



УДК 621.74

Поступила 08.04.2013

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙСЯ СТАЛИ В СИСТЕМЕ «ОТЛИВКА–ПРИБЫЛЬ»

Проведено моделирование усадочных процессов в стальной отливке с прибылью для различных режимов мгновенной заливки стали при изотропном отводе тепла с разной начальной температурой металла. Выполнены расчеты статистического распределения значений температур и плотности для различных моментов времени в кристаллизующейся отливке с прибылью и сравнительный анализ с распределениями плотности в отливке без прибыли для аналогичных температурных режимов.

The modeling of the shrinkage processes in the steel casting with a head for the different modes of instant steel casting for isotropic heat dissipation with different initial temperature of the metal was held. The calculations of the statistical distribution of temperatures and densities for various moments of time in the crystallizing casting with a head and comparative analysis with the density distributions in the cast without a head for similar temperature conditions are made.

В [1] была рассмотрена математическая модель, учитывающая законы движения жидкости в области, ограниченной кристаллизующимся металлом, и проведено компьютерное моделирование усадочных процессов в стальной отливке без прибылей. Дальнейшее развитие этой методологии применено к отливке с прибылью. Целью данной статьи является моделирование усадочных процессов и расчет статистического распределения температур и пористости в стальной отливке с прибылью для различных режимов мгновенной заливки стали при изотропном отводе тепла с двумя начальными условиями заливки металла.

В качестве металла 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%; $T_{лик} = 1521$ °C; $T_{сол} = 1487$ °C; $T_{зал} = 1550$ °C (вариант В) и $T_{зал} = 1650$ °C (вариант Г). В качестве формы использовали песчаную смесь со следующими характеристиками: начальная температура $T = 20$ °C; удельная теплоемкость $c_2 = 120$ Дж/(кг·°C); коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0,8$ Вт/(м·°C); плотность $\rho_2 = 1600$ кг/м³. В качестве модельной системы использовали 3d-модель, которая построена с помощью системы Solid Works. На рис. 1 показана 3d-модель исследуемой отливки.

На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования по динамике заполнения (расчетные дан-

ные) исследуемой отливки для вариантов В и Г соответственно. Как видно из рисунков, в процессе заливки происходит образование усадочной раковины в верхней части отливки. Причем отливка в варианте В кристаллизуется быстрее, так как момент времени, соответствующий полной кристаллизации металла для варианта В, составляет 210 с, для варианта Г – 310 с.

На рис. 4, 5 показаны температурные поля исследуемой отливки для вариантов В и Г соответственно. Как видно из рисунков, центральная

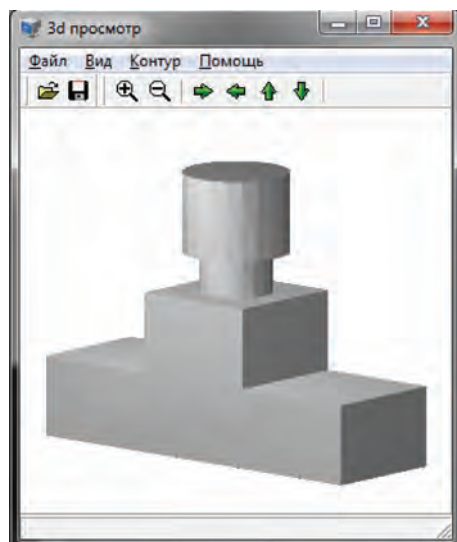


Рис. 1. Трехмерная модель отливки

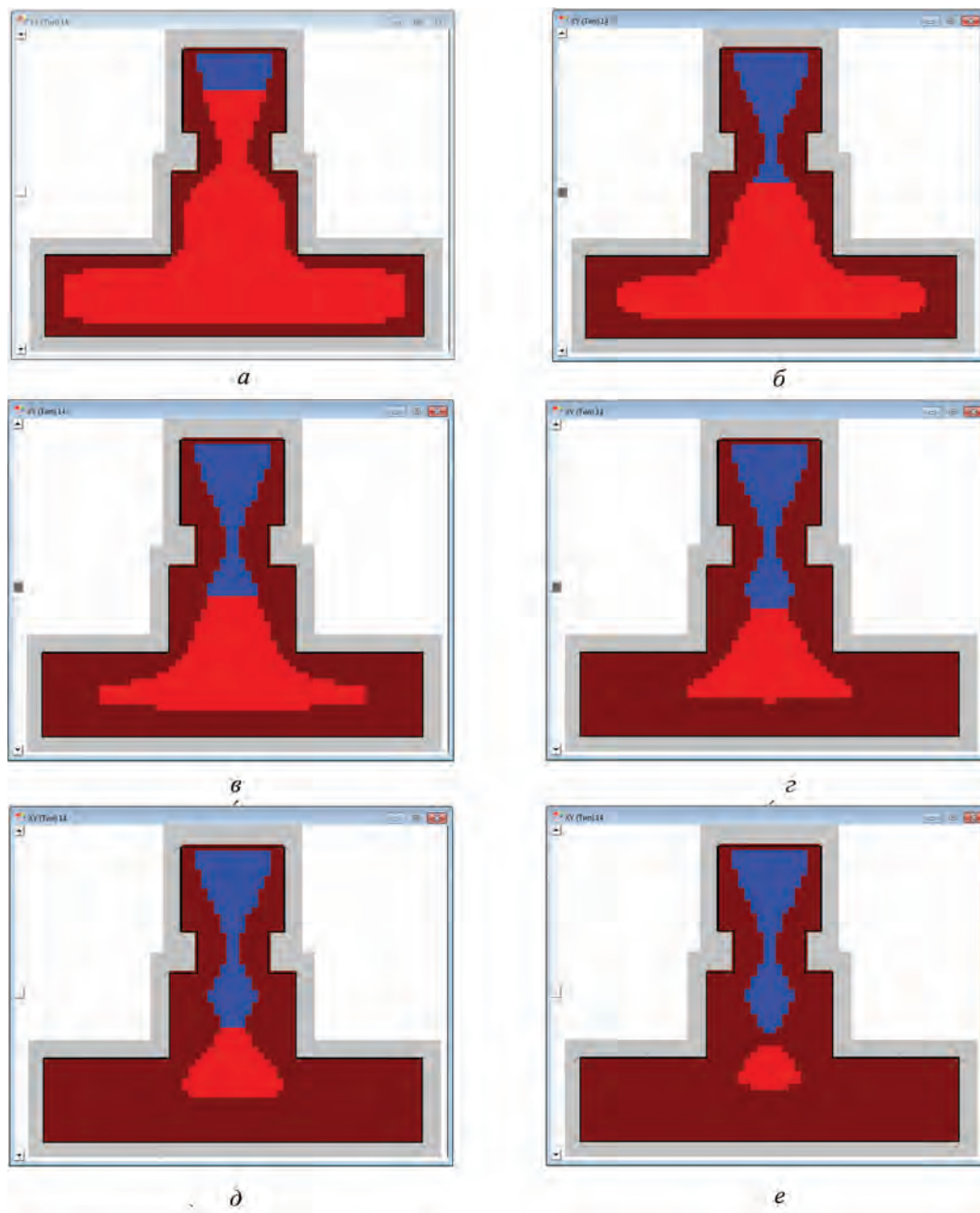


Рис. 2. Моделирование. Динамика заполнения исследуемой отливки (вариант *B*) для различных моментов времени: *a* – 30 с; *б* – 60; *в* – 90; *г* – 120; *д* – 150; *е* – 180 с

часть отливки является наиболее разогретой. Температуры граничных ячеек формы разогреты до больших значений для варианта *Г* по сравнению с вариантом *B*, что препятствует дальнейшему теплоотводу и обеспечивает более плавный ход кристаллизации для варианта *Г*.

На рис. 6 показаны трехмерные изображения усадочной раковины в верхней части отливки для двух вариантов *B* и *Г*, полученные с использованием численного метода компьютерного моделирования. Как видно из рисунков, усадочные раковины расположены в верхней части отливки, однако гео-

метрические формы дефектов отличаются, что связано с различным характером кристаллизации для рассматриваемых вариантов.

На рис. 7 приведены поля плотностей исследуемой отливки для двух вариантов *B* и *Г*. Как видно из рисунка, в наружном слое отливки с начальной температурой 1550 °С образуется слой с пониженной плотностью в результате наличия высокой скорости кристаллизации, связанной с большой разностью температур между температурами отливки и формы. В то же время для варианта *Г* (начальная температура $T = 1650$ °С) такого эффекта

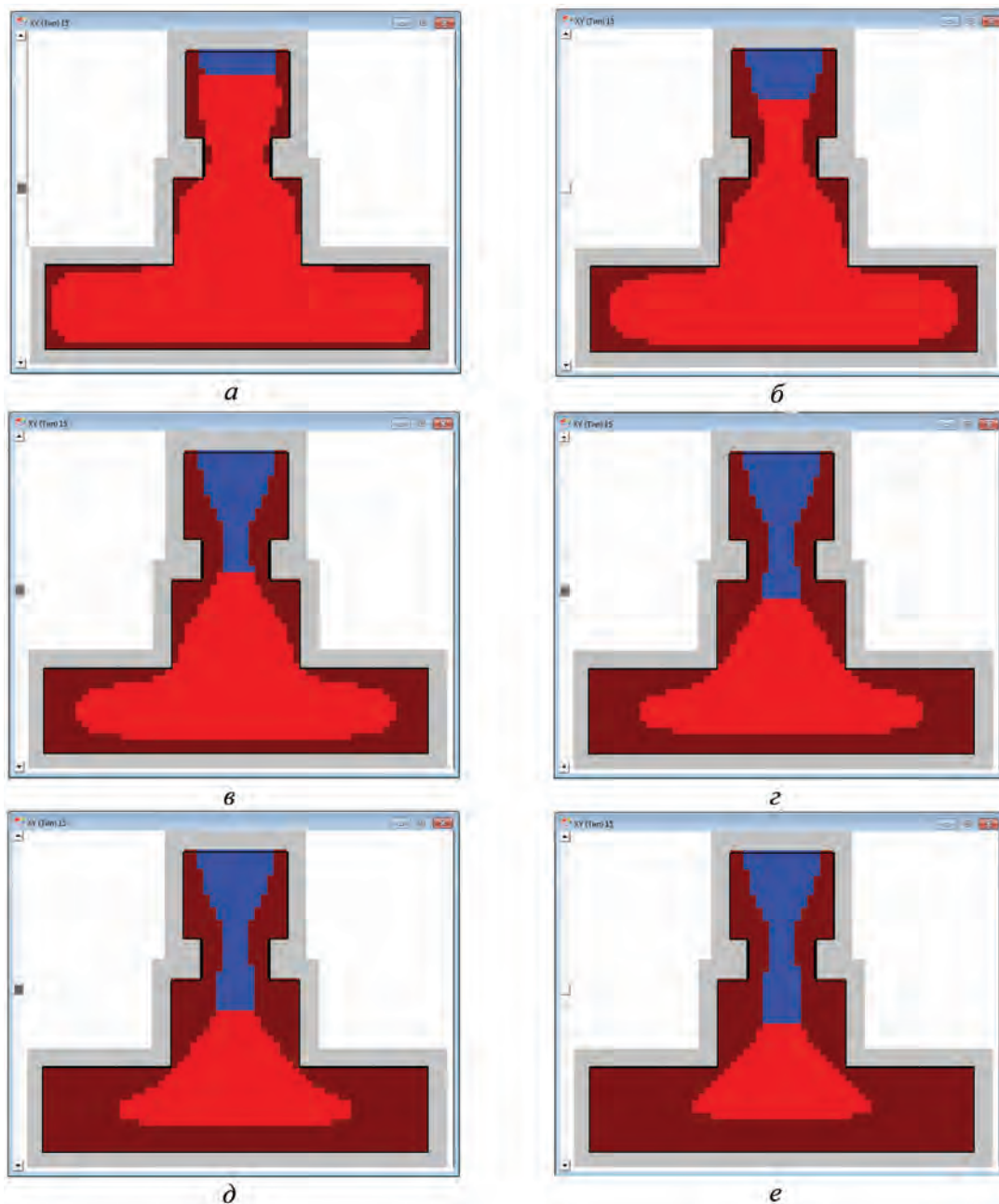


Рис. 3. Моделирование. Динамика заполнения исследуемой отливки (вариант Г) для различных моментов времени: а – 30 с; б – 60; в – 90; г – 120; д – 150; е – 180 с

не наблюдается. Это связано с тем, что форма успевает прогреться к моменту начала кристаллизации и разность температур между отливкой и формой значительно ниже, чем для варианта В.

В результате моделирования кристаллизации отливки с прибылью с двумя вариантами начальной температуры металла 1550 и 1650 °С было установлено, что выбранные прибыли недостаточного размера, в результате чего в теле отливки возникает усадочная раковина, размер которой меньше, чем в варианте отливки без прибыли. Поэтому размер прибыли необходимо увеличивать.

На следующем этапе были проведены расчет статистического распределения плотности в кристаллизующейся отливке с прибылью (варианты В и Г) и сравнительный анализ для отливки, рассчитанной без прибыли (варианты А и Б [1]). Для анализа значений температур были выбраны шесть характерных точек, соответствующих различным областям отливки (рис. 8), каждая точка проходит разные режимы теплоотвода. Точка 1 соответствует углу отливки, точка 2 – внешнему ребру, точка 3 – поверхности, точка 4 – внутреннему ребру, точки 5 и 6 находятся в центре отливки на разных уровнях.

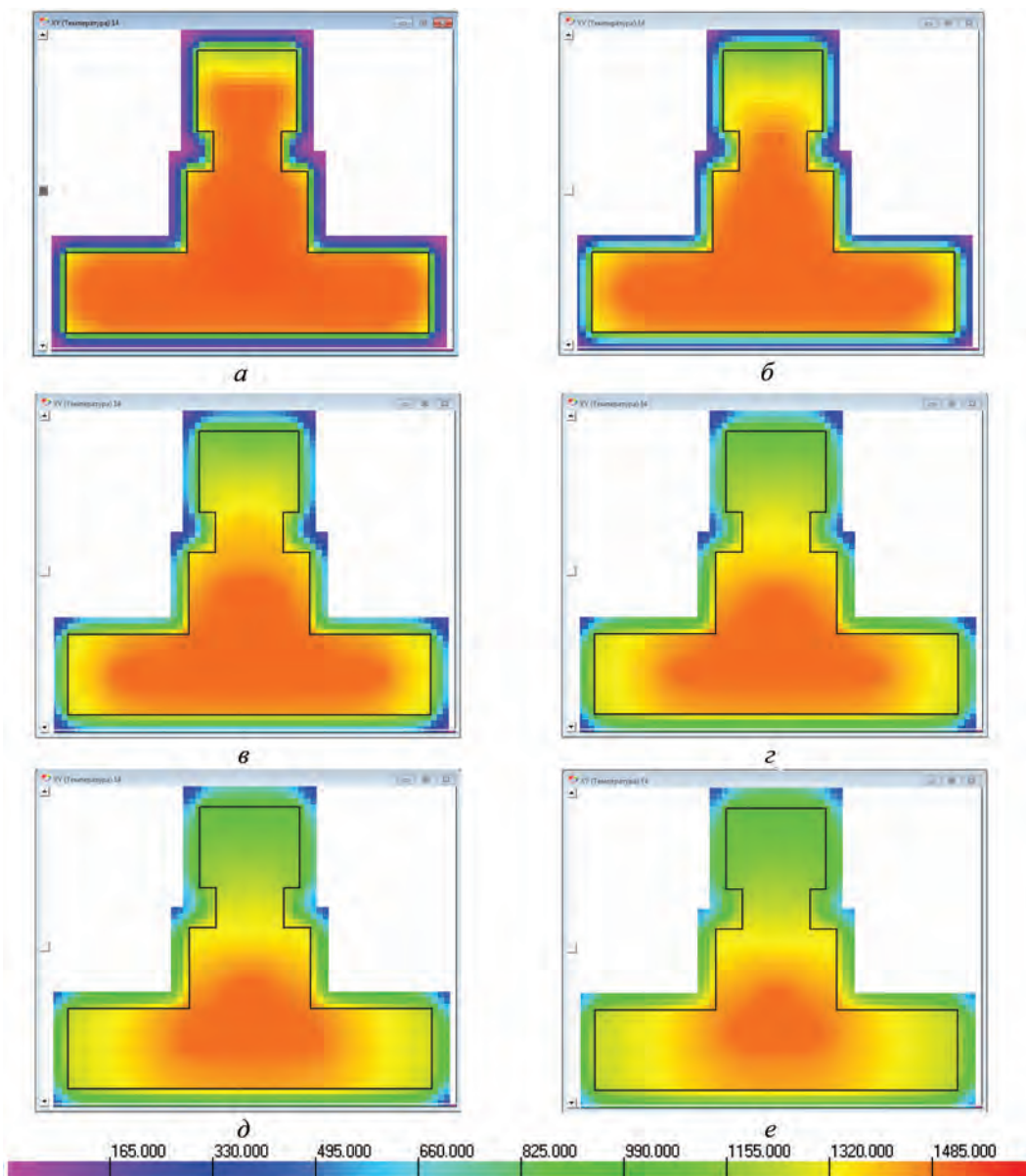


Рис. 4. Моделирование. Температурные поля исследуемой отливки (вариант *B*) для различных моментов времени: *a* – 30; *б* – 60; *в* – 90; *г* – 120; *д* – 150; *е* – 180 с

На рис. 9 показаны нормированные гистограммы распределения значений температур для исследуемой отливки для моментов времени $t = 30, 60$ и 90 с для вариантов *A* и *B* (начальная температура металла $T = 1550$ °C). Как видно из рис. 9, *б*, в момент времени $t = 60$ с для варианта *B* в отличие от варианта *A* существует доля ячеек с температурой, большей 1515 °C. Для момента времени $t = 90$ с наблюдается большее число ячеек для каждого температурного диапазона. В целом для всех моментов времени тенденции распределения значений похожи, но наблюдается смещение распределений вправо для варианта *B*, что говорит о влиянии прибыли на уменьшение скорости охлаждения отливки при начальной температуре 1550 °C.

На рис. 10 представлены нормированные гистограммы распределения значений температур для исследуемой отливки для моментов времени $t = 30, 60$ и 90 с для вариантов *B* и *Г* (начальная температура металла $T = 1650$ °C). Как видно из рисунка, распределения температур имеют общий характер для вариантов *B* и *Г*. Это говорит о том, что при начальной температуре 1650 °C не наблюдается существенного влияния прибыли на ход кристаллизации отливки.

На рис. 11, 12 показаны гистограммы распределения нормированных значений плотностей для исследуемой отливки для вариантов *A* и *B* (начальная температура металла $T = 1550$ °C) и для вариантов *B* и *Г* (начальная температура

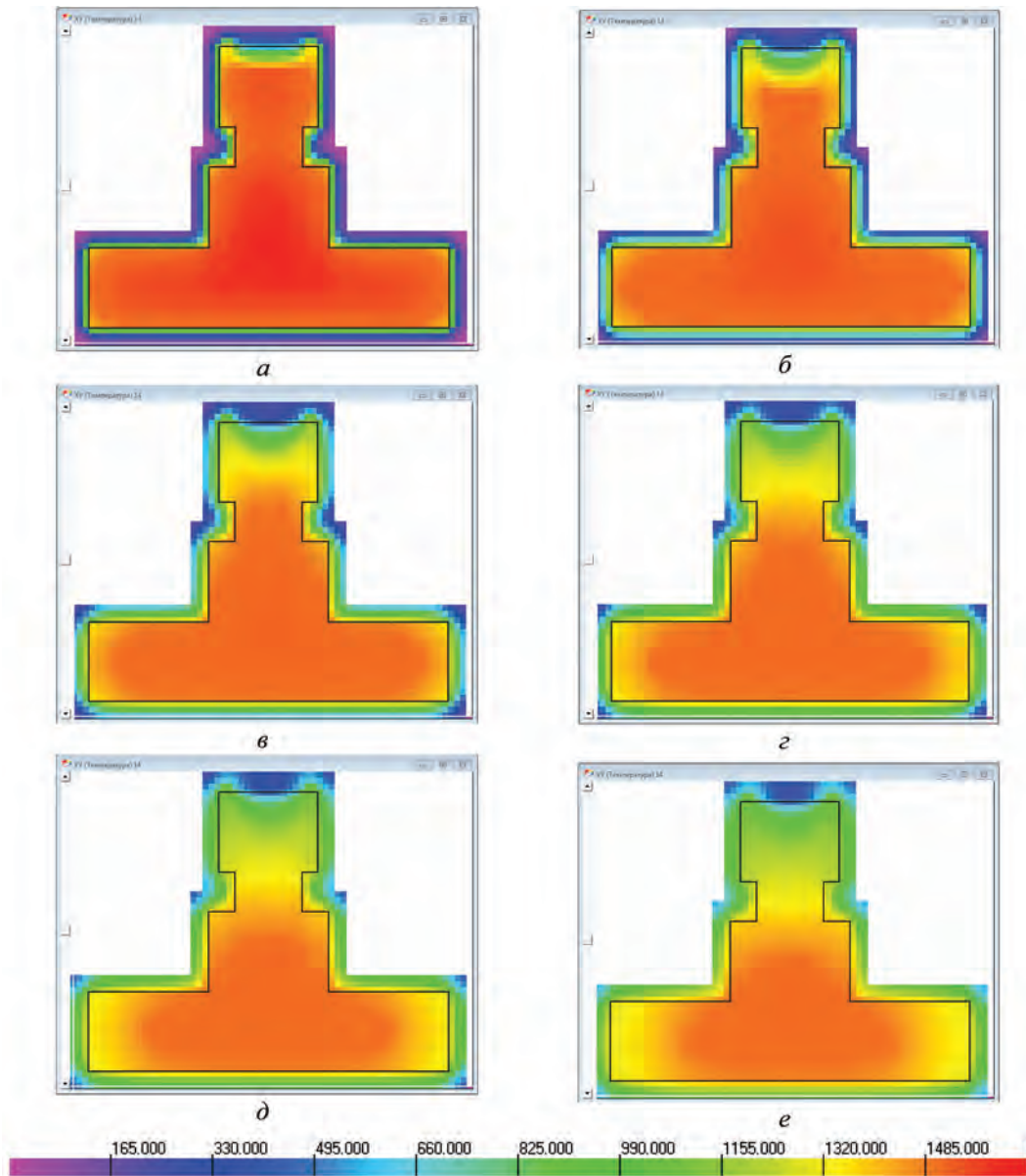


Рис. 5. Моделирование. Температурные поля исследуемой отливки (вариант Г) для различных моментов времени: *a* – 30; *б* – 60; *в* – 90; *г* – 120; *д* – 150; *e* – 180 с

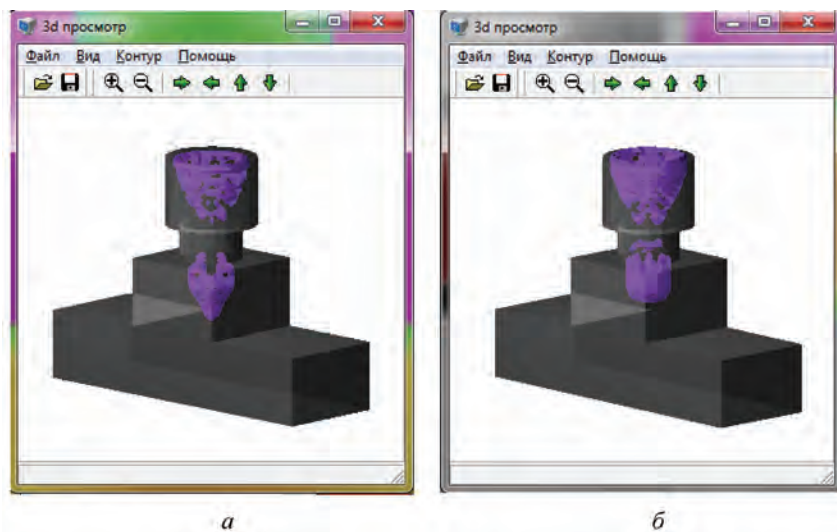


Рис. 6. Трехмерные изображения усадочной раковины в исследуемой отливке для двух вариантов: *a* – вариант В; *б* – вариант Г

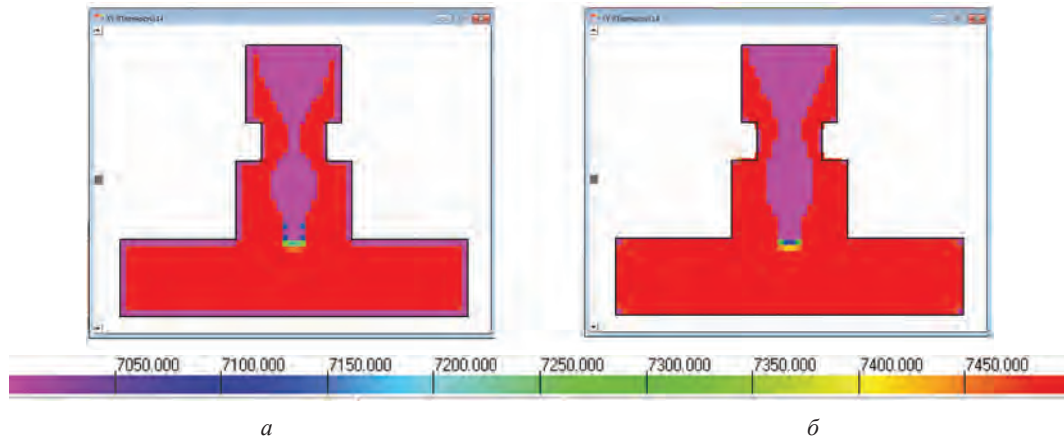


Рис. 7. Моделирование. Поля плотностей исследуемой отливки для двух вариантов: *а* – вариант *В*; *б* – вариант *Г*

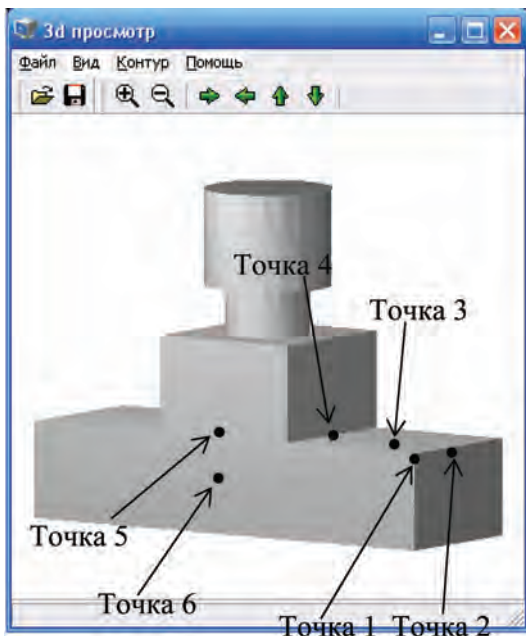


Рис. 8. Изображение отливки с выделенными точками для анализа температур

металла $T = 1650$ °С) соответственно. Как видно из рис. 11, *а*, 12, *а*, доли ячеек с большими значениями плотностей > 7125 кг/м³ почти одинаковы для сравниваемых вариантов. Тогда как распределения значений для плотностей < 7125 кг/м³ имеют различный характер для рассматриваемых вариантов. Так, в случае с начальной температурой $T = 1550$ °С доля ячеек с плотностью, значения которой находятся в диапазоне $0-375$ кг/м³, для отливки без прибыли (вариант *А*) составляет 0,038 о. е., для отливки с прибылью (вариант *В*) – 0,012 о. е. (рис. 11, *а*), что говорит о снижении объема усадочной раковины более чем в 3 раза за счет ее вытеснения в область прибыли. Для начальной температуры металла $T = 1650$ °С доля ячеек, значения плотности которых находятся в диапазоне $0-375$ кг/м³, для отливки без прибыли (вариант *Б*)

составляет 0,052 о. е., для отливки с прибылью (вариант *Г*) – 0,012 о. е., что говорит о снижении объема усадочной раковины более чем в 4 раза за счет ее вытеснения в область прибыли. Как видно из рис. 11, *в*, 12, *в*, усадочная пористость (диапазон плотностей 375–7125 кг/м³) в случаях отливок с прибылью (варианты *В* и *Г*) ниже, чем для отливок без пористости (варианты *А* и *Б*).

Таким образом, были проведены расчеты статистического распределения плотности в кристаллизующейся отливке с прибылью (варианты *В* и *Г*) и сравнительный анализ с распределениями плотности в отливке без прибыли (варианты *А* и *Б*). Показано, что объем усадочной раковины снижается более чем в 3 раза за счет ее вытеснения в область прибыли, однако для полного устранения раковины из тела отливки размер прибыли должен быть увеличен.

Таким образом, проведено моделирование усадочных процессов в стальной отливке с прибылью для различных режимов мгновенной заливки стали при изотропном отводе тепла с разной начальной температурой металла $T = 1550, 1650$ °С. Показано, что выбранные прибыли недостаточного размера, в результате чего в теле отливки возникает усадочная раковина, размер которой меньше, чем в варианте отливки без прибыли.

Проведены расчеты статистического распределения плотности в кристаллизующейся отливке с прибылью для различных режимов мгновенной заливки стали при изотропном отводе тепла с разной начальной температурой металла $T = 1550, 1650$ °С и сравнительный анализ с распределениями плотности в отливке без прибыли для аналогичных температурных режимов. Показано, что объем усадочной раковины снижается более чем в 3 раза за счет ее вытеснения в область прибыли, однако для полного устранения раковины из тела отливки размер прибыли должен быть увеличен.

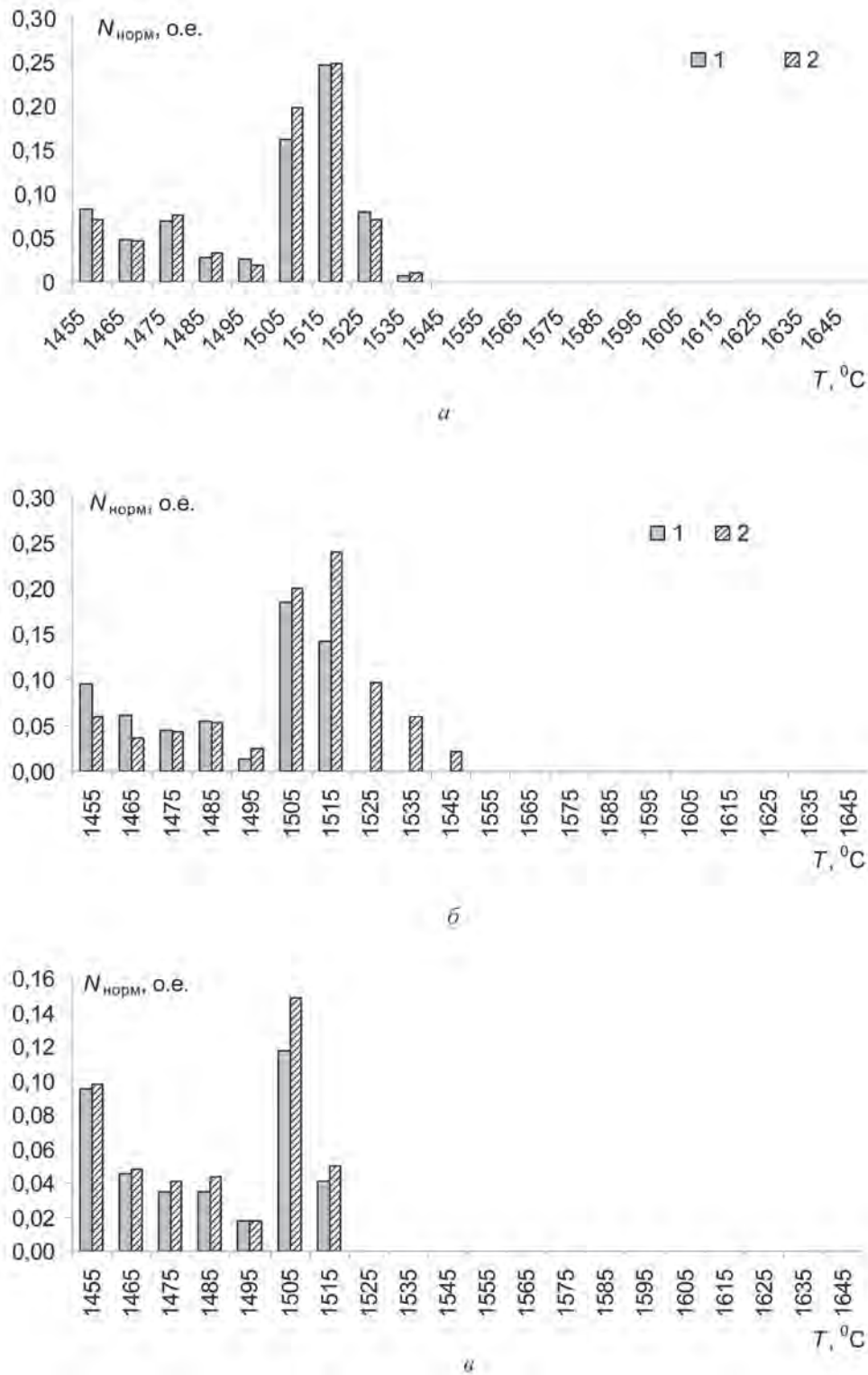
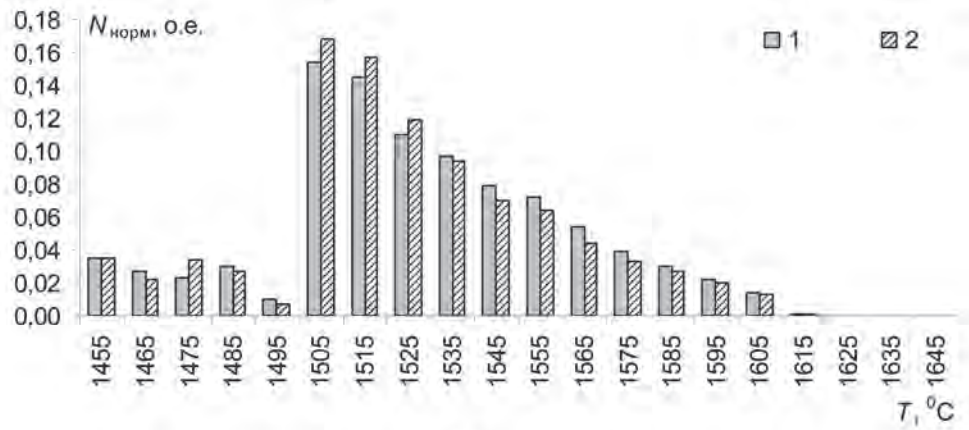
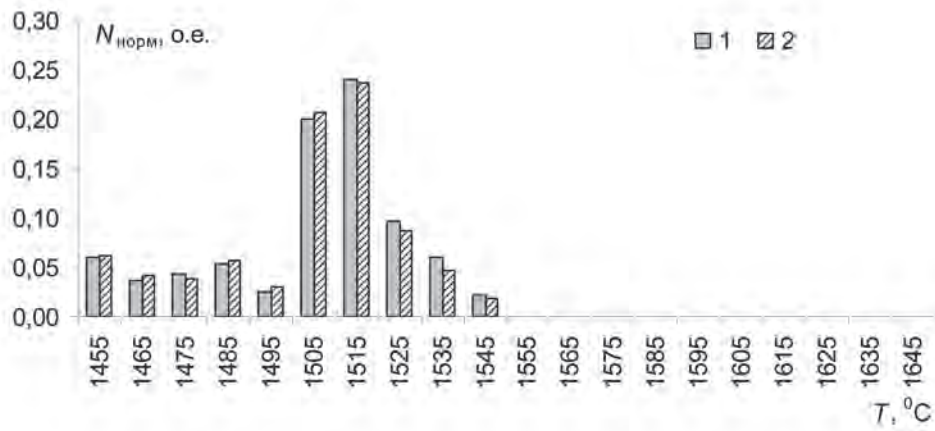


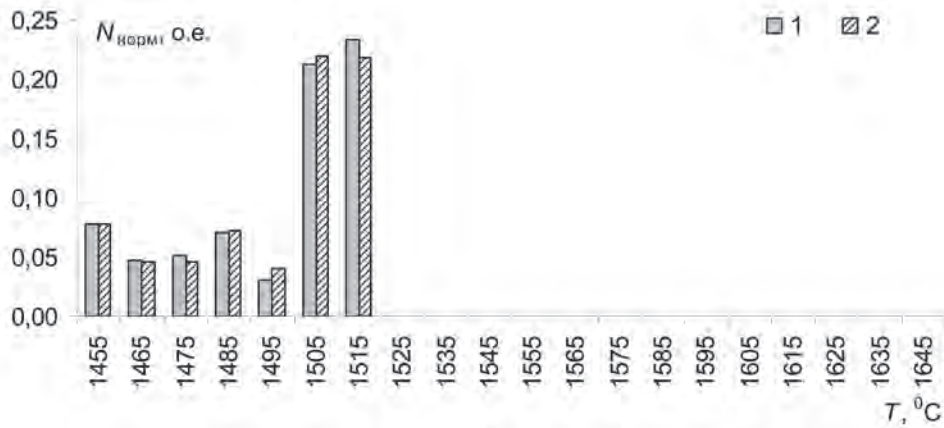
Рис. 9. Гистограмма распределения нормированных значений температур для исследуемой отливки для различных моментов времени для двух вариантов (начальная температура металла $T = 1550$ $^{\circ}\text{C}$): 1 – вариант А (без прибыли); 2 – вариант В (с прибылью); а – $t = 30$ с; б – 60; в – 90



a



b



в

Рис. 10. Гистограмма распределения нормированных значений температур для исследуемой отливки для различных моментов времени для двух вариантов (начальная температура металла $T = 1650$ °C): 1 – вариант Б (без прибыли); 2 – вариант Г (с прибылью); а – $t = 30$ с; б – 60; в – 90

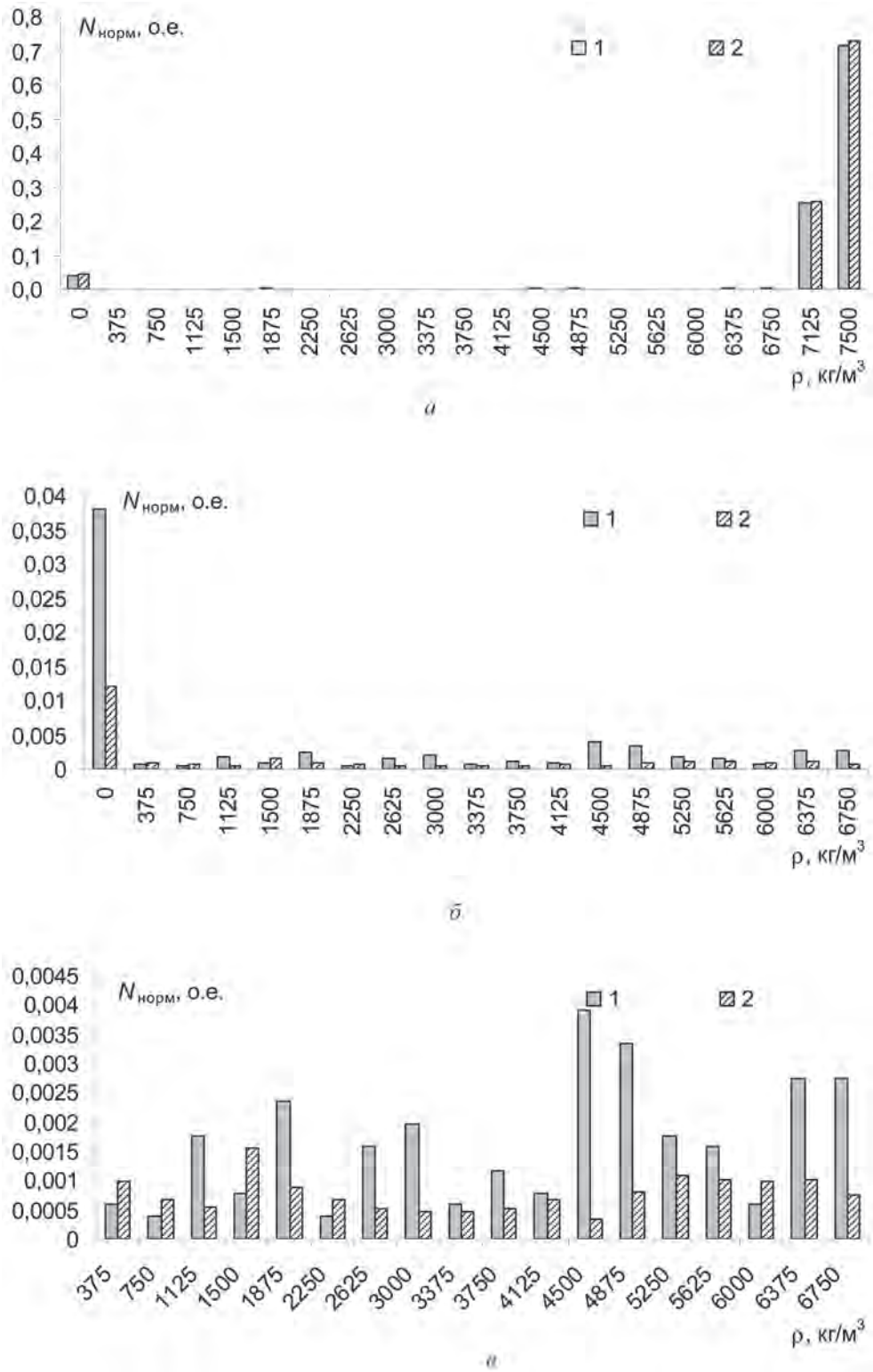


Рис. 11. Гистограмма распределения нормированных значений плотностей для исследуемой отливки для вариантов А и В: 1 – вариант А; 2 – вариант В

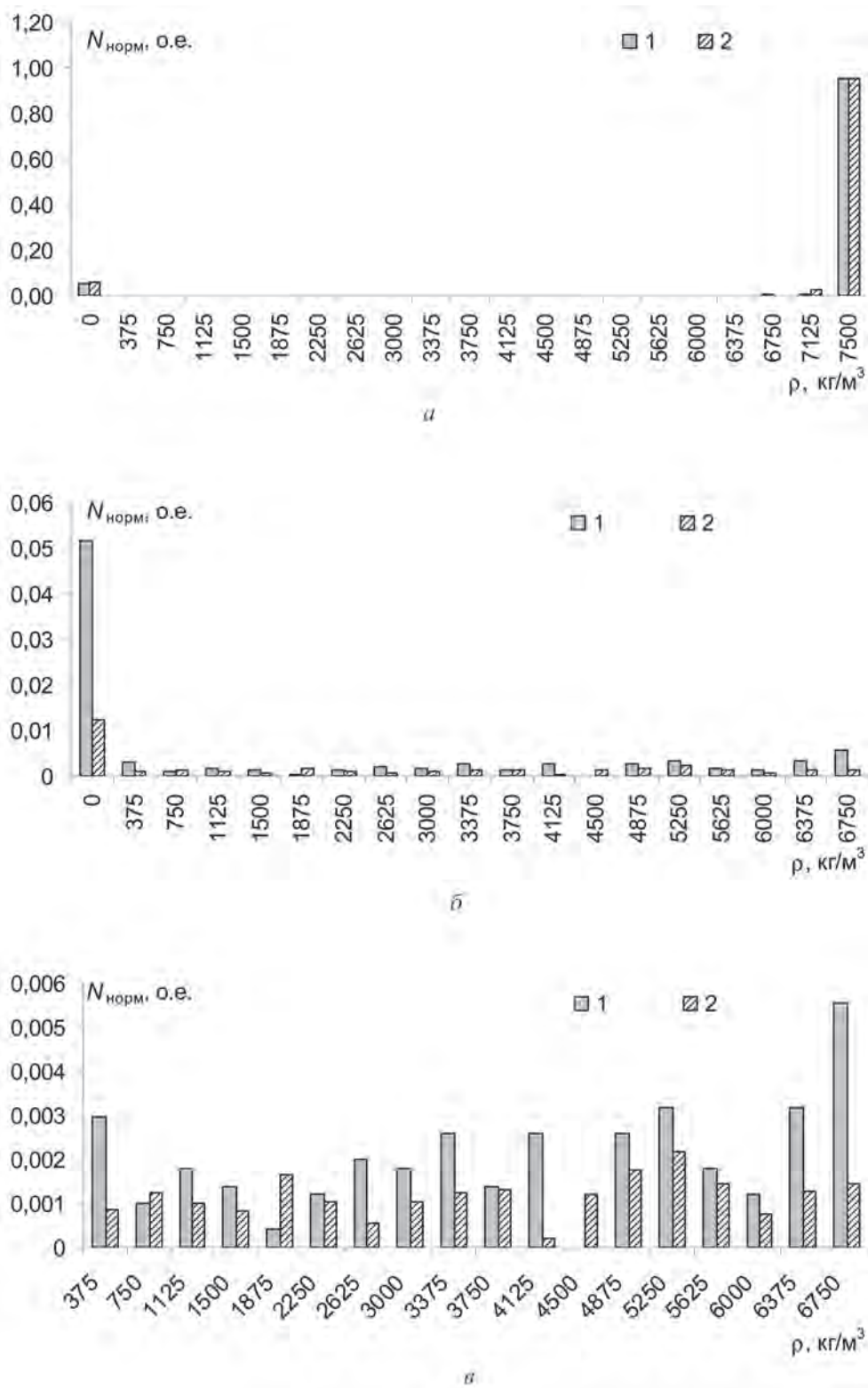


Рис. 12. Гистограмма распределения нормированных значений плотностей для исследуемой отливки для вариантов Б и Г: 1 – вариант Б; 2 – вариант Г

Литература

1. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф., Сачек О. А., Матюшинец Т. В., Чичко О. И. Математическое моделирование усадочных процессов кристаллизующегося металла в форме с трехмерной геометрией на основе уравнений Навье-Стокса и Фурье-Кирхгофа // *Литье и металлургия*. 2013. № 1. С. 70–76.