усадочных дефектов при гравитационном течении



Настроечные параметры модели

PI_1 - Доля жидкой фазы, при которой образуется непрерывный дендритный каркас

PI_2 - Прекращается гравитационное течение расплава

PI_3 - Перекрытие междендритных каналов. Металл считается твердым (только для расчета усадочной раковины)

Модель фильтрационного течения

Образование микропористости

$$f_L \mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} \text{grad}(P + \rho_L g z) \quad \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div}(\rho_L \mathbf{v})$$

- В зоне фильтрационного течения

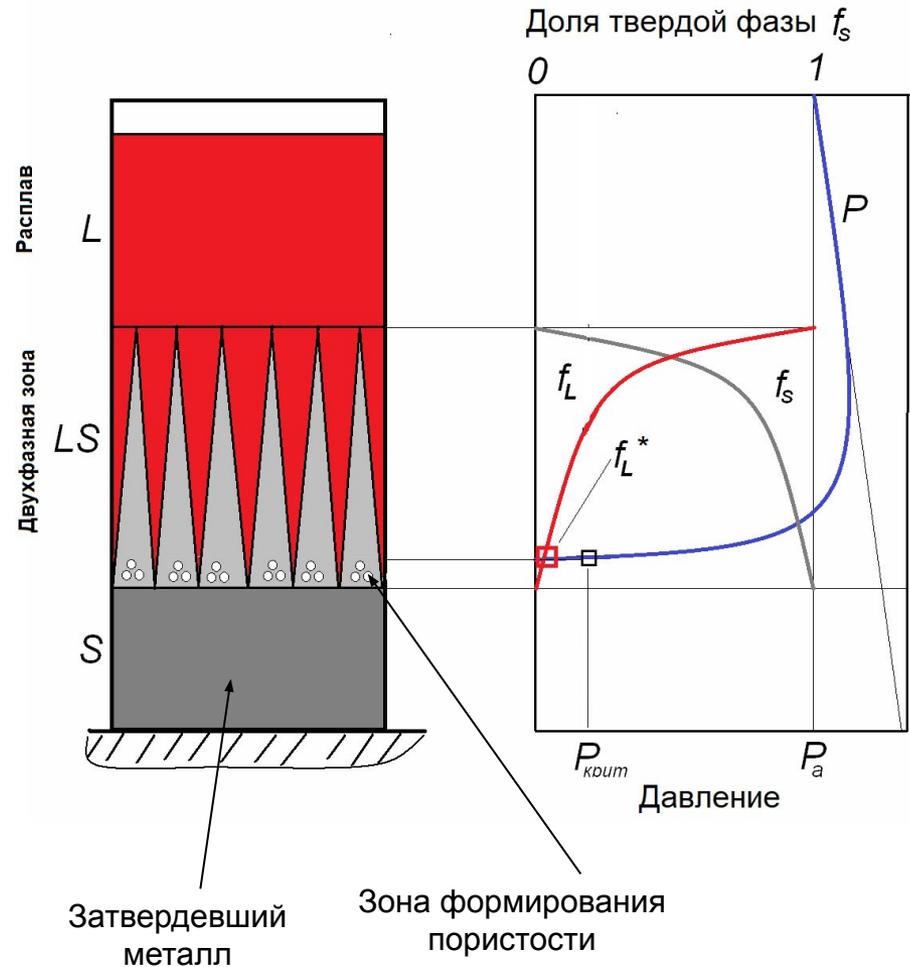
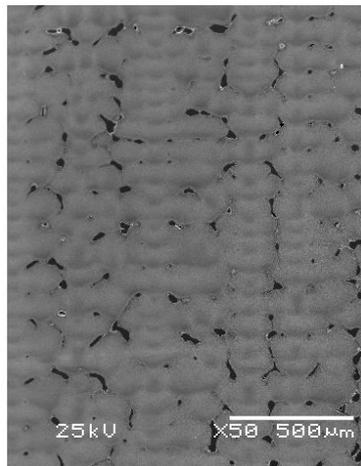
$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div} \left[\rho_L f_L \frac{K}{\mu} (\mathbf{grad} P - \rho_L g z) \right] = 0$$

- В зоне образования пористости

$$f_p = \frac{\beta}{1 + \beta} f_L^* \quad P < P_{\text{крит}}$$

- Кристаллизационная усадка

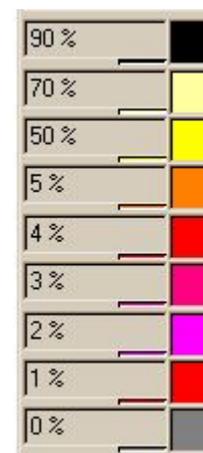
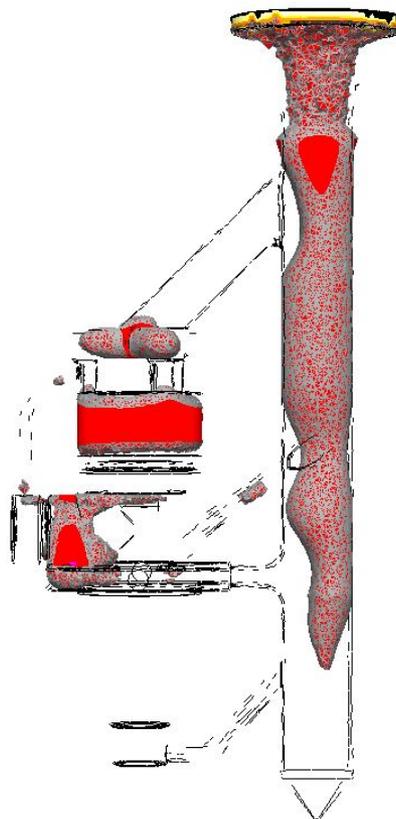
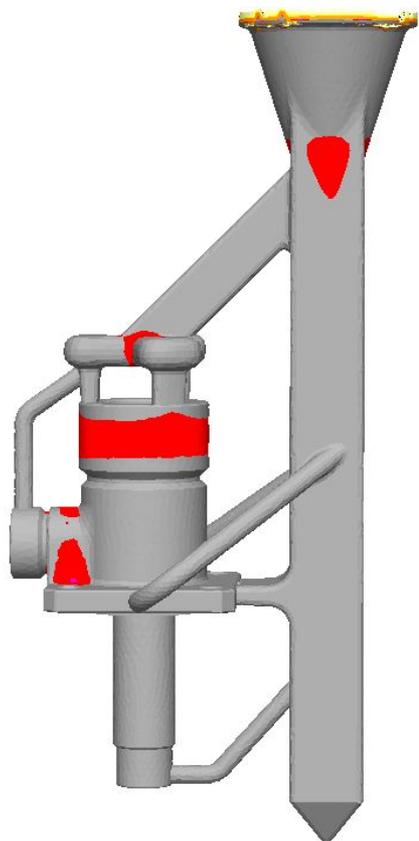
$$\beta = \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L}$$



Затвердевший металл

Зона формирования пористости

Прогноз усадочных дефектов в детали «Форсунка»

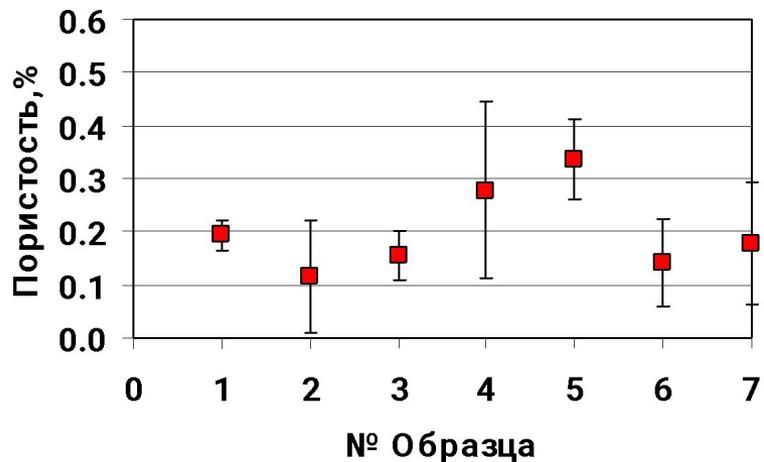
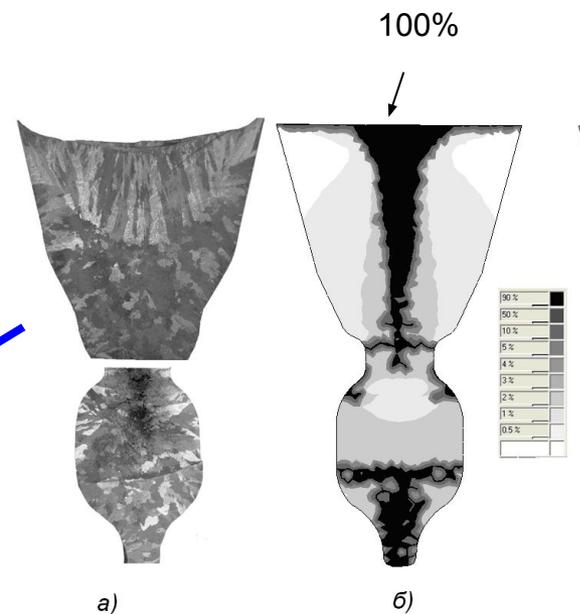
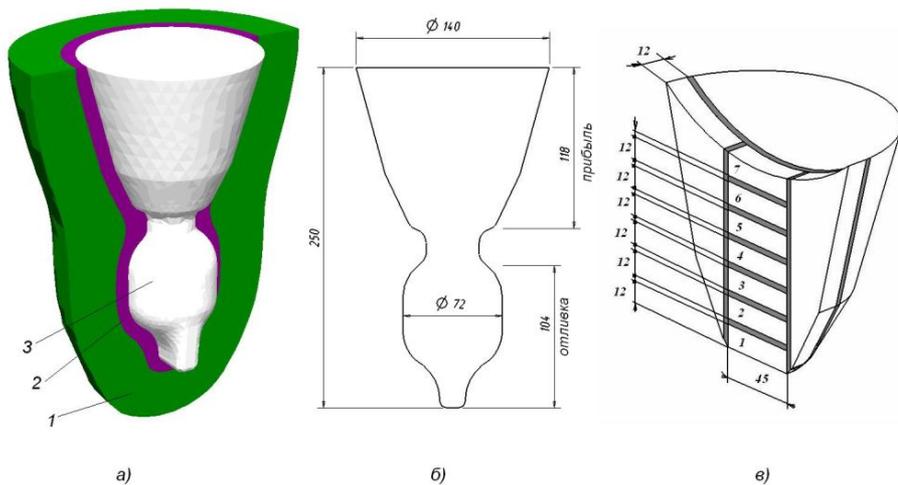


Пористость, %



Сравнение с экспериментом стандартной модели пористости

Макроструктура отливки из сплава ЧС88У

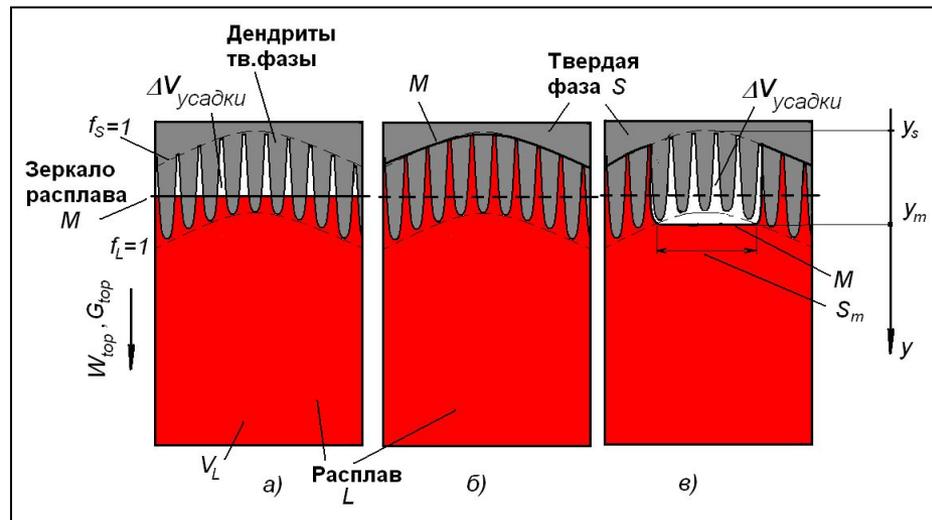


Результаты определения пористости в прибыльной части хорошо теплоизолированной отливки при достоверности определения плотности 0.95.

Макроструктура отливки (а) и результаты моделирования в СКМ «Полигон» (б)

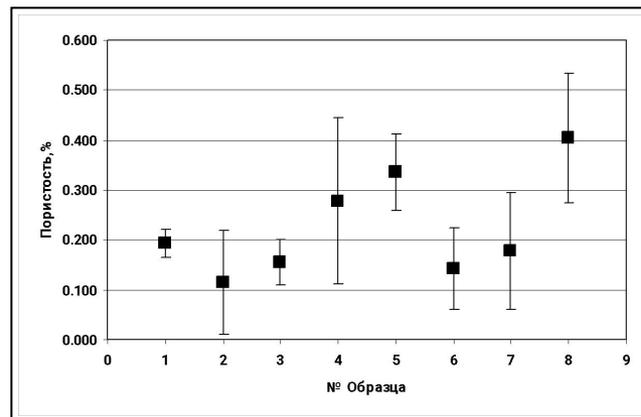
Развитие модели формирования усадочной раковины и макропористости

- Рис.(а): Кристаллизация сверху вниз: Зеркало расплава находится в двухфазной зоне. При опускании зеркала должна быть пористость, равная коэффициенту усадки (~5%). Не подтверждается экспериментом.
- Рис.(б): Капиллярные силы удерживают расплав в двухфазной зоне. Существование зеркала невозможно.
- Рис.(в): Накапливается достаточная усадка для образования свободной поверхности расплава вне дендритного каркаса.

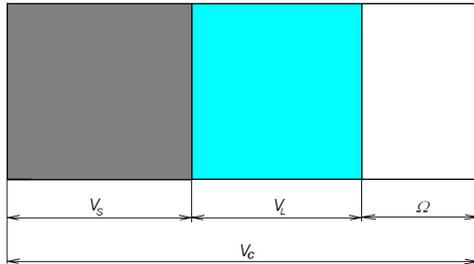


Новая модель усадочной раковины:

- Расчет положения свободной поверхности расплава с учетом капиллярного эффекта и структуры твердой фазы. Свободная поверхность расплава может существовать только вне дендритного каркаса.
- Для образования зеркала расплава необходимо преодолеть капиллярные силы.
- Необходима модель нарушения сплошности расплава, т.е. образования новой поверхности раздела



Давление в двухфазной зоне и образование усадочных пор



Давление в замкнутом тепловом узле:

$$f_l + f_s + \Omega = 1 \quad P = P_a + P_m + \Delta P_\varepsilon$$

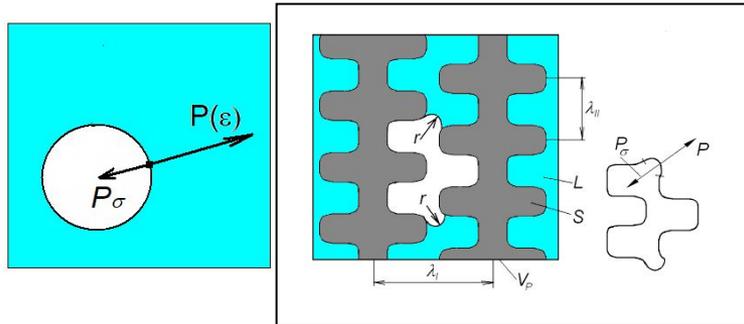
$$\Delta P_\varepsilon \approx -E\varepsilon \quad \varepsilon \cong \Omega / f_l$$

Условие зарождения поры:

Зарождение и рост усадочной поры:

$$P_a + P_m + \Delta P_\varepsilon (f_p) = -2\sigma / r \quad \varepsilon = \frac{\Omega - f_p}{f_L}$$

Размеры поры определяются размерами дендритной ячейки: $V_C = \lambda_I \times \lambda_I \times \lambda_{II}$

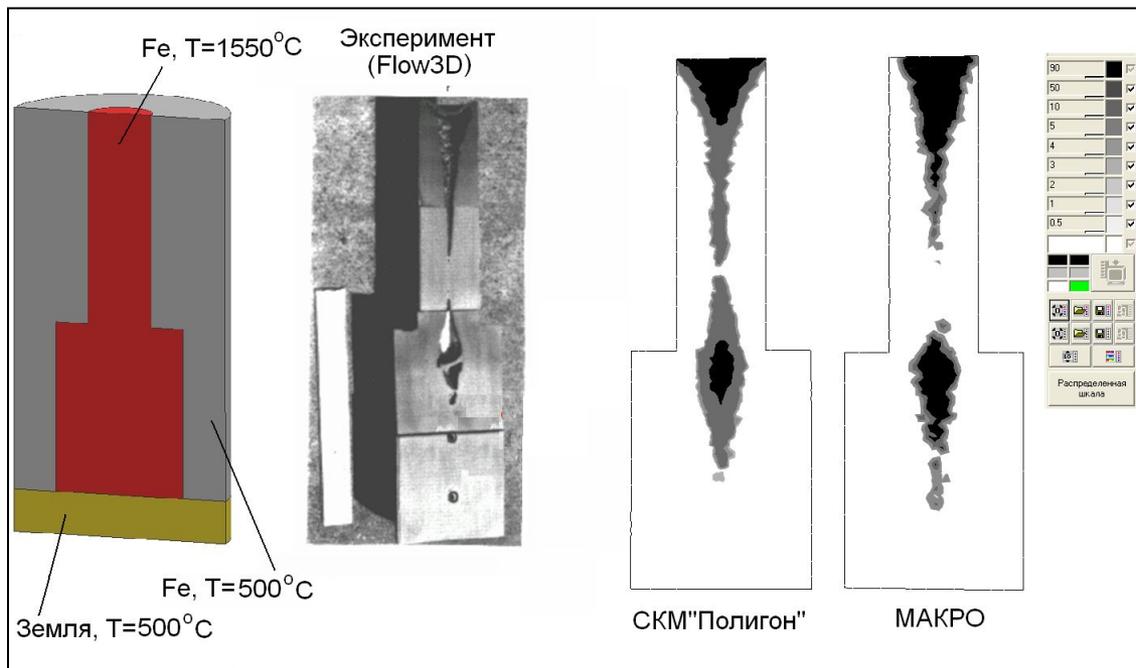


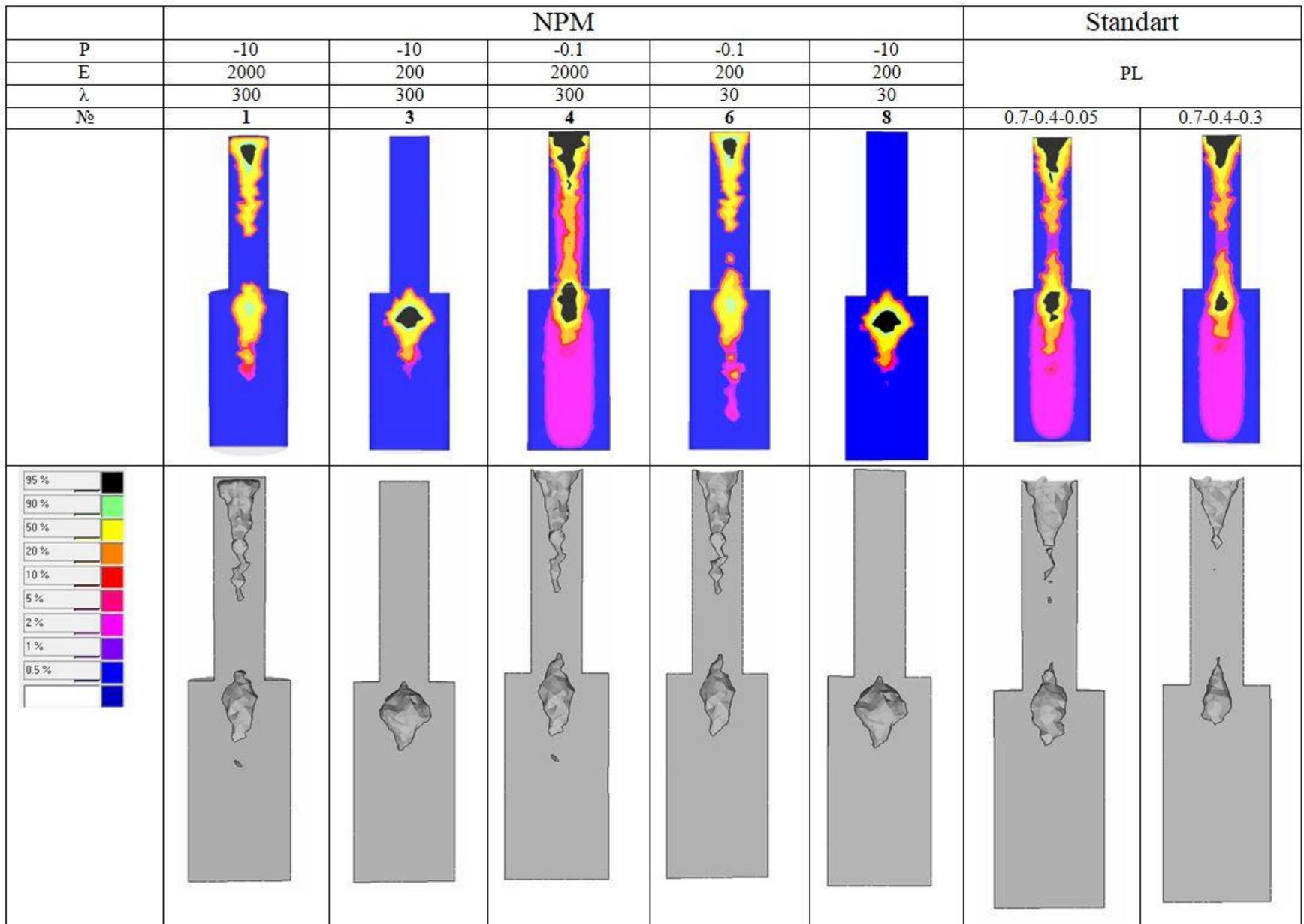
Для воздуха: $E = 1 \text{ кг/см}^2$

Для расплава $E = 20000 \text{ кг/см}^2$, т.е. при изменении давления на 1 атм, объем изменяется на 0.05%

$$P = -\frac{2\sigma}{R} = -\frac{2 \cdot 1 \frac{H}{M}}{1 \text{ мкм}} = -\frac{2 \cdot 1 \frac{H}{M}}{10^{-6} \text{ м}} = -2 \cdot 10^6 \frac{H}{M^2} = -2 \text{ МПа} = -20 \text{ атм}$$

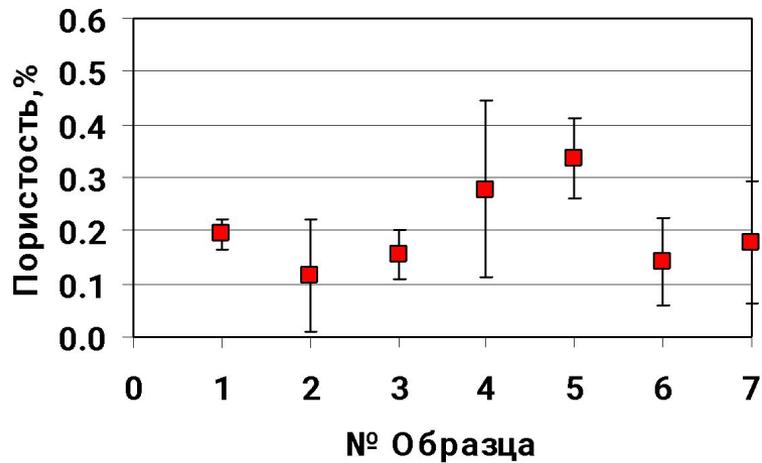
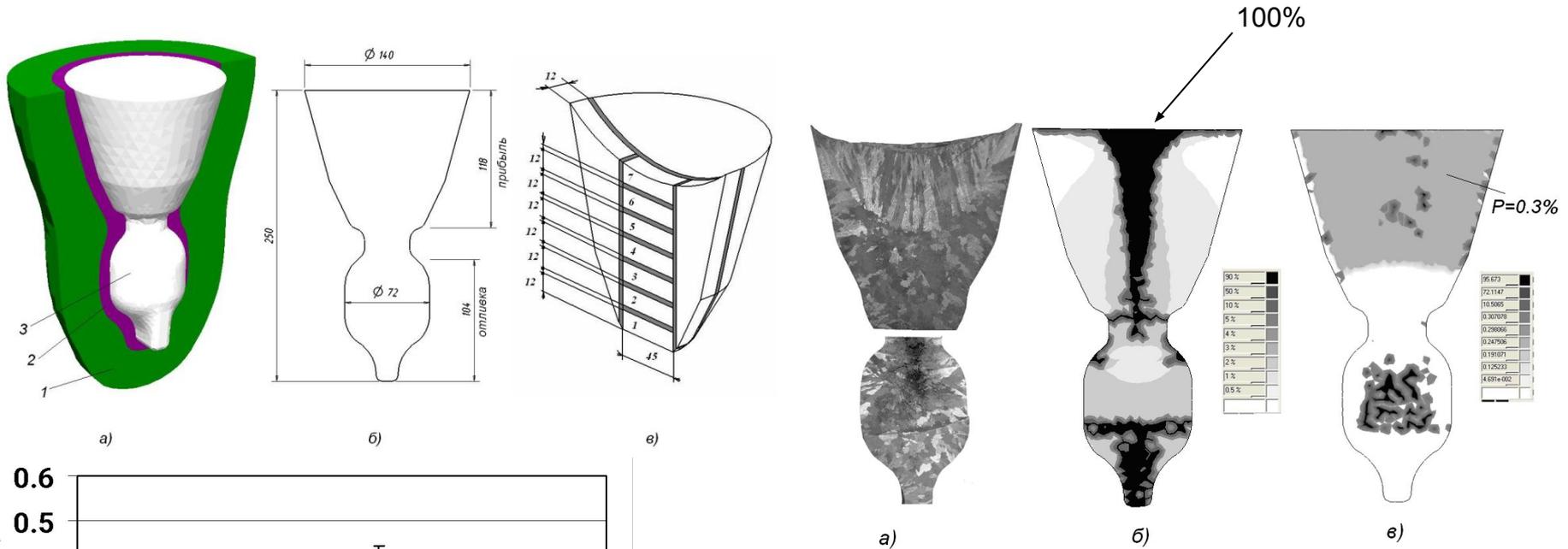
Сравнение моделей пористости





Опробование модели пористости

Макроструктура отливки из сплава ЧС88У

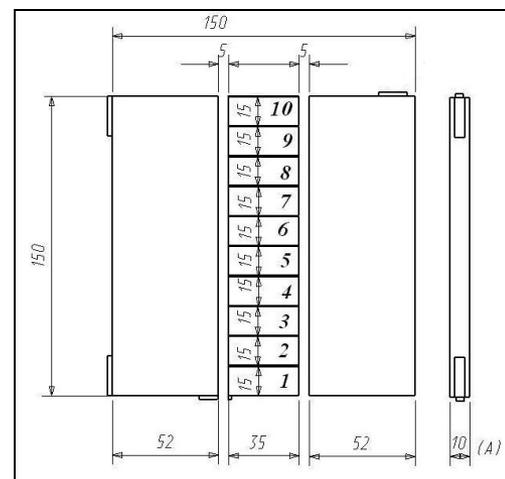
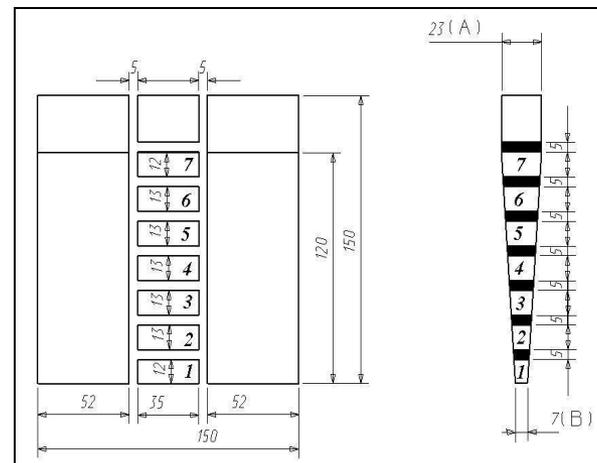
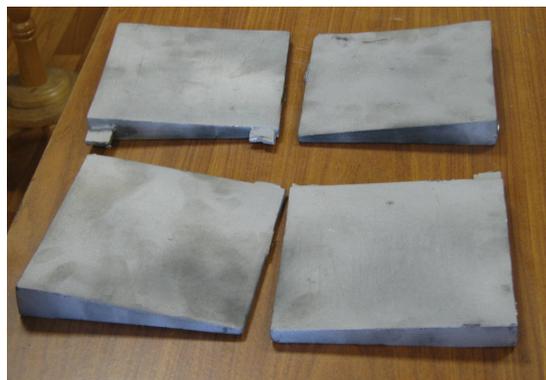
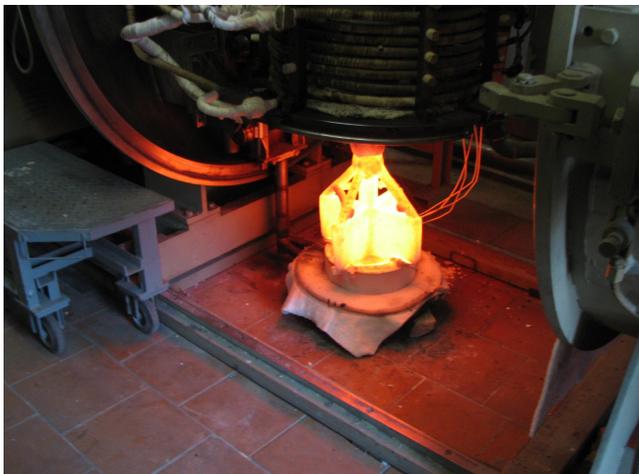


Результаты определения пористости в прибыльной части хорошо теплоизолированной отливки при достоверности определения плотности 0.95.

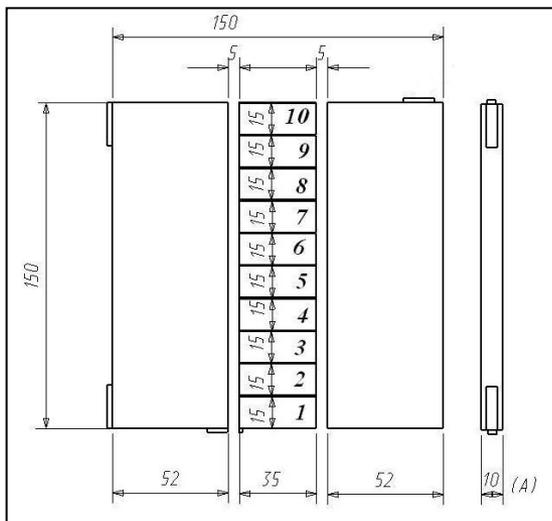
Макроструктура отливки (а) и результаты моделирования в СКМ «Полигон» (б) и в модуле Piping3D (в)

Экспериментальная проверка моделей пористости

Методика эксперимента



Экспериментальное определение пористости в пластинах и сравнение с расчетом в САМ ЛП «ПолигонСофт»



Разметка пластин для определения пористости методом гидростатического взвешивания

