



УДК 621.74

Поступила 13.11.2014

К. В. КОБЯКОВ, БНТУ, научный руководитель канд. техн. наук Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, БНТУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ УСАДОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК

Выполнен анализ путей повышения эффективности питающих прибылей на основе результатов компьютерного моделирования процессов образования усадочных дефектов в пробе Шварца.

Analysis of ways of increase of the feeding discards efficiency on the basis of results of computer modeling of processes of shrinkable defects formation in Schwartz's test is carried out.

Выпуск высококачественных отливок с низкой себестоимостью – главная задача литейщиков. Однако при изготовлении отливок независимо от технологии получения литейной формы одними из наиболее часто встречающихся дефектов брака, которые существенно снижают качество отливок, являются дефекты усадочного происхождения. Величина брака по таким дефектам может составлять 20%. Основными причинами их образования могут быть ошибки при проектировании технологии, а также несоблюдение технологических режимов производства. Скрытность течения процесса затвердевания расплава в литейной форме существенно затрудняет возможность ликвидации возникающих при этом усадочных дефектов отливок [1]. Как известно, образование усадочных рыхлот, раковин и пористости связано с совокупностью явлений, приводящих к сокращению объема и линейных размеров сплава, залитого в форму, при его затвердевании и охлаждении. При этом причинами образования усадочных дефектов в отливках являются во-первых, то, что изменение объема залитого в форму металла происходит в условиях перепада температур по сечению отливки, когда ее наружные слои уже затвердели, а внутренние могут находиться еще в жидком состоянии, тогда в этом случае затвердевшая корочка ограничивает объем жидкого металла, заключенного внутри; во-вторых, многие сплавы характеризуются большим коэффициентом термического сжатия в жидком состоянии и в период кристаллизации по сравнению с коэффициентом термического сжатия их в твердом состоянии, поэтому изменение объема затвердевшей корочки при охлаждении до температуры окружающей среды будет

меньше, чем изменение «внутреннего» объема металла [2]. Также механизм образования усадочных явлений в отливке зависит от положения сплава на диаграмме состояния и интенсивности теплообмена в системе отливка-литейная форма [3]. Теплофизические условия кристаллизации отливки, в свою очередь, обусловлены геометрией и технологией изготовления литейной формы (например, кокиль или песчаная форма) и также в некоторой степени определяют величину и место образования усадочного дефекта.

Известно, что для устранения усадочных дефектов наиболее эффективным технологическим приемом является применение питающих бобышек и прибылей, однако их использование может существенно снижать эффективную металлоемкость литейной формы.

В настоящей работе выполнен анализ путей повышения эффективности питающих прибылей на основе результатов компьютерного моделирования процессов образования усадочных дефектов в пробе Шварца (рис. 1) [2].

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

- промоделированы процессы образования усадочных дефектов с использованием пробы Шварца, методом литья в металлическую форму (ко-

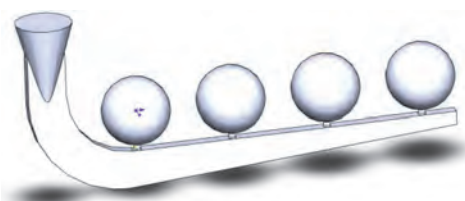


Рис. 1. 3D-модель пробы Шварца

киль), в форму из песчано-глинистой смеси (ПГС) и форму из холоднотвердеющей смеси (ХТС);

- на основании полученных результатов компьютерного моделирования подобрана эффективная геометрия прибыли, позволяющая устранить усадочные дефекты;

- выполнен анализ путей повышения эффективности питающих прибылей.

Компьютерное моделирование литейных процессов проводили при помощи пакета СКМ «Полигон», который позволяет моделировать гидродинамические процессы заполнения литейной формы, тепловые процессы при затвердевании отливок, а также образование в них усадочных раковин, микро- и макропористости. Для создания 3D-модели пробы Шварца и генерации конечно-элементной сетки использовали пакет SolidWorks 2014. Теплофизические параметры литейных форм, использованные при моделировании, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические параметры литейных форм

Параметры	Наименование технологии		
	литье в кокиль	литье в ПГС	литье в ХТС
Теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	4000	1410	1600
Теплопроводность, Вт/(м·К)	42–44	0,55	0,5
Параметры теплопередачи:			
граница 1 (отливка-форма) Beta ₁ , Вт/(м ² ·К)	4000	1400	1000
граница 2 (форма-отливка) Beta ₁ , Вт/(м ² ·К)	100	100	100
граница 3 (форма-среда) Beta ₁ , Вт/(м ² ·К)	10	10	10

В качестве сплава при моделировании использовали сталь 35Л, теплофизические и усадочные свойства которой приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Теплофизические свойства стали 35Л

Параметр	Значение
Плотность, кг/(м ³)	7100
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	775
Теплопроводность, Вт/(м·К)	27,00–52,00
Теплота затвердевания, Дж/кг	273000
T _{сол.} , °С	1450
T _{лик.} , °С	1495

Таблица 3. Усадочные свойства стали 35Л

Параметр	Значение
Изменение объема при плавлении, %	6,5
Термическое изменение объема жидкого, 1/К (10 ⁶)	12
Кинематическая вязкость расплава, м·м/с (10 ⁵)	1

Продолжение табл. 3

Параметр	Значение
Прочность жидкого, МПа	0,0256
«P ₁ » ₁ при начале линейной усадки	0,5
«P ₁ » ₂ при окончании гравитационного течения	0,3
«P ₁ » ₃ при полном перекрытии каналов	0,1
«K ₀ » для формулы K _f = K ₀ (P ₁ /P _s) ⁿ , м ² (10 ¹³)	1
n для формулы K _f = K ₀ (P ₁ /P _s) ⁿ	1,9
Спектр изменения P _s	0,00/0,02/0,04/0,06/0,08/1,00
Спектр изменения объема dV	0,00/0,02/0,04/0,06/0,08/1,00

Примечание. K_f – коэффициент фильтрации; P₁, P_s – соответственно доля жидкой и твердой фазы; K₀ – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности; n – степень, характеризующая тип кристаллического каркаса.

Условия заливки стали 35Л в литейную форму приведены в табл. 4.

Таблица 4. Условия заливки стали 35Л в литейную форму

Параметр	Значение
Температура заливки, °С	1545
Температура формы, °С	30
Температура окружающей среды, °С	30
Начальная скорость заливки, м/с	0,25

В результате моделирования было установлено, что кривые, характеризующие изменение температуры в контрольных точках пробы Шварца (контрольные точки были установлены в местах потенциального образования усадочных дефектов), носят монотонно убывающий характер при литье в ПГС форму (рис. 2) (различие в температурах составляет 8–10 °С). Аналогичный характер изменения температуры имеет динамика изменения жидкой фазы в пробе. Из рис. 3 видно, что такие же результаты получены и при литье в ХТС форму.

Анализ полученных результатов моделирования, отражающих вероятность образования усадочных дефектов при литье в ПГС форму (см. рис. 2, б) и ХТС форму (рис. 3, б), показывает, что размеры усадочных раковин в сферических элементах пробы Шварца имеют аналогичные параметры. Средняя скорость падения температуры в ПГС и ХТС форме составляет 2,64 и 2,43 °С/с соответственно. Это говорит о том, что усадочные дефекты в сферических элементах пробы Шварца образуются при относительно одинаковых условиях.

Однако при исследовании процесса образования усадочных дефектов при литье в кокиль (рис. 4) установлено, что разница в динамике изменения температуры в контрольных точках составляет 20–

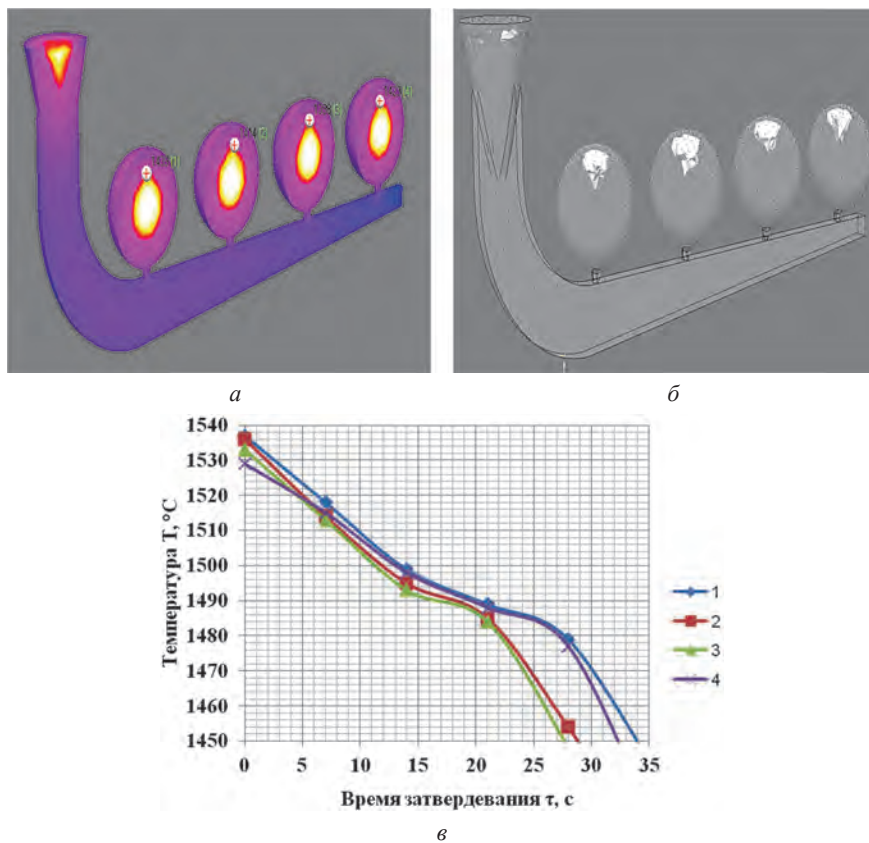


Рис. 2. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в ПГС форму: *a* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца)

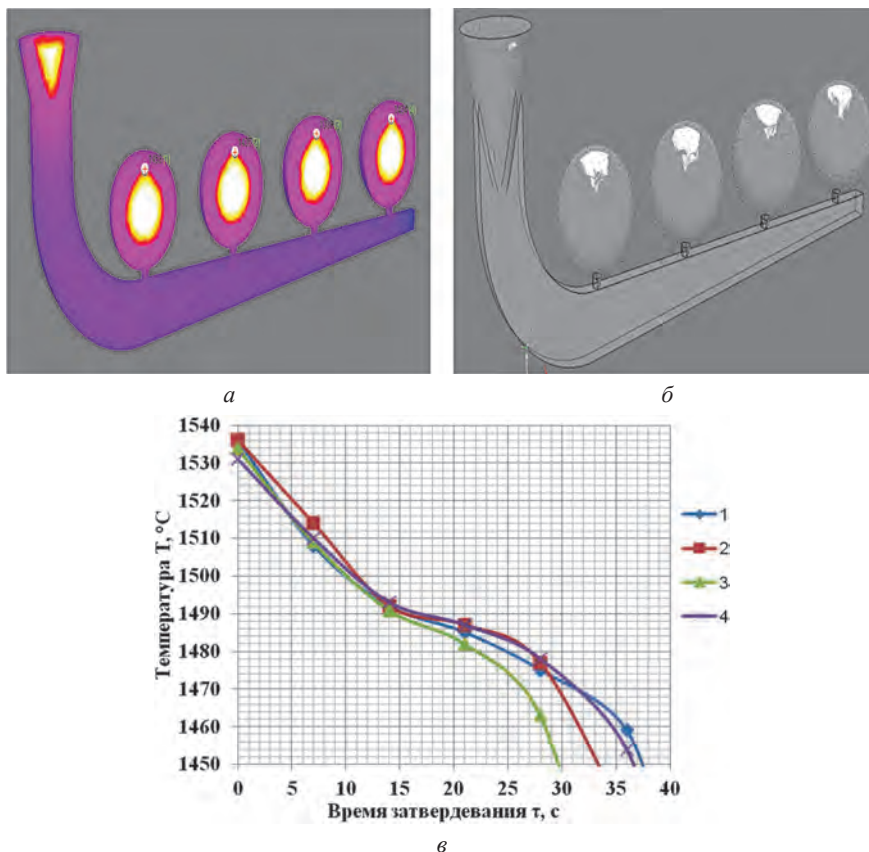


Рис. 3. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в ХТС форму: *a* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца)

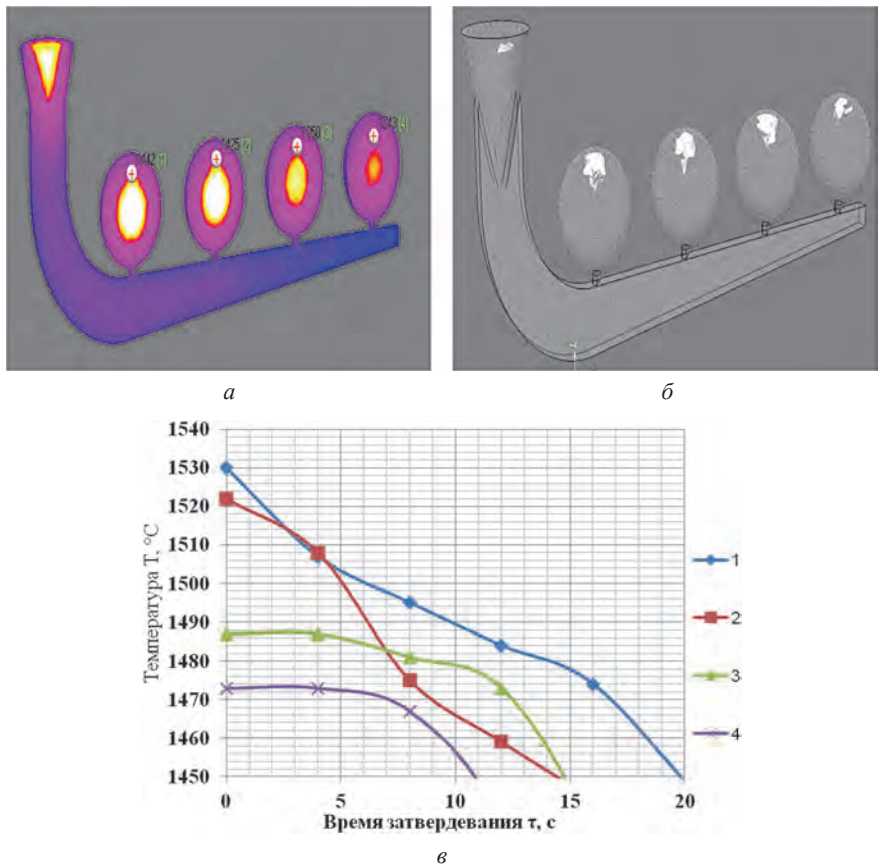


Рис. 4. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в кокиль: *а* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца)

30 °С, что связано с меньшей теплоаккумулирующей способностью металлической формы и, как следствие, более высокой скоростью затвердевания (4,5–8,1 °С/с) сферических элементов и всей пробы Шварца в целом.

На следующем этапе работы, методом Пржибыла [4] и с учетом полученных результатов моделирования, были рассчитаны геометрические параметры закрытой прибыли (рис. 5), объем ($V_{пр}$) которой определяли по формуле:

$$V_{пр} = \frac{\beta \varepsilon'_V}{1 - \beta \varepsilon'_V} v_o,$$

где v_o – объем питаемого узла; ε'_V – часть объемной усадки сплава, принимающая участие в формировании усадочной раковины; β – отношение объема прибыли ($V_{пр}$) к объему возникающей в ней усадочной раковины.

Основная цель применения прибылей – получение плотной отливки без усадочных раковин

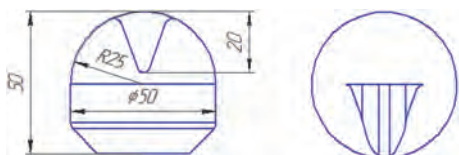


Рис. 5. Геометрия прибыли, рассчитанной методом Пржибыла

и пористости. В конкретных производственных условиях место расположения прибыли необходимо выбирать таким образом, чтобы жидкий металл из прибыли мог поступать непрерывно в затвердевающие части отливки и компенсировать уменьшение их объема в результате усадки металла, т. е. обеспечивать питание отливки. При этом усадочная раковина должна образоваться в самой прибыли, а не в отливке [5]. Конструкция пробы Шварца с прибылями приведена на рис. 6. Такая геометрия была промоделирована с целью анализа эффективности прибыли при литье по трем различным технологиям. При моделировании в связи с тем, что металлоемкость пробы увеличилась, а также с учетом установленной ранее более высокой скорости охлаждения в кокиле, начальную температуру за-

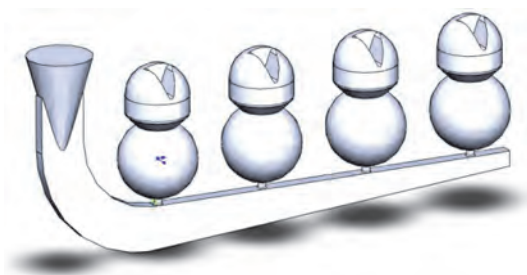


Рис. 6. Проба Шварца с прибылями

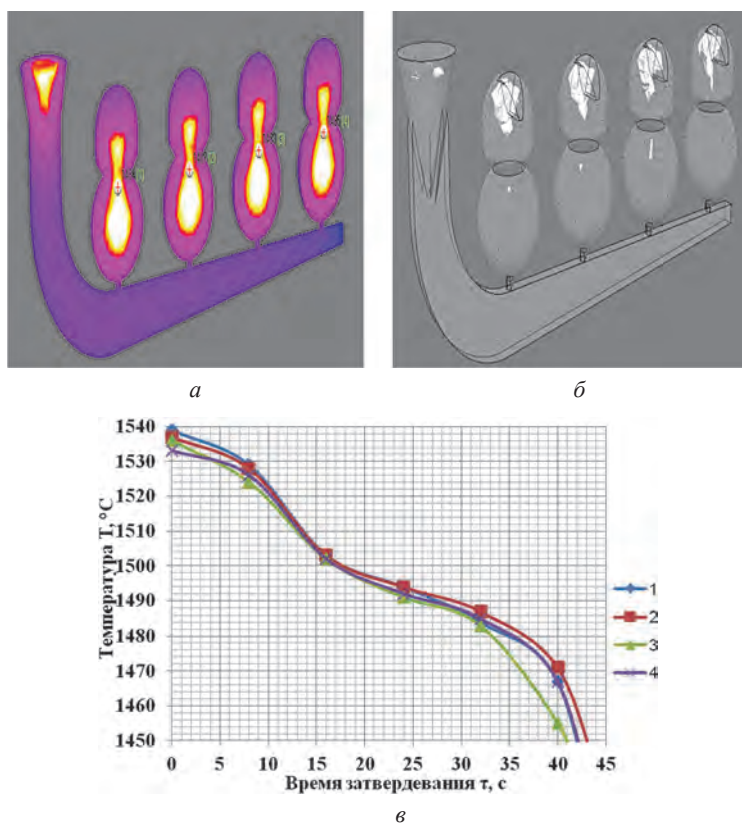


Рис. 7. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в ПГС форму: *a* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца с прибылью (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца с прибылью)

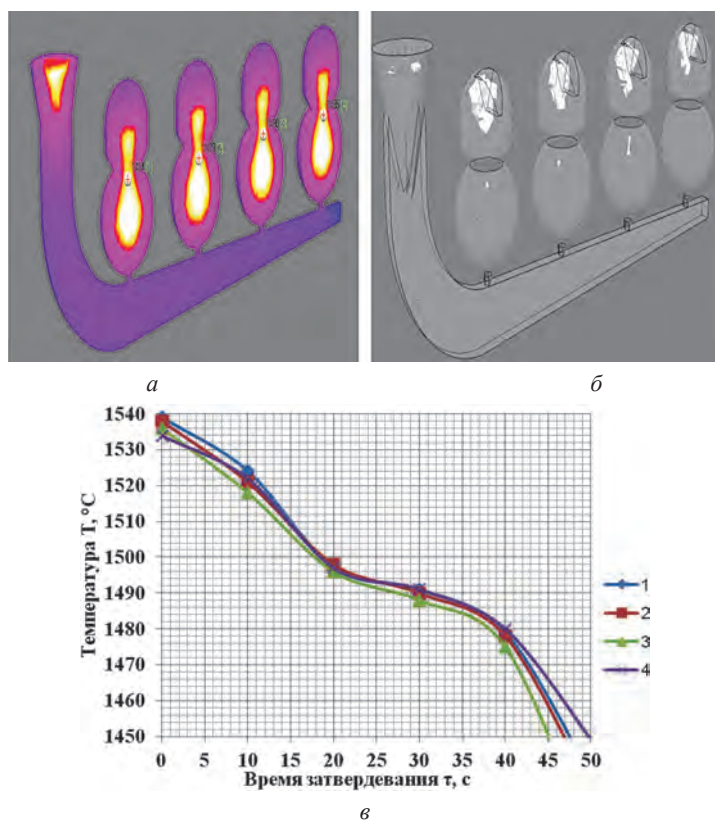


Рис. 8. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в ХТС форму: *a* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца с прибылью (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца с прибылью)

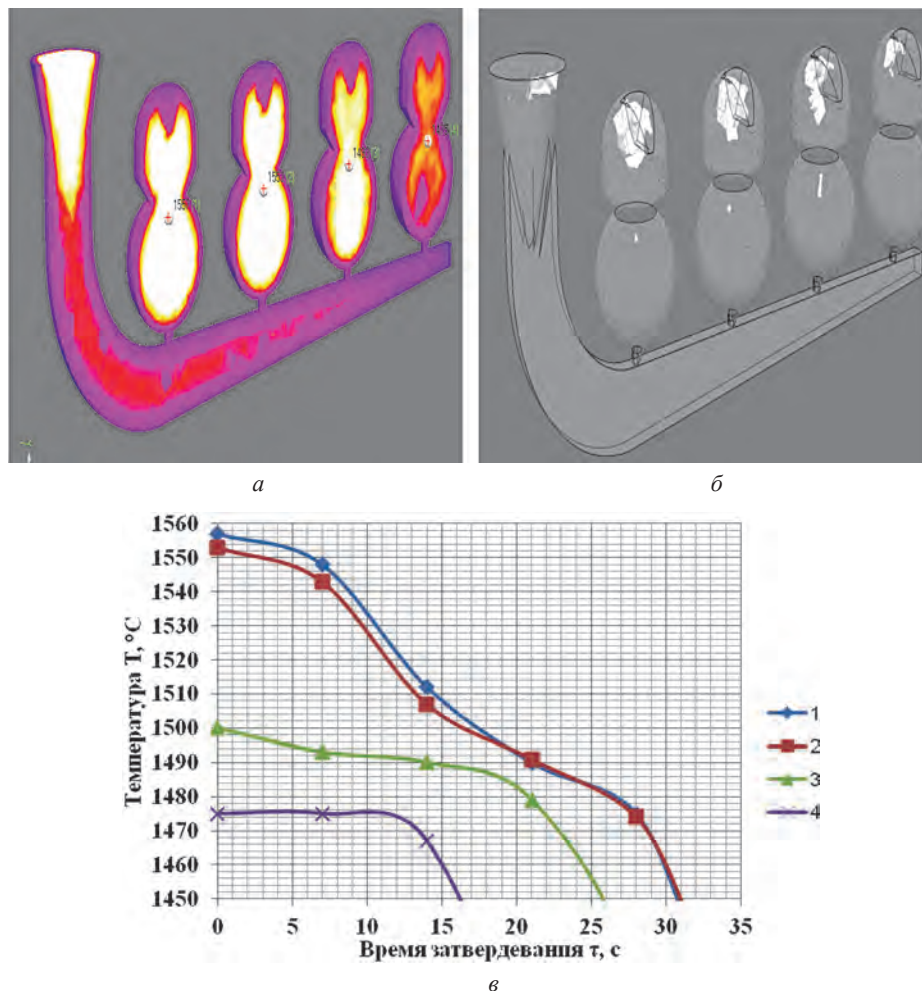


Рис. 9. Процесс затвердевания и образования усадочных дефектов при литье в кокиль: *a* – количество твердой и жидкой фазы; *б* – места образования усадочных дефектов; *в* – динамика изменения температуры в контрольных точках пробы Шварца с прибылью (1–4 – контрольные точки анализа температуры в соответствующих сферических элементах пробы Шварца с прибылью)

ливки расплава увеличили на 20 $^\circ\text{C}$ ($T_{\text{зал}} = 1565 \text{ }^\circ\text{C}$). Остальные параметры остались без изменения.

В результате моделирования (рис. 7, 8) установлено, что динамика изменения температуры в контрольных точках при литье в ПГС и ХТС форму носит, так же как и в предыдущем этапе моделирования, характер монотонно убывающих кривых и различается примерно на 8–10 $^\circ\text{C}$. Анализ вероятности образования усадочных дефектов показывает, что большая их часть смещается в прибыли, однако незначительные области все же сохранились в теле сферических элементов пробы Шварца. Размеры усадочных раковин в прибылях имеют аналогичные параметры, что свидетельствует об относительно одинаковых условиях формирования усадочных дефектов.

Анализ результатов моделирования при литье в кокиль (рис. 9) показывает, что, как и в предыдущем моделировании аналогичной технологии, разница в динамике изменения температуры в контрольных точках составляет 20–30 $^\circ\text{C}$. Также ана-

логичный характер изменения имеет и скорость затвердевания.

Анализ второго этапа моделирования позволил установить, что шейка прибыли перемерзает независимо от используемой технологии изготовления формы, в результате чего прибыль затвердевает раньше сферического элемента пробы Шварца и не позволяет прибыли в полной мере выполнить свою потенциальную питающую функцию, которая была определена по методу расчета Пржибыла.

Выводы

1. Несмотря на теплофизические параметры литейной формы (ПГС, ХТС, кокиль), величина образующихся усадочных раковин в пробе Шварца залитой сталью 35Л имеет аналогичные размеры.

2. Размеры закрытой прибыли, которые были рассчитаны методом Пржибыла, позволили устранить основную часть усадочных раковин, образующихся в сферических элементах пробы Шварца.

3. Шейка прибыли перемерзает, в результате чего она затвердевает раньше сферического элемента пробы Шварца независимо от используемой литейной формы, при этом питающий потенциал прибыли сохраняется. Это говорит о том, что при доработке конструкции прибыли возможно уменьшить

ее размеры и, тем самым, способствовать снижению затрат при изготовлении реальных отливок.

4. Для повышения эффективности питания отливки прибылью при ее проектировании необходимо учитывать результаты компьютерного моделирования.

Литература

1. Куликов Д. Ю. Автоматизация диагностики и устранения дефектов усадочного происхождения в отливках из железоуглеродистых сплавов: Автореферат. 2008.
2. Производство стальных отливок: Учеб. для вузов/ Л. Я. Козлов, В. М. Колокольцев, К. Н. Вдовин и др./ Под ред. Л. Я. Козлова. М.: МИСИС, 2003.
3. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машиностроение, 1964.
4. Кукуй Д. М., Скворцов В. А., Эктова В. Н., Андрианов Н. В. Теория и технология литейного производства. Минск: Новое знание, 2011.
5. Прибыли для фасонных отливок: Учеб. пособ. к практическим работам, курсовому и дипломному проектированию / Сост. А. Ф. Мащенко, А. В. Щекин. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012.