



УДК 621.74:539

Поступила 10.02.2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ОТЛИВКЕ С ПРИБЫЛЯМИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА И ФУРЬЕ–КИРХГОФА

SIMULATIONS OF DISTRIBUTIONS OF SHRINKAGE DEFECTS IN THE CASTING WITH THE PROFITS BASED ON THE NAVIER–STOKES AND FOURIER–KIRCHHOFF EQUATIONS

*А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ, О. А. САЧЕК, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, Т. В. МАТЮШИНЕЦ,
О. И. ЧИЧКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. E-mail: chichko_a_n@mail.ru*

*A. N. CHICHKO, S. G. LIKHOUZOV, O. A. SACHEK, YU. V. JATSKEVICH, T. V. MATYUSHINETS,
O. I. CHICHKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: chichko_a_n@mail.ru*

Проведено численное моделирование процесса получения стальной отливки «Корпус подшипника» для двух вариантов технологии. Рассчитаны трехмерная динамика движения стали в системе литник-отливка, трехмерные поля температур и плотностей в процессе формирования отливки. Показаны возможности компьютерного моделирования для выбора наилучших технологических решений в задачах литейного производства.

Numerical simulations of the process of obtaining a cast steel of bearing cases were performed for two options of technical processing. Three-dimensional motion dynamics of steel was calculated in the gate-casting system, three-dimensional temperature fields and densities in the process of casting were calculated as well. The possibilities of computer simulation were shown in order to find the best technical processing in the foundry production.

Ключевые слова. *Отливка, усадочная пористость, моделирование.*

Keywords. *Casting, shrinkage porosity, simulation.*

Введение

Моделирование как метод оптимизации технологических решений по отливкам и слиткам в литейном и металлургическом производствах известен ученым и производственникам давно. Однако до сих пор значительная часть технологических решений при разработке технологии изготовления, например отливок, формируется методом прототипирования с большим и часто неоправданным запасом металла на литниковую систему и прибыли. Все это приводит к повышенному расходу энергоносителей на производство отливок.

Одной из проблем, с которой сталкиваются все технологии в литейном производстве, является проблема разработки технологии, позволяющей выводить усадочную пористость в прибыли, а также уменьшать размеры зон отливок, пораженных пористостью [1, 2]. Несмотря на большую актуальность этой проблемы, по-прежнему опыт и промышленные испытания являются основным инструментом технолога в литейном производстве. В то же время современные компьютерные технологии служат мощным инструментом для выбора оптимальных технологических решений в части имитационного моделирования процессов течения и кристаллизации металла. Более 15 лет мы пропагандируем компьютерные технологии моделирования процессов формирования отливок и слитков для производственников [3–7].

В данной работе развивается метод моделирования усадочной пористости, основанный на компьютерных системах типа «ПроЛит-п», в которых реализовано математическое ядро, основанное на совместном численном решении уравнений теплопроводности и Навье-Стокса.

Настоящая работа является развитием и продолжением работ [8–11], в том числе выполненных по заданиям Государственной научной прикладной программы «Металлургия» НАН Беларуси.

Цель статьи – моделирование процесса образования усадочной пористости для двух вариантов технологии изготовления отливки «Корпус подшипника» на основе детерминированных физических моделей, которые разрабатываются в Белорусском национальном техническом университете для выбора оптимальных технологических решений в задачах проектирования литейной оснастки.

Общая постановка задачи и исходные данные

Для математического описания конвекции тепловых потоков в кристаллизующемся металле используется система уравнений Навье-Стокса [3–6]:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + U \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + V \frac{\partial W}{\partial x} + U \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) дополнена уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

где V, U, W – проекция скорости соответственно на ось X, Y, Z ; g – ускорение свободного падения; ρ и η – плотность и динамическая вязкость жидкости (расплава); t – время; P – давление в рассматриваемой точке потока.

Процесс кристаллизации моделировали на основе уравнения теплообмена Фурье-Кирхгофа:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} + U \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, T). \quad (3)$$

Теплообмен на поверхности твердого тела с жидкостью описывался как:

$$\alpha \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости (расплава); $q(x, y, z, T)$ – функция, учитывающая теплоту кристаллизации; t – время; T – температура в рассматриваемой точке потока (x, y, z) ; λ и c – теплопроводность и теплоемкость расплава; α – коэффициент теплоотдачи на граничной поверхности «металл-форма».

На основе разработанной системы уравнений (1)-(4) при проведении моделирования используются конечно-разностные аппроксимации, которые дополняются в каждом конкретном техническом случае объекта «отливка-литник-форма» своей специфической системой граничных условий, отражающей пространственные области пересечений непрерывных физических сред «расплав», «форма», «воздух» «закристаллизованный металл» со своими теплофизическими характеристиками. В компьютерных расчетах использовали шесть типов объектов: Ω_1 – жидкий металл; Ω_2 – форма или закристаллизовавшийся металл; Ω_3 – воздух; Ω_4 – ось симметрии; Ω_5 – источник ($\rho(\Omega_5) = \text{const}$; $T(\Omega_5) = \text{const}$); Ω_6 – граница первого рода ($T(\Omega_6) = \text{const}$).

При моделировании использованы следующие начальные условия для $t = 0$:

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = 0; V_y(\Omega_1) = 0; V_z(\Omega_1) = 0; \rho(\Omega_1) = \rho_0(\Omega_1); P(\Omega_1) = 0; T(\Omega_1) = T_{\text{зал}}, \\ V_x(\Omega_2) = 0; V_y(\Omega_2) = 0; V_z(\Omega_2) = 0; \rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2); P(\Omega_2) = 0; T(\Omega_2) = T_2, \\ V_x(\Omega_3) = 0; V_y(\Omega_3) = 0; V_z(\Omega_3) = 0; \rho(\Omega_3) = \rho_0(\Omega_3); P(\Omega_3) = 0; T(\Omega_3) = T_3, \\ V_x(\Omega_4) = 0; V_y(\Omega_4) = 0; V_z(\Omega_4) = 0; \rho(\Omega_4) = \rho_0(\Omega_1); P(\Omega_4) = 0; T(\Omega_4) = T(\Omega_1), \\ V_x(\Omega_5) = 0; V_y(\Omega_5) = 0; V_z(\Omega_5) = 0; \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1); P(\Omega_5) = 0; T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}, \\ V_x(\Omega_6) = 0; V_y(\Omega_6) = 0; V_z(\Omega_6) = 0; \rho(\Omega_6) = \rho_0(\Omega_2); P(\Omega_6) = 0; T(\Omega_6) = T_6. \end{aligned} \quad (5)$$

Для $t \neq 0$ использовали следующие граничные условия:

$$\begin{aligned}
 &V_x(\Omega_1) = V_x(\Omega_{1n}); V_y(\Omega_1) = V_y(\Omega_{1n}); V_z(\Omega_1) = V_z(\Omega_{1n}); \rho(\Omega_1) = \rho(\Omega_{1n}), \\
 &P(\Omega_1) = P(\Omega_{1n}); T(\Omega_1) = T(\Omega_{1n}); V_x(\Omega_2) = 0; V_y(\Omega_2) = 0; V_z(\Omega_2) = 0, \\
 &\rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2); P(\Omega_2) = P(\Omega_1); T(\Omega_2) = T(\Omega_{2n}); V_x(\Omega_3) = V_x(\Omega_1), \\
 &V_y(\Omega_3) = V_y(\Omega_1); V_z(\Omega_3) = V_z(\Omega_1); \rho(\Omega_3) = \rho(\Omega_{3n}); P(\Omega_3) = 0; T(\Omega_3) = T(\Omega_{3n}), \\
 &V_x(\Omega_4) = -V_x(\Omega_1); V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_1); V_z(\Omega_4) = V_z(\Omega_1); \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\
 &P(\Omega_4) = P(\Omega_1); T(\Omega_4) = T(\Omega_1); \text{если граница перпендикулярна оси } X \\
 &V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_1); V_y(\Omega_4) = -V_y(\Omega_1); V_z(\Omega_4) = V_z(\Omega_1); \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\
 &P(\Omega_4) = P(\Omega_1); T(\Omega_4) = T(\Omega_1); \text{если граница перпендикулярна оси } Y \\
 &V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_1); V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_1); V_z(\Omega_4) = -V_z(\Omega_1); \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\
 &P(\Omega_4) = P(\Omega_1); T(\Omega_4) = T(\Omega_1); \text{если граница перпендикулярна оси } Z \\
 &V_x(\Omega_5) = V_x(\Omega_{5n}); V_y(\Omega_5) = V_y(\Omega_{5n}); V_z(\Omega_5) = V_z(\Omega_{5n}); \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), \\
 &P(\Omega_5) = 0; T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}; V_x(\Omega_6) = 0; V_y(\Omega_6) = 0; V_z(\Omega_6) = 0, \\
 &\rho(\Omega_6) = \rho_0(\Omega_2); P(\Omega_6) = 0; T(\Omega_6) = T_6.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Представленную модель использовали для моделирования динамики распределения температур и пористости в модельной отливке «Корпус подшипника». В качестве расплава была использована сталь 20 ФЛ, имеющая химический состав и следующие характеристики: [C] = 0,14–0,25%; [Mn] = 0,7–1,2%; [Si] = 0,2–0,52%; $T_{\text{лик}} = 1521 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{сол}} = 1487 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве формы использовали песчаную смесь со следующими характеристиками: начальная температура $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; удельная теплоемкость $c_2 = 120 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; плотность $\rho_2 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$.

На рис. 1 показана 3d-модель стальной отливки «Корпус подшипника» с литниковой системой без прибыли, которая была построена с помощью системы Solid Works и импортирована в систему моделирования. В качестве расплава использовали сталь 25Л ГОСТ 977-88 со следующими характеристиками: удельная теплоемкость c_1 , задаваемая в табличном виде (табл. 1); коэффициент теплопроводности λ_1 , задаваемый в табличном виде (табл. 2); плотность стали $\rho = 7830 \text{ кг}/\text{м}^3$; $T_{\text{лик}} = 1521 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{сол}} = 1487 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{зал}} = 1590 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Базовые значения удельной теплоемкости

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	100	200	400	600
$c_1, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	470	483	525	571

Таблица 2. Базовые значения удельной теплопроводности

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400
$\lambda_1, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	51	76	65	44	38

Дополнительные температурные точки и значения физических величин были получены с помощью сплайновых функций.

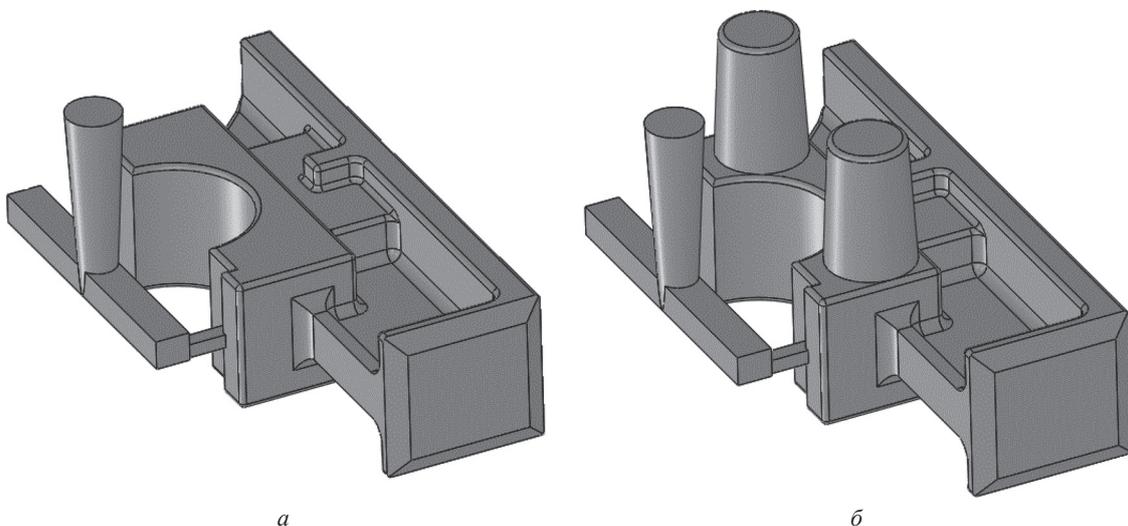


Рис. 1. Геометрия 3d-моделей стальной отливки «Корпус подшипника» без прибылей (а – вариант А) и с прибылями (б – вариант Б)

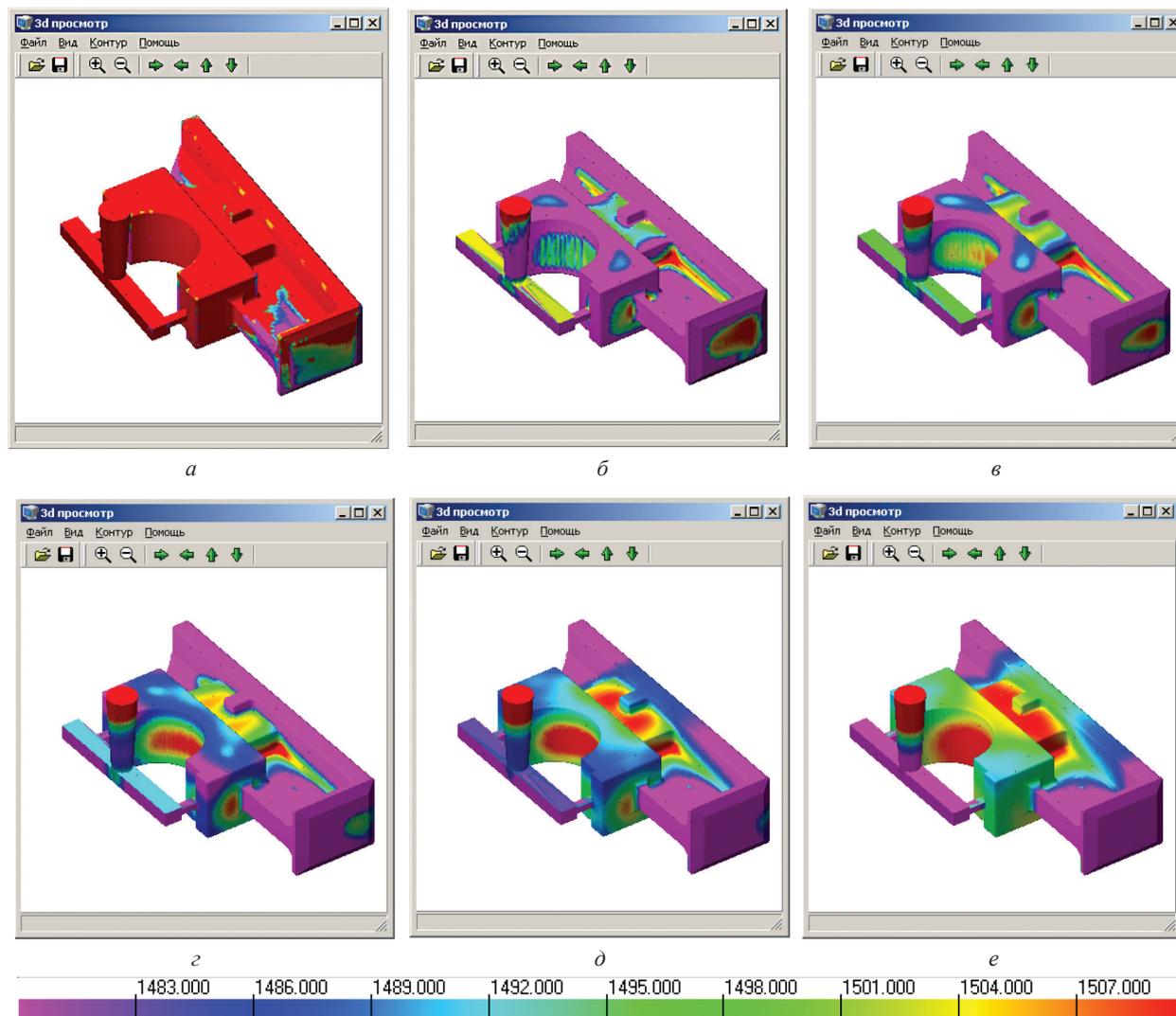


Рис. 2. Моделирование. Трехмерные температурные поля отливки «Корпус подшипника» без прибыли (вариант А) для различных моментов времени: а – 85 с; б – 500; в – 1000; г – 2000; д – 3500; е – 7500 с

Результаты численного моделирования усадочных дефектов на объекте (вариант А)

На рис. 2 представлены температурные поля исследуемой отливки «Корпус подшипника» без прибыли для различных моментов времени. Как видно из рисунка, в начальные моменты времени происходит быстрое охлаждение поверхности отливки не только в тонких и удаленных от мест питания частях, но и в массивных частях отливки. Однако после момента времени 1000 с наблюдается разогрев центральной части отливки, что, вероятно, связано с превышением скорости подвода тепла из внутренних массивных областей отливки к поверхности по сравнению со скоростью теплоотвода с поверхности отливки в форму.

На рис. 3 показаны двумерные температурные поля стальной отливки «Корпус подшипника» для различных моментов времени в плоскости XZ для сечения $Y = 24$. Как видно из рисунка, на начальном этапе кристаллизации происходит быстрое охлаждение пристеночных областей, а после разогрева формы до температур, близких к $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, происходит постепенный разогрев некоторых пристеночных областей в массивной части отливки.

На рис. 4 представлены двумерные поля усадочной пористости отливки «Корпус подшипника» для момента времени $t = 7650\text{ с}$ в плоскости XY для сечений $Z = 36$, $Z = 50$ и в плоскости XZ для сечений $Y = 27$, $Y = 30$. Ячейки синего цвета соответствуют области расположения усадочной раковины, ячейки коричневого цвета – областям закристаллизовавшегося металла. Как видно из рисунка, существует значительное количество областей с усадочными раковинами в различных сечениях. Усадка присутствует как в тонкой, так и в массивной частях отливки.

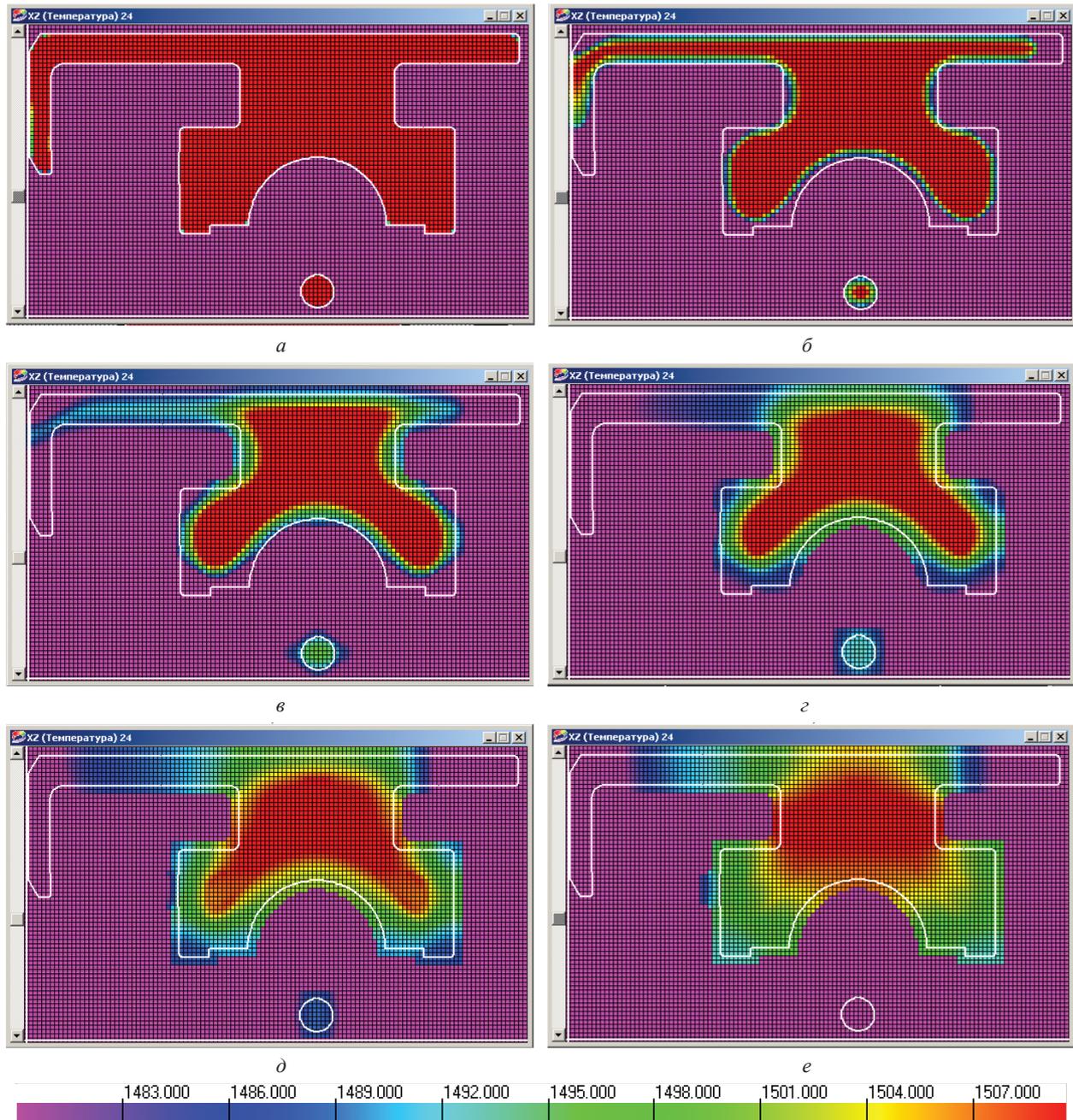


Рис. 3. Моделирование. Двумерные температурные поля отливки «Корпус подшипника» без прибыли (вариант А) для различных моментов времени в плоскости XZ ($Y = 24$): а – 85 с; б – 500; в – 1000; г – 2000; д – 3500; е – 7500 с

В результате моделирования распределения усадочных дефектов на изделии «Корпус подшипника» (вариант А) при подводе металла в массивную часть отливки было определено, что объем усадочных раковин составляет 2355 см³.

Результаты численного моделирования усадочных дефектов на объекте (вариант Б)

На рис. 5–7 представлены некоторые рассчитанные трехмерные и двумерные температурные поля отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени. Как видно из рисунков, наблюдается быстрое охлаждение прибылей и наиболее удаленных от питания зон отливки. Как и для варианта с подводом металла в массивную часть без прибыли, наблюдается формирование термического узла в центральной части отливки к моменту окончания кристаллизации.

Как видно из рис. 6, 7, существует значительный градиент температур в пристеночной области массивной части отливки в интервале времени течения расплава 4000–8000 с. Причем пристеночная область отливки начинает нагреваться за счет разогрева формы до температур, близких к 1500 °С.

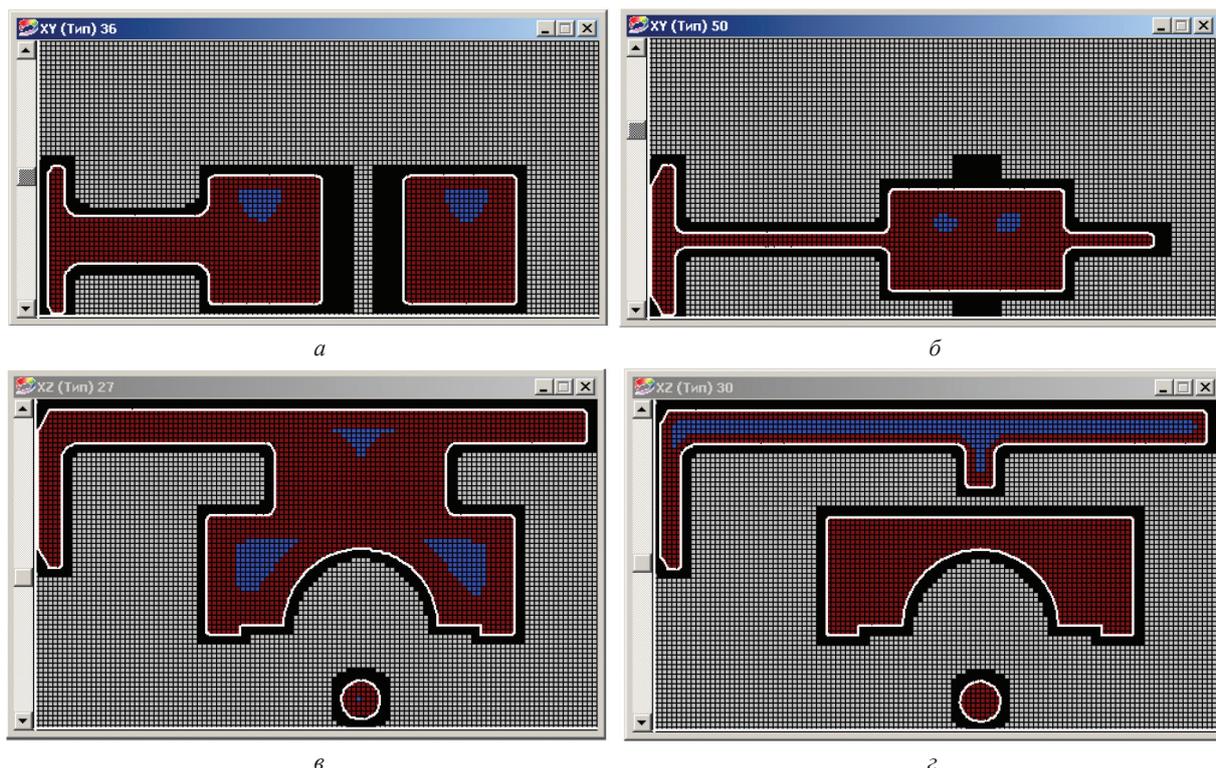


Рис. 4. Моделирование. Двумерные поля усадочных раковин в отливке «Корпус подшипника» без прибыли (вариант А) в плоскостях XY и XZ для различных сечений: a – плоскость XY , сечение $Z = 36$; b – плоскость XY , сечение $Z = 50$; c – плоскость XZ , сечение $Y = 27$; d – плоскость XZ , сечение $Y = 30$

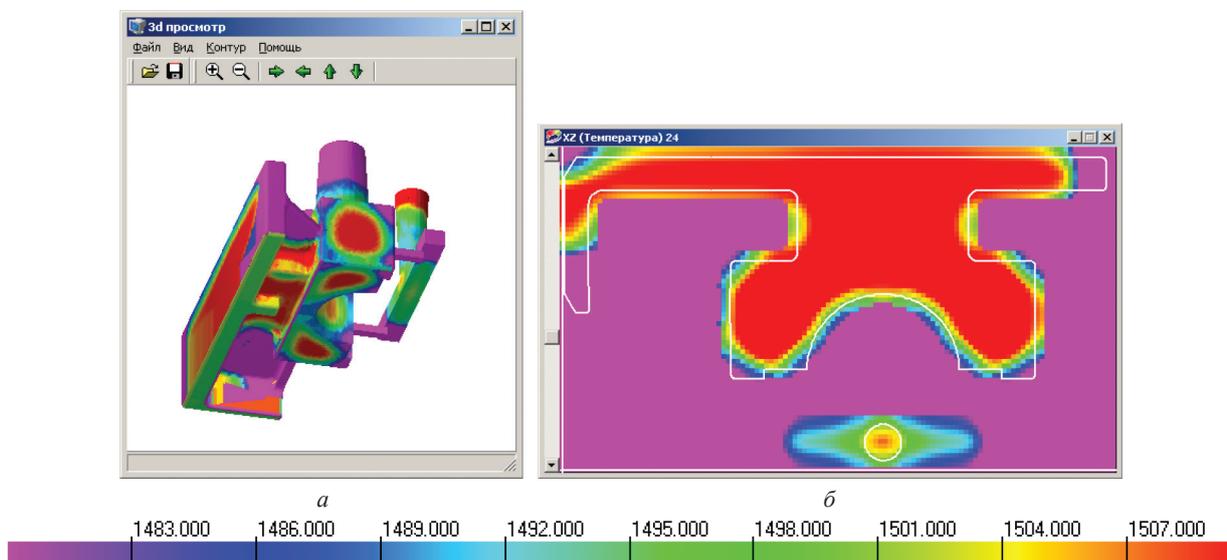


Рис. 5. Результаты моделирования: трехмерное (a) и двумерное (b) для XZ ($Y = 24$) температурные поля отливки «Корпус подшипника» (вариант Б) при подводе металла в массивную часть на момент времени 1000 с после начала заливки

На рис. 8 представлены двумерные поля усадочной пористости отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для момента времени $t = 8000$ с в плоскости XY для сечений $Z = 36$, $Z = 52$ и в плоскости XZ для сечений $Y = 28$, $Y = 22$. Ячейки синего цвета соответствуют области расположения усадки, ячейки коричневого цвета – областям закристаллизовавшегося металла. Как видно из рисунка, значительная часть усадочных раковин сконцентрирована в прибыли. Однако существуют области с усадочными раковинами и в отливке, в основном в массивной ее части.

На рис. 9 представлены для сравнения трехмерные изображения усадочных раковин в отливке «Корпус подшипника» без прибыли (вариант А) и с прибылью (вариант Б) при подводе металла в массивную

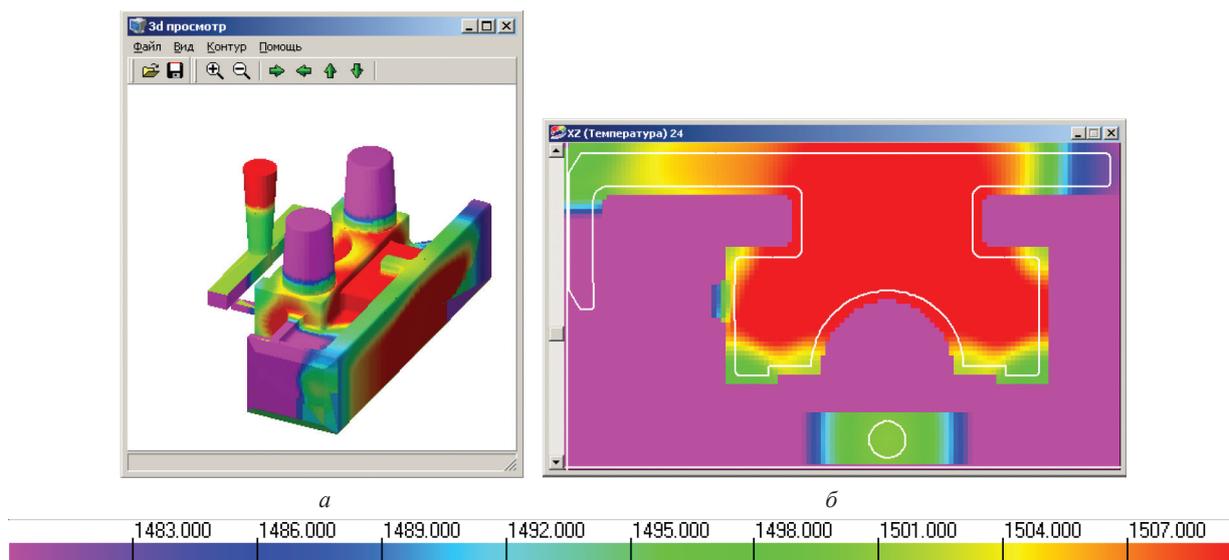


Рис. 6. Результаты моделирования: трехмерное (а) и двумерное (б) для XZ ($Y = 24$) температурные поля отливки «Корпус подшипника» (вариант Б) при подводе металла в массивную часть на момент времени 4000 с после начала заливки

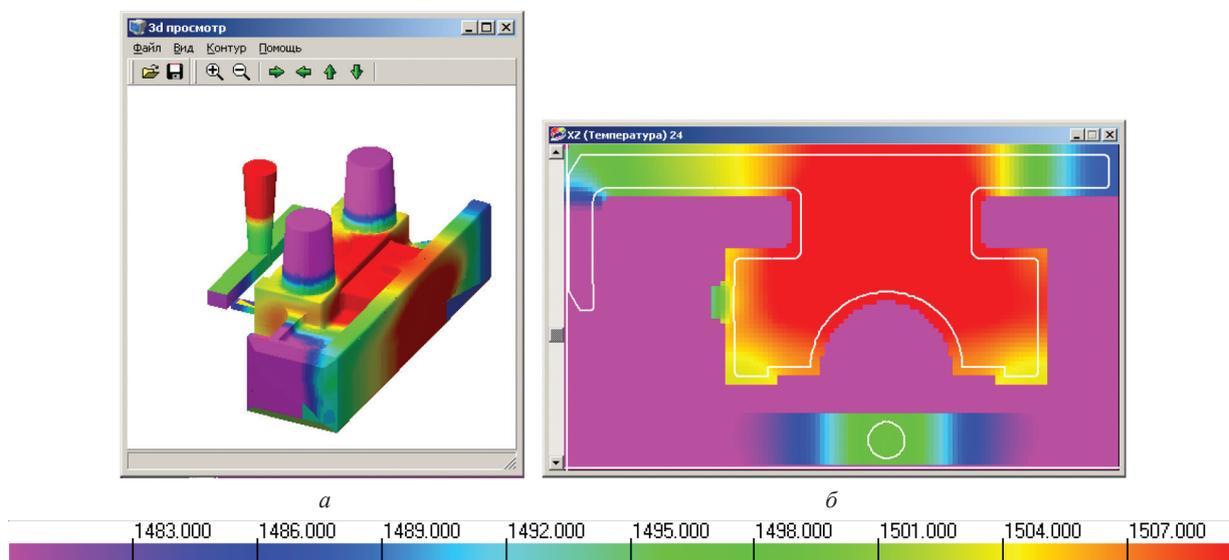


Рис. 7. Результаты моделирования: трехмерное (а) и двумерное (б) для XZ ($Y = 24$) температурные поля отливки «Корпус подшипника» (вариант Б) при подводе металла в массивную часть на момент времени 8000 с после начала заливки

часть. Как видно из рисунка, по сравнению с вариантом без прибыли (вариант А) количество и объем усадочных раковин значительно снижен (вариант Б) и усадочная пористость перешла в прибыль. Из тонкой части отливки усадочные раковины убраны, однако они сохраняются в основном под прибылями в массивной части, что говорит о недостаточных размерах прибылей.

Таким образом, проведено численное моделирование распределения усадочных дефектов на отливке «Корпус подшипника» без прибыли (вариант А) и с прибылью (вариант Б) при подводе металла в массивную часть отливки. Установлено, что отливка полностью заполняется металлом при заданных условиях, не образуя недоливов, причем на момент окончания заполнения отливки кристаллизуется нижняя область тонкой части.

В результате моделирования рассчитано, что существует значительное количество областей с усадочными раковинами в различных областях отливки объемом 2355 см^3 для варианта А. Усадка присутствует как в тонкой, так и в массивной частях отливки, что говорит о необходимости изменения места подвода металла или установки прибылей. Для варианта Б выявлено наличие усадочных раковин объемом 739 см^3 , что на 69% меньше, чем в аналогичном варианте без прибыли. Из тонкой части отливки варианта Б усадочные раковины убраны, что свидетельствует об эффективности работы прибылей.

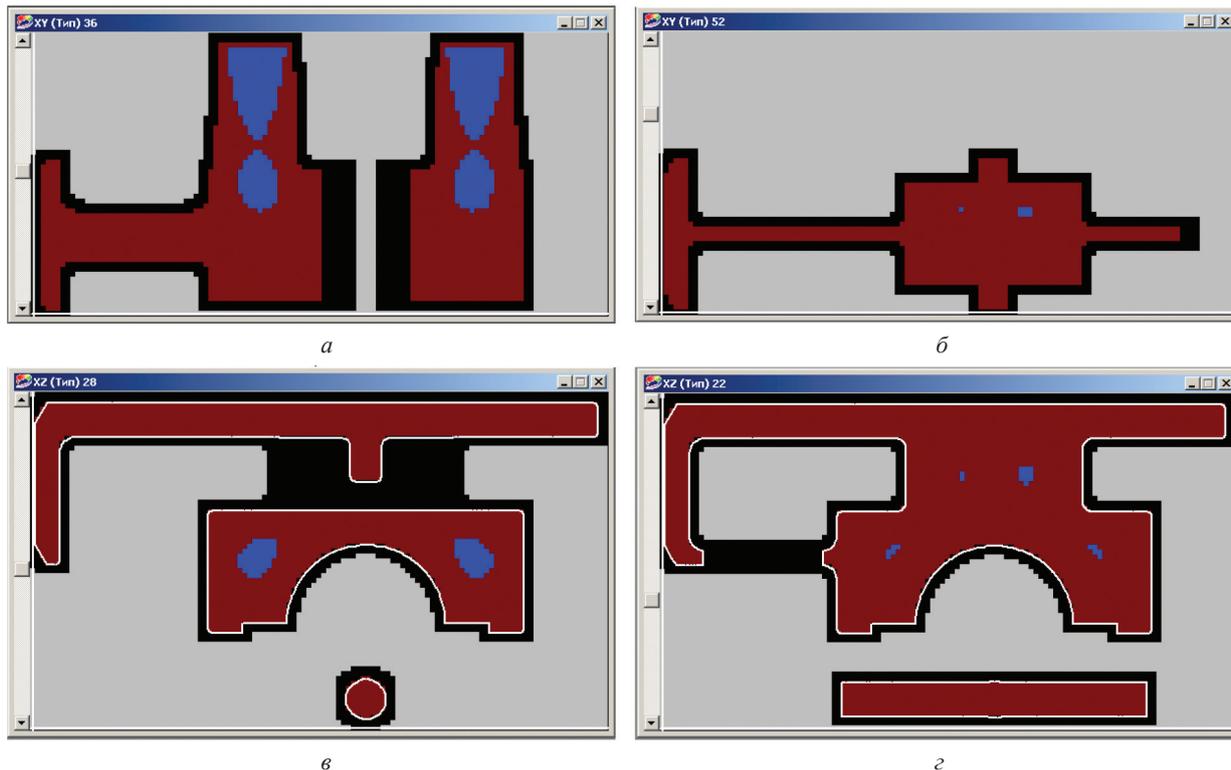


Рис. 8. Моделирование. Двумерное распределение усадочных раковин в отливке «Корпус подшипника» с прибылью (вариант Б) при подводе металла в массивную часть в плоскостях XY и XZ для различных сечений: a – плоскость XY , сечение $Z = 36$; $б$ – плоскость XY , сечение $Z = 52$; $в$ – плоскость XZ , сечение $Y = 28$; $г$ – плоскость XZ , сечение $Y = 22$

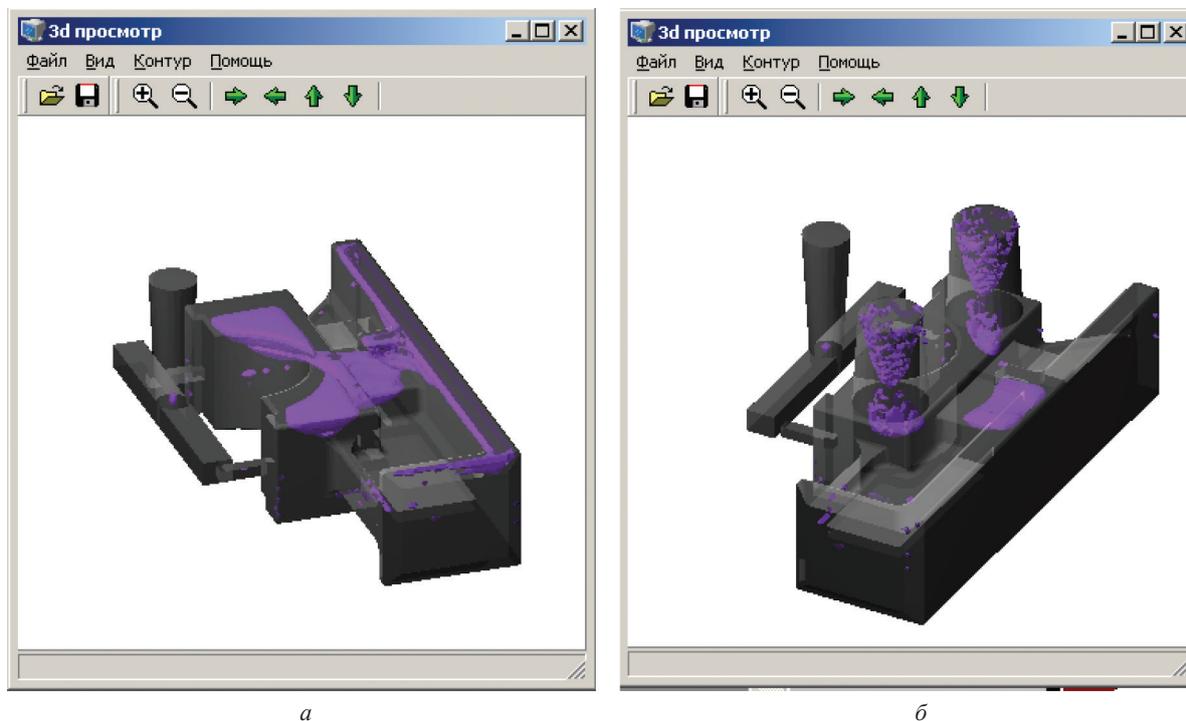


Рис. 9. Моделирование. Трехмерные изображения пониженной плотности (фиолетовый цвет) в отливке без прибыли (a – вариант А) и с прибылью ($б$ – вариант Б)

Приведенный пример использования ИТ-технологий показывает широкие возможности внедрения задач моделирования в практику разработки технологий изготовления отливок с многовариантным использованием прибылей в литейном производстве.

Литература

1. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. М.: МАШГИЗ, 1951. 448 с.
2. Тихомиров М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача / М. Д. Тихомиров // Литейное производство (приложение). 2001. № 12. С. 8–14.
3. Чичко А. Н. Автоматизация разработки технологических процессов литейного производства на основе КС «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, О. И. Чичко // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 28–29 окт. 2009 г., Минск, 2009. С. 252–254.
4. Чичко А. Н. Нейросетевые алгоритмы для выбора начального приближения литниковой системы отливок с целью их дальнейшей оптимизации / А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич, В. Ф. Соболев, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2009. № 4. С. 88–95.
5. Чичко А. Н. Программное обеспечение «Пронейролит» для прототипирования литейных технологий / А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич, В. Ф. Соболев, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2010. № 1. С. 76–82.
6. Чичко А. Н. Использование мультипроцессорной вычислительной системы СКИФ для решения некоторых задач металлургического производства / А. Н. Чичко, Д. М. Кукуй, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, Ю. В. Яцкевич, О. И. Чичко, О. А. Сачек, А. В. Демин // Информационные технологии программы союзного государства «Триада»: основные результаты и перспективы: сб. науч. тр. Минск, 2010. С. 159–168.
7. Чичко А. Н. «ПроЛит-1с» – программное обеспечение на основе мультипроцессорных технологий для решения задач литейного производства / А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, С. Г. Лихоузов, Ю. В. Яцкевич, О. И. Чичко, О. А. Сачек // Информационные технологии программы союзного государства «Триада»: основные результаты и перспективы: сб. науч. тр. Минск, 2010. С. 169–176.
8. Чичко А. Н. Математическое моделирование усадочных процессов стали на основе уравнений Навье–Стокса и Фурье–Кирхгофа / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2013. № 1. С. 70–78.
9. Чичко А. Н. Компьютерное моделирование пространственного распределения плотности кристаллизующейся стали в системе «отливка-прибыль» / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 46–55.
10. Лихоузов С. Г. О методе системного анализа литниковых систем на основе данных моделирования пространственных изображений температур расплавов / С. Г. Лихоузов, А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2015. № 1. С. 85–90.
11. Лихоузов С. Г. О путях системного анализа движения металла в литниковых системах на основе численных решений уравнений Навье–Стокса / С. Г. Лихоузов, А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, О. А. Сачек, Т. В. Матюшинец, О. И. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Литье и металлургия. 2014. № 1. С. 43–47.

References

1. Ryzhikov A. A. *Teoreticheskie osnovy litejnogo proizvodstva* [Theoretical foundations of foundry production]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1951. 448 p.
2. Tihomirov M. D. *Osnovy modelirovaniya litejnyh processov. Usadochnaya zadacha* [Fundamentals of modeling of foundry processes. Shrinkage task]. *Litejnoe proizvodstvo (prilozhenie) = Foundry production (appendix)*, 2001, no. 12, pp. 8–14.
3. Chichko A. N., Lihousov S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Chichko O. I. *Avtomatizacija razrabotki tehnologicheskikh processov litejnogo proizvodstva na osnove KS «ProLit-1s» pod superkomp'yuter SKIF* [Automation of works on creation of foundry technologies with help CS «ProLit-1s «under the supercomputer «SKIF»]. *Avtomaticheskij kontrol' i avtomatizacija proizvodstvennykh processov: materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. Konf = Automatic control and automation of production processes: materials International scientific-technical conference*. Minsk, 28–29 okt. 2009 g. Minsk, 2009, pp. 252–254.
4. Chichko A. N., Jatskevich Ju. V., Sobolev V. F., Matyushinets T. V., Chichko O. I. *Neyrosetevye algoritmy dlya vybora nachal'nogo priblizheniya litnikovoy sistemy otlivok s cel'yu ih dal'neyshey optimizacii* [Neuronet algorithms for choice of initial approximation of gating system of castings with the purpose of their further optimization]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2009, no. 4, pp. 88–95.
5. Chichko A. N., Jatskevich Ju. V., Sobolev V. F., Matyushinets T. V., Chichko O. I. *Programmnoe obespechenie «Proneuroolit» dlya prototipirovaniya litejnyh tehnologiy* [Software «Proneuroolit» for prototyping of foundry technologies]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 1, pp. 76–82.
6. Chichko A. N., Kukuj D. M., Lihousov S. G., Sobolev V. F., Jatskevich Ju. V., Chichko O. I., Sachek O. A., Demin A. V. *Ispol'zovanie mul'tiprocessornoj vychislitel'noy sistemy SKIF dlya resheniya nekotorykh zadach metallurgicheskogo proizvodstva* [Using multiprocessor computer SKIF to solve some tasks of metallurgical production]. *Informacionnye tehnologii programmy sojuznogo gosudarstva «Triada»: osnovnye rezul'taty i perspektivy = Information technology of the program of the Union State of «Triad»: the main results and prospects*. Collection of scientific papers. Minsk, 2010, pp. 159–168.
7. Chichko A. N., Sobolev V. F., Lihousov S. G., Jatskevich Ju. V., Chichko O. I., Sachek O. A. *«ProLit-1s» – programmnoe obespechenie na osnove mul'tiprocessornykh tehnologiy dlya resheniya zadach litejnogo proizvodstva* [«ProLit-1s» – software based on multi-processor technology for solving of task of foundry production]. *Informacionnye tehnologii programmy sojuznogo gosudarstva «Triada»: osnovnye rezul'taty i perspektivy = Information technology of the program of the Union State of «Triad»: the main results and prospects*. Collection of scientific papers. Minsk, 2010, pp. 169–176.
8. Chichko A. N., Lihousov S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I. *Matematicheskoe modelirovanie usadochnykh processov stali na osnove uravneniy Nav'e-Stoksa i Fur'e-Kirhgofa* [Mathematical modeling of shrink processes steel of the Navier-Stokes and Fourier-Kirchhoff equations]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 1, pp. 70–78.

9. Chichko A. N., Lihouзов S. G., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I. Komp'yuternoe modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya plotnosti kristallizuyushheysya stali v sisteme «otlivka-pribyl'» [Computer modeling of the spatial distribution of the crystallizing steel density in the system «casting-discard»]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 2, pp. 46–55.

10. Lihouзов S. G., Chichko A. N., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I. O metode sistemnogo analiza litnikovyh sistem na osnove dannyh modelirovaniya prostranstvennykh izobrazheniy temperatur rasplavov [About the method of gating systems analysis systems based on modeling data of spatial image temperatures of melt]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 85–90.

11. Lihouзов S. G., Chichko A. N., Sobolev V. F., Sachek O. A., Matyushinets T. V., Chichko O. I., Jatskevich Ju. V. O putyakh sistemnogo analiza dvizheniya metalla v litnikovyh sistemah na osnove chislennykh resheniya uravneniy uravneniya Nav'e-Stoksa [About the ways of the system analysis of metal movement in gating systems based on the numerical solutions of Navier-Stokes equations]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 43–47.