



УДК 621.74

Поступила 23.08.2013

А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ, О. А. САЧЕК, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ,  
В. Ф. СОБОЛЕВ, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

## КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ОТЛИВКЕ «КОРПУС ПОДШИПНИКА» С ПРИБЫЛЬЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОДВОДАХ МЕТАЛЛА

*Проведено клеточно-автоматное моделирование распределения усадочных дефектов в отливке «Корпус подшипника» с прибылью при подводе в различные части отливки. Установлено, что данная отливка полностью заполняется металлом, не образуя недоливов, для рассмотренных вариантов подвода металла. Установлено, что при подводе металла в массивную часть образуются раковины объемом до 739 см<sup>3</sup>, что на 69% меньше, чем в аналогичном варианте без прибыли (2355 см<sup>3</sup>).*

*Cellular automata simulation of the distribution of shrinkage defects in the casting of «The bearing housing» with a head during the metal flow to various parts of the casting was held. It is established that the casting is completely filled with metal, without forming runout, for the considered options for the metal flow. It is established that during the metal flow to the massive part, a bubbles up to 739 cm<sup>3</sup> were formed, which is 69% less than in the same form without a head (2,355 cm<sup>3</sup>).*

В БНТУ в течение 15 лет развиваются клеточно-автоматные методы расчета литейных и металлургических процессов. За это время достигнуты огромные успехи и созданы первые национальные компьютерные системы технологического назначения – ПроЛит-1, ПроЛит-1с, ПроНПС-1, АОМ-1, АОМ-2 и др. Клоны этих компьютерных систем расширяются, а версии модернизируются. Так, в настоящее время уже есть первые варианты компьютерных систем ПроВент-1 (процессы вентиляции в строительстве), ПроХим-1 (процессы протекания химических реакций в условиях перемешивания в промышленном оборудовании), АэроПро-1 (процессы обтекания воздушных потоков автомобиля), АэроПро-2 (процессы расчета аэродинамических сил при движении беспилотных летательных комплексов). Наша цель – импортозамещение научно-технического инструментария, используемого на различных промышленных предприятиях Республики Беларусь.

Целью данного сообщения является информирование научно-технической общественности о развитии новых методов расчета эволюции усадочных дефектов в промышленных отливках.

Используя методы, описанные в работах [1–4], было проведено клеточно-автоматное моделирование процесса изготовления отливки «Корпус подшипника» методом литья в форму.

На рис. 1 показана 3d-модель стальной отливки «Корпус подшипника» с литниковой системой с прибылью при подводе металла в массивную часть, которая была построена с помощью системы Solid Works и импортирована в систему «ПроЛит-1у». В качестве расплава была использована сталь 25Л ГОСТ 977-88, имеющая следующие характеристики:

- удельная теплоемкость  $c_1$  задается в табличном виде (табл. 1);

Таблица 1. Значения удельной теплоемкости в табличном виде

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

- коэффициент теплопроводности  $\lambda_1$  задается в табличном виде (табл. 2);

Таблица 2. Значения удельной теплопроводности в табличном виде

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

- плотность  $\rho = 7830 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- $T_{\text{лик}} = 1521 ^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{сол}} = 1487 ^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{зал}} = 1590 ^\circ\text{C}$ .

В качестве формы использовали песчаную смесь со следующими характеристиками:

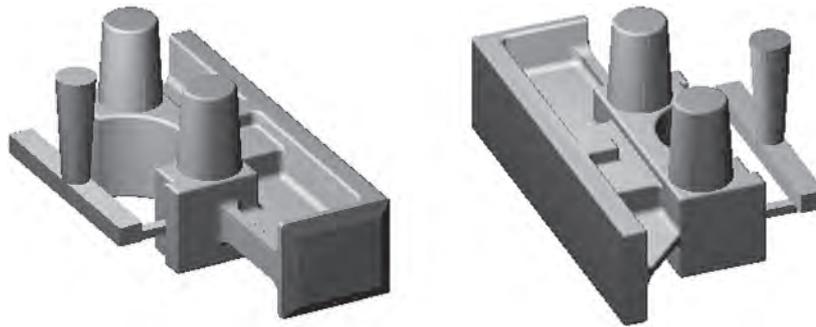


Рис. 1. 3d-модель стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть

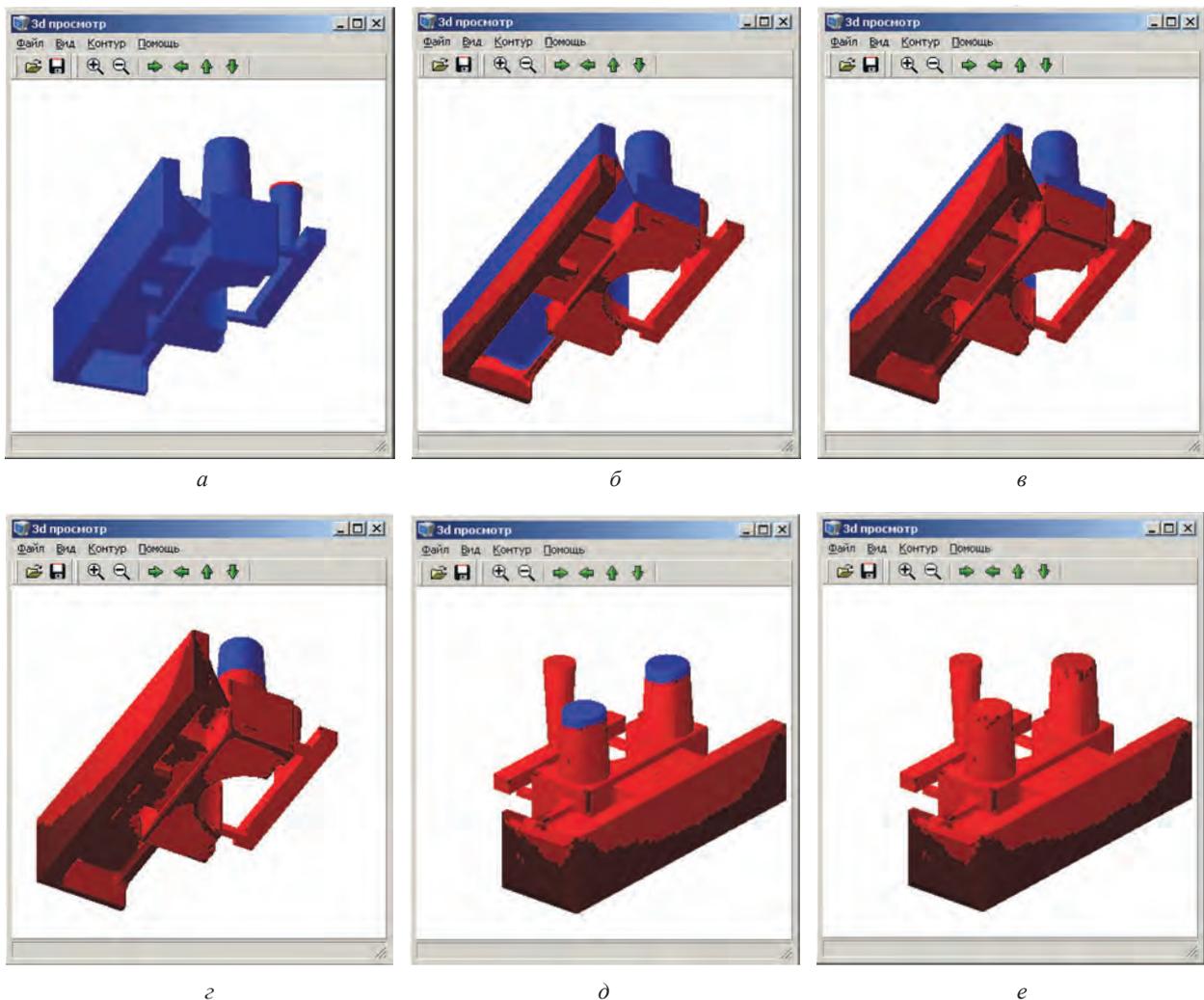


Рис. 2. Моделирование. Динамика заполнения стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени: *a* – 0; *б* – 30 с; *в* – 60; *г* – 90; *д* – 120; *е* – 145 с

- удельная теплоемкость  $c_2 = 120$  Дж/(кг·°C);
- коэффициент теплопроводности  $\lambda_2 = 0,8$  Вт/(м·°C);
- плотность  $\rho_2 = 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 2 представлена расчетная эволюция заполнения стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени. Ячейки красного цвета соответствуют ячейкам расплава, синего – ячейкам воздуха, коричневого – областям закристаллизо-

вавшегося металла. Как видно из рисунка, отливка полностью заполняется металлом, не образуя недоливов, причем на момент окончания заполнения отливки кристаллизуется нижняя область тонкой части.

На рис. 3 приведены температурные поля исследуемой отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени. Как видно из рисунка, наблюдается быстрое охлаждение прибылей и наиболее удаленных от питания зон отливки. Как и для варианта с подво-

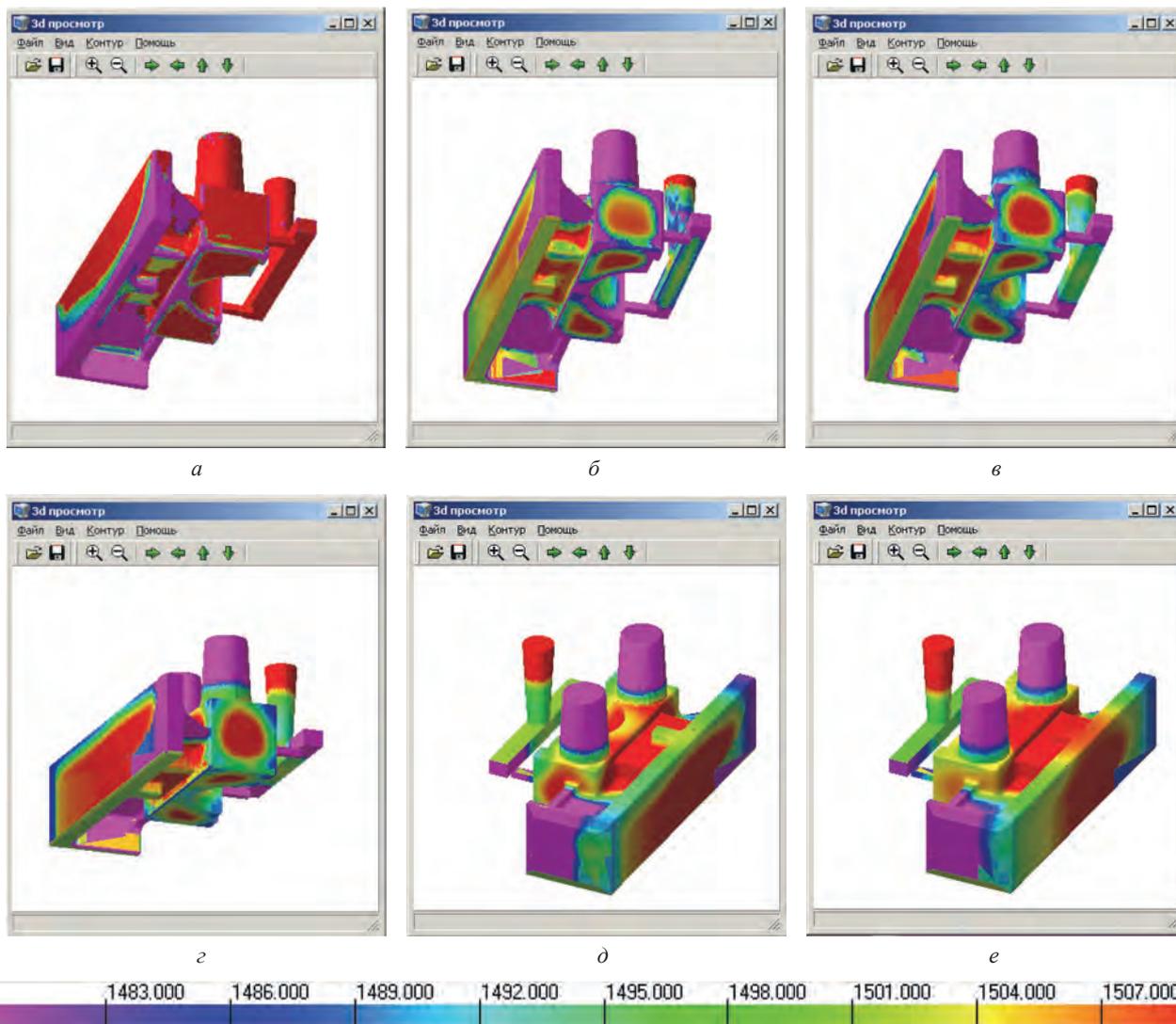


Рис. 3. Моделирование. Температурные поля отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени: а – 145 с; б – 500; в – 1000; з – 2000; д – 4000; е – 8050 с

дом металла в массивную часть без прибыли, наблюдается формирование термического узла в центральной части отливки к моменту окончания кристаллизации.

На рис. 4 представлены температурные поля стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для различных моментов времени в плоскости  $XZ$  для сечения  $Y = 24$ . Как видно из рисунка, существует значительный градиент температур в пристеночной области массивной части отливки на промежутке времени до 1000 с, после чего пристеночная область начинает нагреваться за счет разогрева формы до температур, близких к 1500 °С.

На рис. 5 приведены поля распределения усадочной пористости отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть для момента времени  $t = 8050$  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.

В результате моделирования распределения усадочных дефектов на изделии «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в массивную часть было выявлено образование усадочных раковин объемом 739 см<sup>3</sup>, что на 69% меньше, чем в аналогичном варианте без прибыли (2355 см<sup>3</sup>).

На рис. 6 показана динамика заполнения (расчетные данные) стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть для различных моментов времени. Как видно из рисунка, отливка полностью заполняется металлом, не



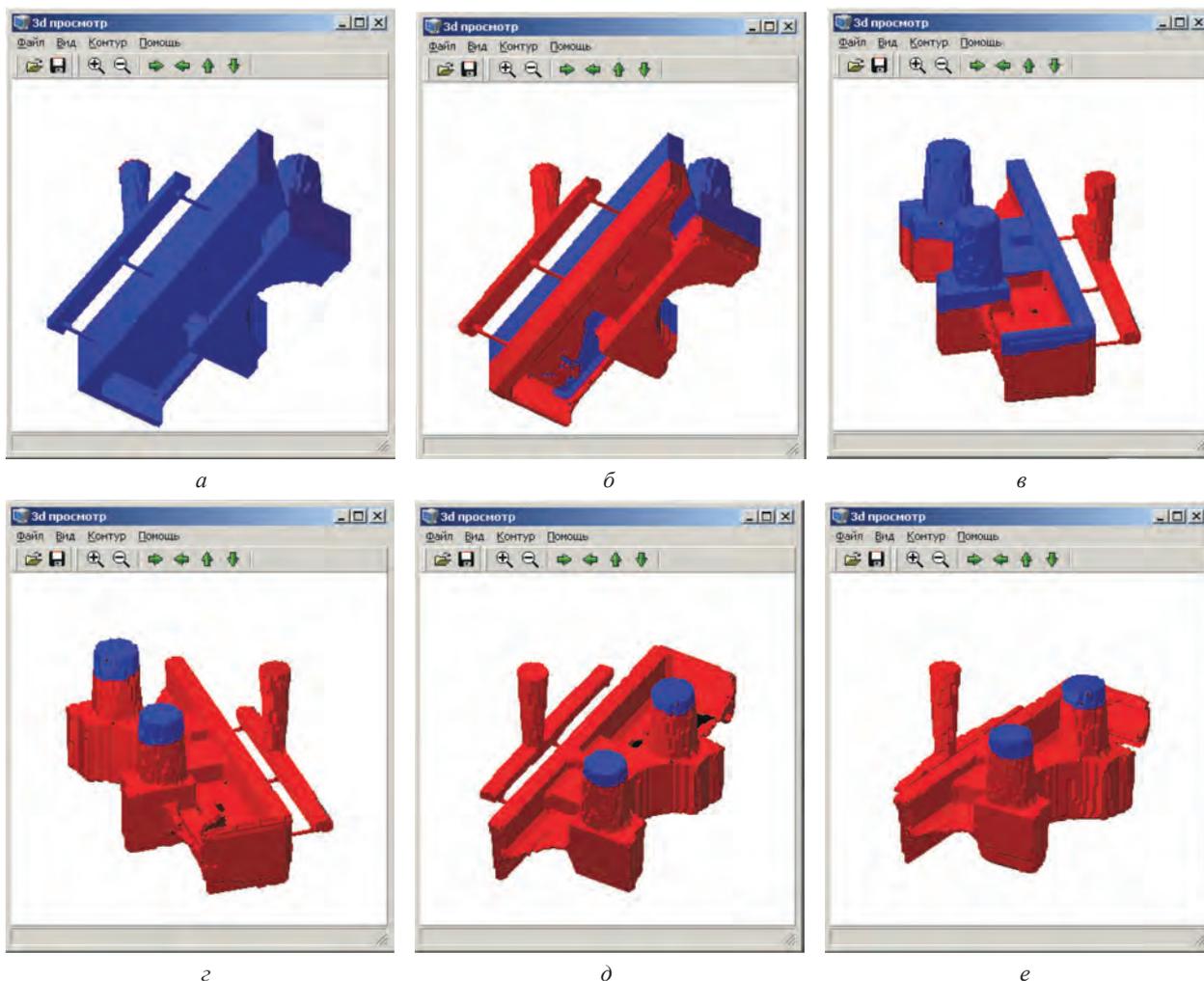


Рис. 6. Моделирование. Динамика заполнения стальной отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть для различных моментов времени: *a* – 0 с; *б* – 20; *в* – 40; *г* – 80; *д* – 120; *е* – 185 с

образуя недоливов, причем на момент окончания заполнения отливки не наблюдается существенных закристаллизованных частей отливки.

На рис. 7 представлены температурные поля исследуемой отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть для различных моментов времени. Как видно из рисунка, прибыли охлаждаются интенсивнее, чем массивная часть отливки и хоть и обеспечивают питание отливки в период времени до 4000 с в дальнейшем не выполняют своей функции, полностью кристаллизуясь и даже начинают играть роль холодильника, что хорошо видно по моменту времени 8050 с (см. рис. 3, *e*).

На рис. 8 представлены поля усадочной пористости отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть для момента времени  $t = 8250$  с в плоскости  $XY$  для сечений  $Z = 18$ ,  $Z = 34$  и в плоскости  $XZ$  для сечений  $Y = 26$ ,  $Y = 21$ . Как видно из рисунка, объем усадочных раковин заметно снижен по сравнению с аналогичным вариантом подвода металла без установки прибылей. Усадка отсутствует в тонкой

части отливки, но полностью не исключена из массивной части, что говорит о необходимости увеличения объема прибылей.

На рис. 9 показаны трехмерные изображения усадочных раковин в исследуемой отливке «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть с областями усадочной пористости (фиолетовый цвет). Как видно из рисунка, существуют два характерных места расположения усадочных раковин: под прибылями и в центральной части отливки.

В результате клеточно-автоматного моделирования распределения усадочных дефектов на изделии «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть отливки было выявлено появление усадочных раковин объемом  $825 \text{ см}^3$ , что на 71 % меньше, чем в аналогичном варианте без прибыли ( $2860 \text{ см}^3$ ), и на 12% больше, чем в варианте с аналогичной прибылью при подводе металла в массивную часть  $739 \text{ см}^3$ .

Таким образом, применение методов клеточно-автоматного моделирования к расчету процесса за-

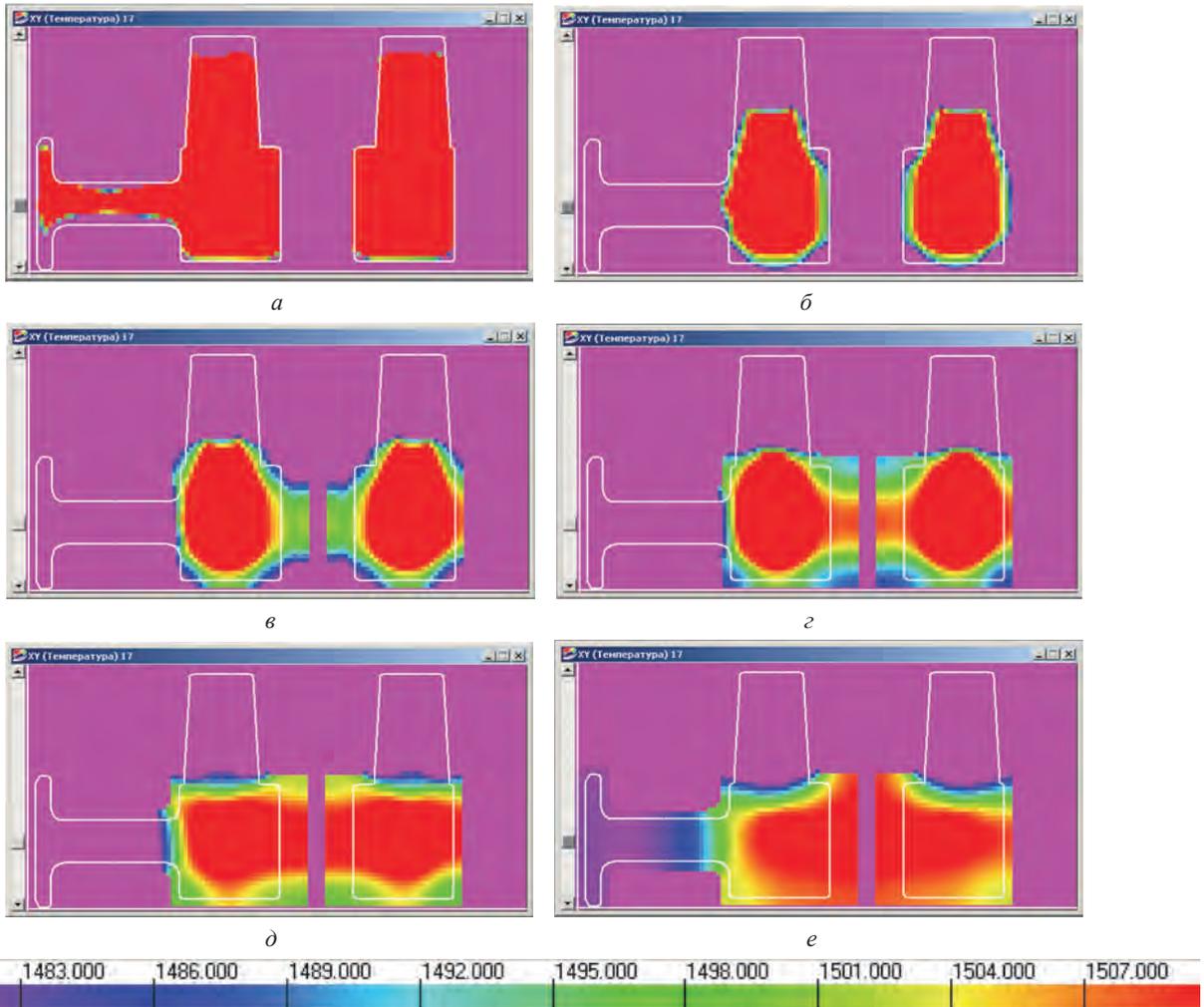


Рис. 7. Моделирование. Температурные поля отливки «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть для различных моментов времени: *a* – 185 с; *б* – 500; *в* – 1000; *г* – 2000; *д* – 4000; *е* – 8250 с

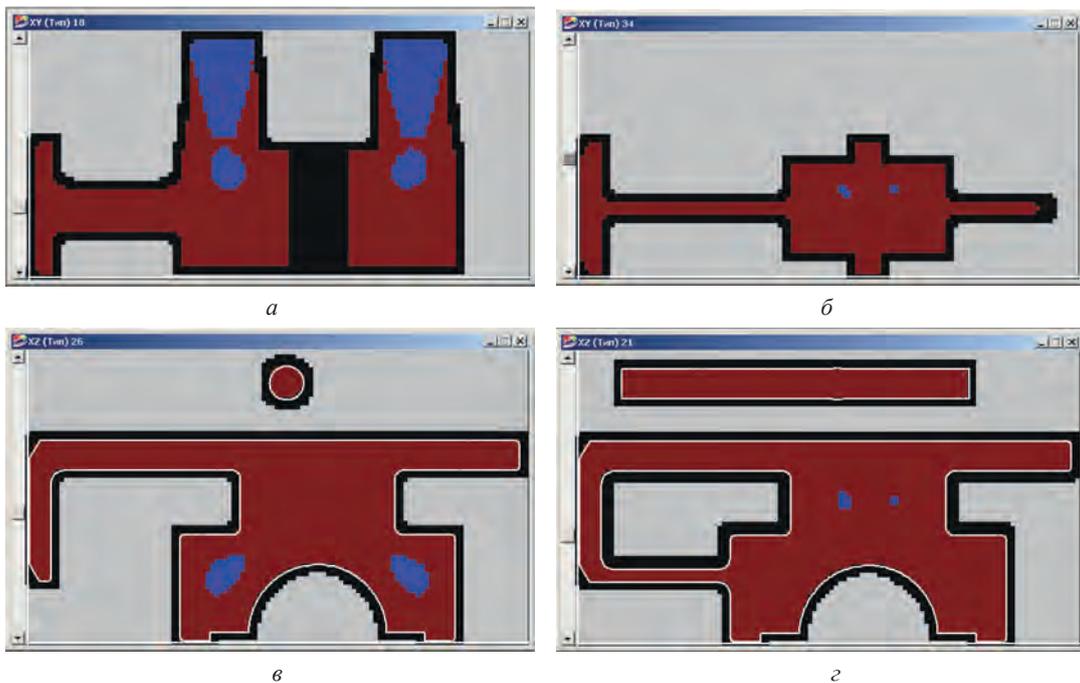


Рис. 8. Моделирование. Расположение областей усадочных раковин в отливке «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть в плоскостях XY и XZ для различных сечений: *a* – плоскость XY, сечение Z = 18; *б* – плоскость XY, сечение Z = 34; *в* – плоскость XZ, сечение Y = 26; *г* – плоскость XZ, сечение Y = 21

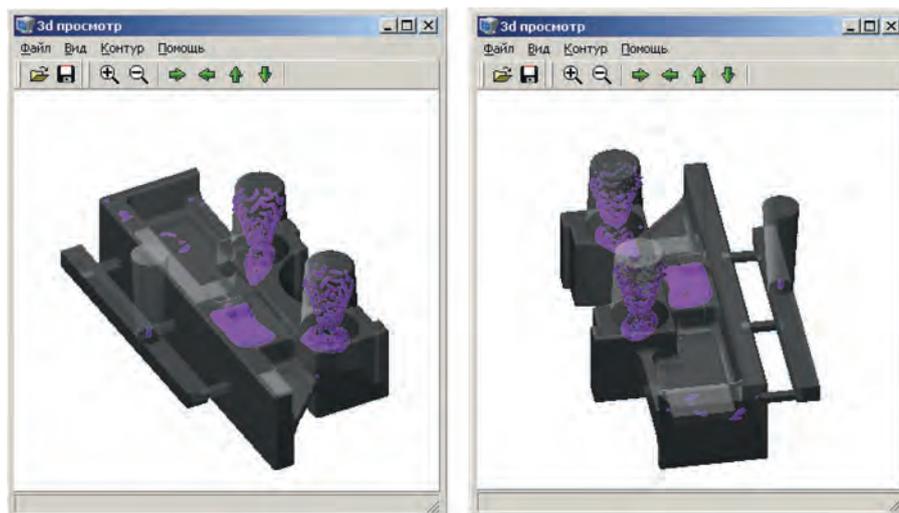


Рис. 9. Моделирование. Трехмерные изображения усадочных раковин (фиолетовый цвет) в исследуемой отливке «Корпус подшипника» с прибылью при подводе металла в тонкую часть

твердевания металла показывает широкие возможности детализации распределения усадочных пустот при заданных пространственно геометрических раз-

мерах литников. Эти методы в ближайшие годы станут мощнейшим инженерным инструментом технологов, разрабатывающих литейные технологии.

### Литература

1. Чичко А. Н., Матюшинец Т. В., Марков Л. В. и др. Модели и алгоритмы для САПР технологического процесса изготовления отливок, ориентированного под суперкомпьютер СКИФ // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 94-101.
2. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Чичко О. И. Программное обеспечение «ПроЛит-1с» для моделирования литейных процессов на кластерных мультипроцессорных технологиях суперкомпьютера СКИФ // *Литье и металлургия*. 2007. № 3. С. 76–80.
3. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф. и др. Программное обеспечение под суперкомпьютер «СКИФ» «ПроЛит-1с» и «ПроНПС-1с» для литейного и металлургического производств // *Литье и металлургия*. 2008. № 3. С. 131-139.
4. Моделирование пространственного распределения скоростей металла в формах с различным типом связи литниковых каналов в САЕ «ПроЛит-1» / А.Н. Чичко [и др.] // *Литье и металлургия*. 2012. № 1. С. 71–75.