

РАЗРАБОТКА ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ

Пустовалов Д.О.¹, Лабутин В.Н.¹, Белова С.А.¹, Кайгородов А.К.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, pustovalov.dmitrii@inbox.ru

В статье представлены: результаты анализа существующей литниковой системы для изготовления мелющих тел в неокрашенном кокиле; результаты расчетов новой разработанной литниковой системы в облицованном кокиле; расчет плотности стали; моделирование процесса программным комплексом ProCAST на предмет получения бездефектных отливок с высоким технологическим выходом годного (ТВГ). Для получения бездефектных отливок мелющих тел с высоким ТВГ была разработана литниковая система, где интенсивность теплового взаимодействия между кокилем и отливкой регулируется созданием определенного термического сопротивления на поверхности раздела отливки (расплав) и рабочей поверхности кокиля в виде слоя огнеупорной облицовки. При этом для создания направленного затвердевания и регулирования скорости охлаждения облицовку наносят не на всю поверхность кокиля. При расчете ЛПС (литниково-питающей системы) в программном продукте ProCAST вероятность получения бездефектных отливок высока, и предложенный способ получения мелющих тел оправдан.

Ключевые слова: плотность, кристаллизация, усадка отливки, ProCAST, литье стали, литниковая система, мелющие тела, облицовка, металлический кокиль

DEVELOPMENT SYSTEM FOR MANUFACTURING SPRUE GRINDING BODIES

Pustovalov D.O.¹, Labutin V.N.¹, Belova S.A.¹, Kaygorodov A.K.¹

¹Permsky National Research Polytechnic University, Russia, 614990, Perm, Komsomolsky pr., 29, pustovalov.dmitrii@inbox.ru

The article presents: the results of the analysis of existing gating system for the manufacture of grinding media in the unpainted metal mold; results of calculations of the new gating system developed in a lined metal mold; calculation of the density of steel; process modeling software package ProCAST for producing defect-free castings with high technological yield. For defect-free castings grinding media with high EGT was designed gating system, where the intensity of the interaction between heat and chill mold casting is governed by the creation of certain thermal resistance at the interface between the cast (melt) and the working surface of the mold in the form of a layer of the refractory lining. At the same time to create a directional solidification and cooling rate regulation trim is applied not to the entire surface of the mold. When calculating the LPS (gating) in the software product ProCAST probable that the defect-free castings is high and the proposed method of preparing grinding media justified

Keywords: density, crystallization, shrinkage casting, ProCAST, steel castings, gating system, grinding media, lining, metal mold

Мелющие тела для дробления сырья и материалов широко применяются в самых различных отраслях промышленности, в том числе горнорудной, цементной, энергетической и др. Ежегодно в мире с их помощью размалывают около 2 млрд т минерального сырья в год.

Разработка литниковой системы для изготовления мелющих тел с определенным технологическим выходом годного (ТВГ) и минимальным использованием ручного труда является актуальной проблемой, так как процесс охлаждения и затвердевания сплава в отливке сферической формы приводит к образованию усадочной раковины и пористости, исходящей из центра шара.

К материалу для изготовления мелющих тел предъявляют ряд требований, обусловленных спецификой их эксплуатации. Мелющие тела должны иметь высокую

твердость и абразивную износостойкость и, кроме того, сопротивление ударам.

Целью данной работы является разработка литниковой системы для изготовления мелющих тел с ТВГ 75 ± 2 %.

Материалы и методы исследования

Химический состав исходного исследуемого сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемого сплава, % (масс.)

Элемент	C	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	P	S
Содержание, %	0,77	0,65	0,4	0,2	0,06	0,2	0,05	0,05

Производились теоретические расчеты плотности сплава с учетом добавления по 1% каждой примеси с целью получения сплава заданного химического состава.

Теоретический расчет плотности сплава был произведен по формуле

$$\rho = \rho_{жс} + \Delta\rho \cdot x, \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность определенного сплава, г/см³; $\rho_{жс}$ – плотность железа, г/см³; x – содержание примесей в % по весу; $\Delta\rho$ – изменение плотности на 1% добавки.

Параллельно было проведено моделирование процессов кристаллизации сплава с использованием программного комплекса *ProCAST*. После этого был проведен анализ на предмет соответствия расчетных данных и результатов компьютерного моделирования.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время мелющие тела изготавливают в металлическом неокрашиваемом кокиле по литниковой системе, представленной на рисунке 1.

Изменение плотности сплава на 1% каждой примеси представлено в таблице 2.

Таблица 2

Изменение плотности сплава на 1% каждой примеси

Элементы	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
Изменение плотности сплава на 1 % добавки, $\Delta\rho$	-0,04	-0,016	-0,073	+0,001	+0,004	+1	+0,011	-0,117	-0,164

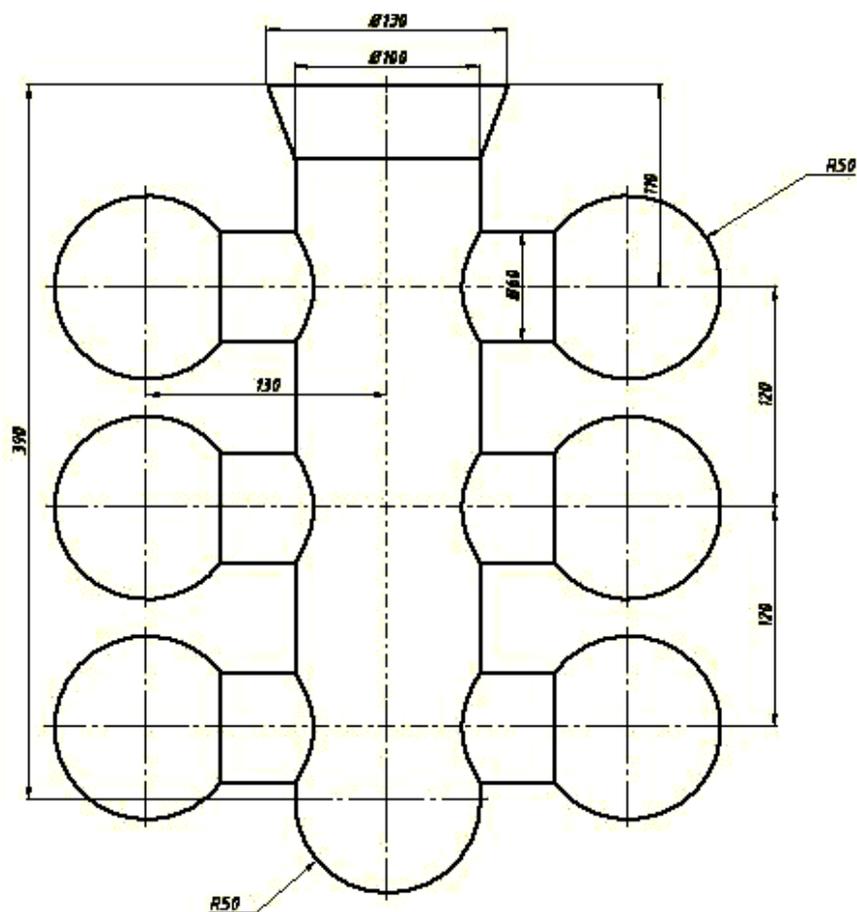


Рис. 1. Существующая литниковая система

Используя формулу (1), рассчитали плотность исследуемого сплава.

$$\rho = 7,88 - 0,77 \times 0,04 - 0,65 \times 0,016 - 0,4 \times 0,073 + 0,2 \times 0,004 + 0,06 \times 1 + 0,2 \times 0,011 - 0,05 \times 0,117 - 0,05 \times 0,164 = 7,85896 \text{ г/см}^3 \approx 7,86 \text{ г/см}^3$$

В системе *ProCAST* плотность сплава при различных температурах составила: при 20°C – 7,85 г/см³; при 1580°C – 6,83 г/см³.

При расчете данной литниковой системы за тепловой узел принята половина шара, диаметр теплового узла – 50 мм, диаметр шейки увеличен на 20% и равен 60 мм с предложением о возможности вывода раковины Ø 50 мм. Диаметр стояка рассчитан исходя из длины шейки Ø 60 мм, равной 30 мм, и объема полушара $V = 262 \text{ см}^3$. Отсюда диаметр стояка составляет

$$D_{cm} = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 262}{3,14 \cdot 3}} = 10,5 \text{ см} \approx 100 \text{ мм},$$

где D_{cm} – диаметр стояка, см; V – объем полушара, см³; H – длина шейки, см.

Особенности технологии литья стали в кокиль обусловлены ее плохими литейными свойствами и высокой скоростью охлаждения расплава и отливки, что не учтено при расчете

существующей литниковой системы.

Для работы прибылей при получении бездефектной отливки должно соблюдаться условие:

$$\tau_{\text{затв. стали}} > \tau_{\text{затв. шейки}} > \tau_{\text{затв. отливки}} \quad (2)$$

где τ – время затвердевания, с.

Для определения времени кристаллизации сплава, протекающей в интервале температур, использовали формулу А.И. Вейника

$$\tau_2 = \frac{G_1 \cdot C_{1пр} \cdot (T_{\text{ликв}} - T_{\text{сол}})}{\beta \cdot F_1 \cdot \left(\frac{T_{\text{ликв}} + T_{\text{сол}}}{2} - T_{2\text{нач}} \right)}, \text{ ч},$$

где G_1 – вес отливки, кг;

$C_{1пр}$ – приведенная теплоемкость отливки с учетом скрытой теплоты кристаллизации r_1 ,

Дж/кг:

$$C_{1пр} = \frac{C_{1ж} - C_{1т}}{2} + \frac{r_1}{T_{\text{ликв}} - T_{\text{сол}}}$$

где $C_{1ж}$ и $C_{1т}$ – теплоемкости сплава отливки в жидком и твердом состояниях;

$T_{2\text{нач}}$ – температура формы.

Исходные данные для расчета:

$$G_{\text{отл}} = 3,96 \text{ кг};$$

$$C_{1пр} = 3478,6 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$T_{\text{ликв}} = 1733 \text{ К}$$

$$T_{\text{сол}} = 1638 \text{ К}$$

$$T_{2\text{нач}} = 423 \text{ К}$$

$$C_{1ж} = 920 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$C_{1т} = 753 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$r_1 = 251000 \text{ Дж/кг};$$

$$\beta = 720000 \text{ Дж/м}^2\cdot\text{К}$$

$$F_1 = 0,0283 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{шейки}} = 0,0085 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{ст}} = 0,14 \text{ м}^2;$$

$$G_{\text{шейки}} = 1,082 \text{ кг};$$

$$G_{\text{ст}} = 27,765 \text{ кг}.$$

$$\tau_2 = \frac{3,96 \cdot 3478,6 \cdot (1733 - 1638)}{720000 \cdot 0,0283 \cdot \left(\frac{1733 + 1638}{2} - 423 \right)} = 0,05 \text{ ч} = 3 \text{ мин.}$$

Боковая поверхность шейки, которая соприкасается с формой $F_{\text{шейки}} = 0,0085 \text{ м}^2$:

$$\tau_{2\text{шейки}} = \frac{1,082 \cdot 3478,6 \cdot (1733 - 1638)}{720000 \cdot 0,0085 \cdot \left(\frac{1733 + 1638}{2} - 423 \right)} = 0,046 \text{ ч} = 2,78 \text{ мин.}$$

$$\tau_{2cm} = \frac{27,765 \cdot 3478,6 \cdot (1733 - 1638)}{720000 \cdot 0,14 \cdot \left(\frac{1733 + 1638}{2} - 423 \right)} = 0,06 \text{ ч} = 3,6 \text{ мин.}$$

Условие прибыли (2) не соблюдается, так как $3,6 > 2,78 < 3$.

Это подтверждается моделированием при использовании программного продукта *ProCAST* (рис. 2).

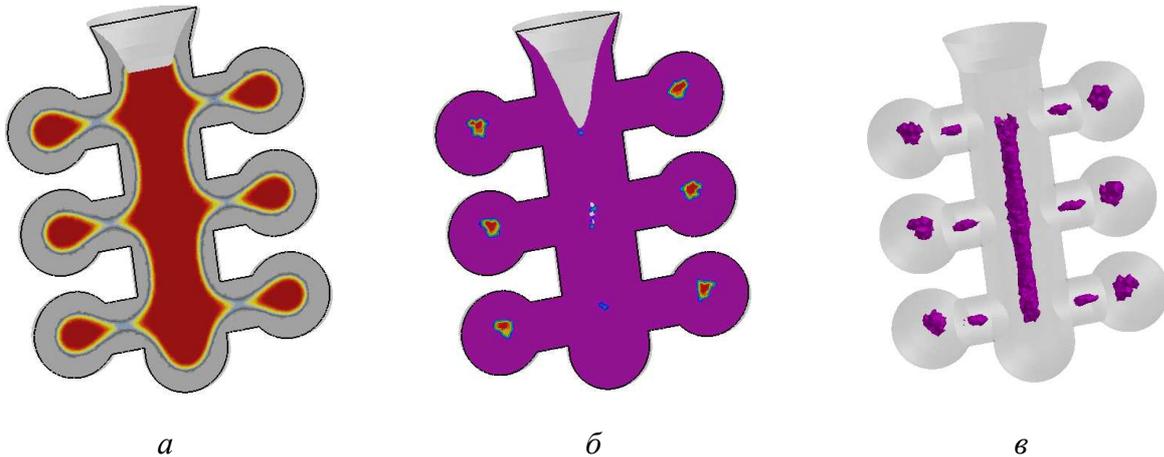


Рис. 2. Визуализация этапов моделирования: а – направленность кристаллизации; б – усадочные дефекты в сечении; в – усадочные дефекты в объеме

В мелющих шарах остаются дефекты – раковины усадочного характера размером $\approx 25 \times 25 \times 20$ мм. Кроме этого, отливки шаров требуют трудоемкой механической обработки, а $TBG_{\text{расчет}} = 41\%$.

Для получения бездефектных отливок мелющих тел с высоким ТВГ была разработана литниковая система, где интенсивность теплового взаимодействия между кокилем и отливкой регулируется созданием определенного термического сопротивления на поверхности раздела отливки (расплав) и рабочей поверхности кокиля. Для этого на рабочую поверхность кокиля наносят слой огнеупорной облицовки. Для создания направленного затвердевания и регулирования скорости охлаждения облицовку наносят не на всю поверхность кокиля.

Разработка чертежа литниковой системы

Для разработки чертежа литниковой системы необходимо рассчитать следующие ее параметры:

– металлоемкость формы для данной конфигурации литниково-питающей системы:

$$G_{\text{м.ф.}} = G_B + G_{\text{ц}}'' + 2 \cdot G_{\text{ш}}' + 4 \cdot G_{\text{ш}} + 4 \cdot G_{\text{ц}}''' \quad (3)$$

где G_B – масса воронки $G_B = V_B \cdot \rho$, где V_B – объем воронки

$$V_B = \frac{\pi \cdot h}{3} (R^2 + r^2 + R \cdot r) = \frac{3,14 \cdot 2}{3} (3^2 + 1,5^2 + 3 \cdot 1,5) = 33 \text{ см}^3$$

Масса воронки составила $G_B = V_B \cdot \rho = 33 \cdot 7,86 = 259,38 \text{ г} = 0,26 \text{ кг}$

Масса шара составила

$$G_{\text{шара}} = V_{\text{ш}} \cdot \rho = \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \right) \cdot \rho = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 50^3 \cdot 7,86 = 4,1 \text{ кг}$$

Объем и масса полушара – $V'_{\text{шара}} = (0,524 \cdot d^3) / 2 = 134 \text{ см}^3$; $G'_{\text{ш}} = 1,05 \text{ кг}$

Объем и масса цилиндра – $V''_{\text{ц}} = \frac{3,14 \cdot 8^2}{4} \cdot 8 = 402 \text{ см}^3$; $G''_{\text{ц}} = 3,16 \text{ кг}$

Объем и масса питателя – $V'''_{\text{ц}} = \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} \cdot 0,6 = 4,2 \text{ см}^3$; $G'''_{\text{ц}} = 0,033 \text{ кг}$

Объем и масса прибыли – $V_{\text{прибыли}} = V''_{\text{ц}} + V'_{\text{шара}} = 268 + 402 = 670 \text{ см}^3$

$$G_{\text{прибыли}} = 5,26 \text{ кг}$$

$$G_{\text{м.ф.}} = G_B + G''_{\text{ц}} + G'_{\text{ш}} + G_{\text{ш}} + 4G'''_{\text{ц}} = 0,26 + 3,16 + 2,1 + 16,4 + 0,132 = 22,052 \text{ кг}$$

– технологический выход годного составил $TBG = \frac{4 \cdot 4,1}{22,052} = 74,36\%$

Разработанная литниковая система представлена на рисунке 3.

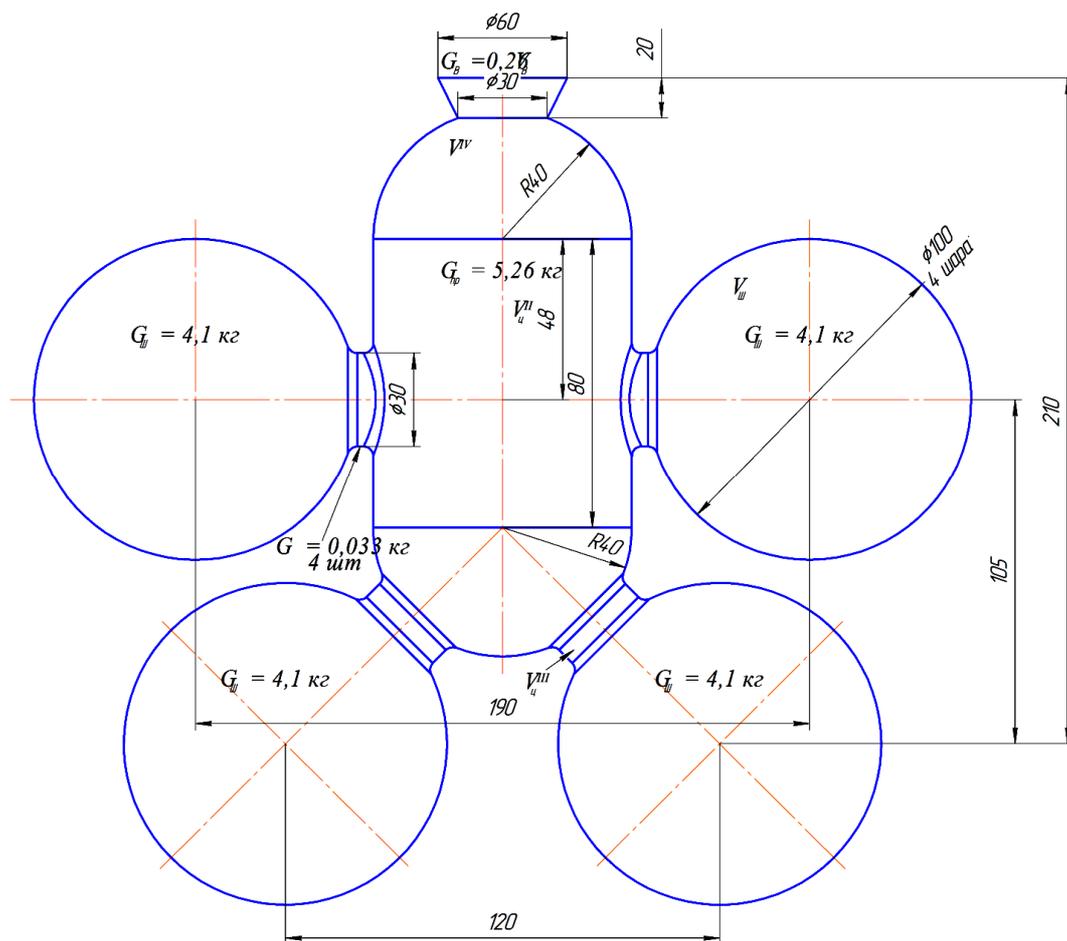


Рис. 3. Чертеж разработанной литниковой системы

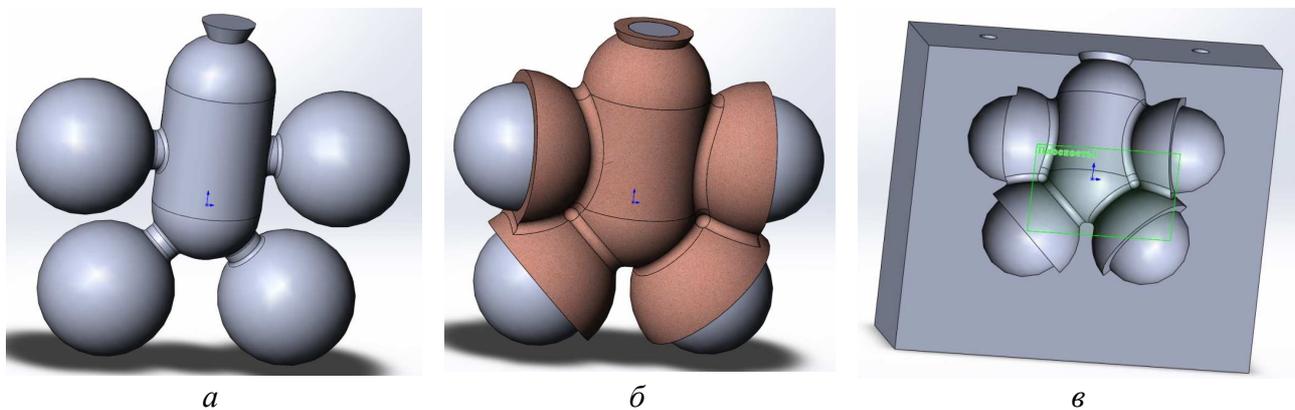


Рис. 4. 3D-модели, используемые при моделировании: а – 3D-модель блока отливок; б – 3D-модель блока отливок с нанесенной облицовкой; в – 3D-модель кокиля

Расчет прибыли

Минимальная высота от верхней кромки шара до верха кокиля при массе отливки 11–25 кг составляла 60 мм.

Расчет объема прибыл произведен по методу Пржибыла.

$$V_{\text{прибыли}} = \frac{\varepsilon_{V_{\Sigma}} \cdot K_{\Pi}}{1 - \varepsilon_{V_{\Sigma}} \cdot K_{\Pi}} \cdot V_0, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{V_{\Sigma}}$ – суммарная относительная объемная усадка затвердевания = 0,05;

K_{Π} – коэффициент прибыли = 9; V_0 – объем теплового узла отливки.

$$V_0 = 0,524 \cdot d^3 = 0,524 \cdot 10^3 = 524 \text{ см}^3$$

$$\text{Объем прибыли: } V_{\text{прибыли}} = \frac{0,05 \cdot 9}{1 - 0,05 \cdot 9} \cdot 524 = 429 \text{ см}^3$$

Из конструктивных соображений при проектировании литниковой системы для получения ТВГ согласно заданию $75 \pm 2\%$, объем прибыли был увеличен:

$$V_{\text{прибыли}} = 670 \text{ см}^3$$

Визуализированные отливки с литниково-питающей системой при моделировании в программном продукте *ProCAST* представлены на рисунке 5.

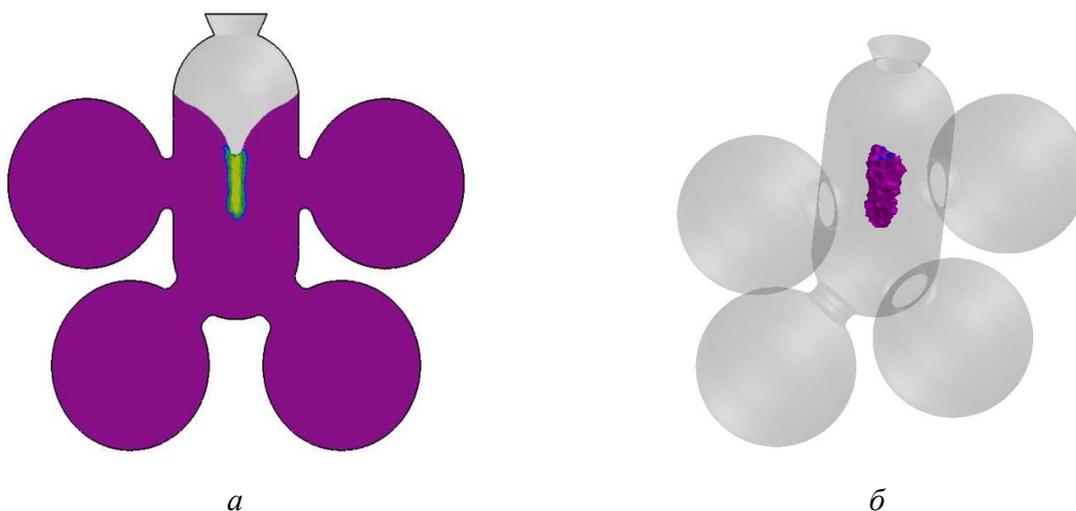


Рис. 5. Усадочные дефекты в отливке: а – в сечении; б – в объеме

Выводы

По результатам расчетов и компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. В объеме пористость видна только в зоне стояка, что никак не сказывается на качестве получаемых отливок шаров.
2. Технологический выход годного (ТВГ) для разработанной системы составил 74,36%.
3. Время заполнения кокиля составило: рассчитанное в программном продукте *ProCAST* – 7,83 с.
4. Время выдержки в кокиле до выбивки: рассчитанное в программном продукте *ProCAST* –

30,86 мин.

Таким образом, при расчете ЛПС (литниково-питающей системы) в программном продукте *ProCAST* вероятность получения бездефектных отливок высока, и предложенный способ получения мелющих тел оправдан.

Список литературы

1. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затверждение и охлаждение отливки: учебник для вузов / Г.Ф. Баландин — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 .— 359 с.
2. Белов В.Д. Теория литейных процессов: учебник / В.Д. Белов [и др.] / Под ред. Хосена Ри. – Хабаровск: РИОТИП краевой типографии, 2008. – 580 с.
3. Бураков С.Л. Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник, Н.П. Дубинин и др. / Под ред. А.И. Вейника.– М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
4. Гини Э.Ч. Специальные технологии литья: учебник для вузов / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 367 с.
5. Руденко А.Б., Серебро В.С. Литье в облицованный кокиль. – М.: Машиностроение, 1987. – 184 с.

Рецензенты:

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, декан МТФ ПНИПУ, г. Пермь;

Сиротенко Л.Д., д.т.н., профессор кафедры МТиКМ ПНИПУ, г. Пермь.