

И. Н. Будилов, Ю. В. Лукашук, С. Ю. Лукашук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

В работе представлены описания алгоритма и модели для численного моделирования процесса полунепрерывного литья плоских алюминиевых слитков, реализованного в пакете ProCast в соответствии с заданным графиком технологического процесса в реальном физическом времени. Формирование слитка осуществляется при непрерывном поступлении жидкого металла при поддержании постоянного уровня заливки кристаллизатора. Теплообмен по поверхностям, омываемым водой, задается как функция температуры и положения относительно кристаллизатора. Теплообмен через поддон определяется как контактный интерфейс, учитывающий состояние металла. Приведены результаты расчетов температурных полей, распределения твердой и жидкой фаз, а также величины критерия дефектности в формирующемся слитке. *Ключевое слово; ключевое слово; ключевое слово; ключевое слово*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс производства алюминия заканчивается изготовлением слитков на основании технологии полунепрерывного литья. В силу сложности процессов, протекающих в затвердевающем металле, доводку литейной технологии часто приходится проводить дорогостоящим методом проб и ошибок на реальных отливках. Для снижения подобных затрат в настоящее время с успехом применяют системы автоматизированного моделирования литейных процессов [1, 2].

Особенность описания литейных процессов связана с их мультифизичностью, т. е. с необходимостью получения решения связанных задач. Например, при непрерывном литье положение фронта кристаллизации определяется при движении образующегося слитка в условиях непрерывного теплоотвода и при постоянном поступлении новых порций жидкого металла. Совместная реализация сложных вычислительных моделей теплофизики и гидродинамики невозможна без разработки систем ограничений и допущений, которые, тем не менее, не должны искажать физику процесса. В этой связи наиболее перспективным представляется поиск решений в специализированной вычислительной среде, прошедшей апробацию в известных фирмах. Это обуславливает применение такого кода, как ProCAST, позволяющего, в частности, использовать данные экспериментальных замеров для уточнения параметров решаемой задачи.

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЗАДАЧИ

Уравнение энергии. Для твердых элементов кристаллизатора и поддона это уравнение представляет собой классическое уравнение теплопроводности:

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) - q = 0,$$

где T – температура, К; $c_p(T)$ – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К); τ – время; q – плотность объемных источников тепловыделения (теплопоглощения), Вт/м³.

Для неподвижной зоны застывающего расплава уравнение энергии записывается в виде

$$\rho(T) \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) - q = 0,$$

где H – удельная энтальпия, Дж/кг, определяемая зависимостью

$$H(T) = \int_0^T c_p(T) dt + L[1 - f_s(T)],$$

где L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; f_s – массовая доля твердой фазы в расплаве.

Для застывающего расплава, движущегося с относительно малой скоростью, соответствующей ламинарному режиму течения, уравнение энергии имеет вид

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} + \rho(\mathbf{w} \nabla) H - \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) - q = 0,$$

где \mathbf{W} – вектор эффективной скорости, м/с, связанный с вектором истинной скорости жидкой \mathbf{w}_l части расплава соотношением

$$\mathbf{w} = f_l \mathbf{w}_l,$$

где f_l – массовая доля жидкой фазы в расплаве.

Наконец, если скорость движения расплава достаточно высока, так что режим его течения становится турбулентным, то в этом случае уравнение энергии включает в себя параметры модели турбулентности:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} + \rho(\mathbf{w}\nabla)H - \operatorname{div} \left[\left(\lambda(T) + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right) \operatorname{grad} T \right] - q = 0,$$

где μ_T – турбулентная вязкость, Па·с;

σ_T – турбулентное число Прандтля, взвешенное на теплоемкость.

Уравнение неразрывности. Уравнение неразрывности, представляющее собой математическую запись закона сохранения массы, записывается традиционным образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{w}) = 0.$$

Уравнения движения. Для движущегося расплава записывается полная система уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial(\rho w_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (w_j \rho w_i + p \delta_{ij} - \sigma_{ij}) = \rho g_i,$$

здесь δ_{ij} – символ Кронекера; p – давление, Па; g_i – ускорение свободного падения, м/с²; σ_{ij} – тензор вязких напряжений Стокса, Па, включающий аппроксимацию напряжений Рейнольдса:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial w_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu_T \frac{\partial w_i}{\partial x_j},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Окончательная форма используемых в расчетах уравнений движения получается в рамках следующих предположений. Считается, что расплав близок по свойствам к несжимаемой жидкости. Полагается, что частные производные от вязкости малы, и ими можно пренебречь. Для моделирования эффектов течения в двухфазной «кашеобразной» области в уравнение движения вводится дополнительное слагаемое, обеспечивающее обращение скорости движения в нуль при полном застывании расплава. Таким образом, в окончательной форме уравнения движения имеют вид

$$\rho \frac{\partial w_i}{\partial \tau} + \rho w_j \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[p \delta_{ij} (\mu + \mu_T) \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \right] = \rho g_i - \frac{\mu}{K} w_i,$$

где K – проницаемость, рассчитываемая по уравнению Козени–Кармана:

$$K = \frac{f_l^3}{5M_s^2(1-f_l)^2},$$

в котором

$$M_s = \frac{6k}{D_p}$$

– отношение поверхности к объему для твердых структур, 1/м; k – коэффициент формы; D_p – характерный размер, м.

Предполагается, что твердая часть расплава представляет собой дендриты конической формы со средним диаметром 100 микрон, так что $M_s = 600 \text{ см}^2$.

В программе ProCAST рассмотрены дефекты, связанные с усадкой слитка в процессе его остывания. При этом определяются зоны микропористости, критериально связанные с величиной скорости усадки. Коэффициент усадки (критерий Нийямы), характеризующий дефект отливок рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{G}{\sqrt{L}},$$

где G – модуль температурного градиента, определяемый формулой

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2},$$

L – скорость охлаждения, определяемая по зависимости

$$L = \left| \frac{T_{up} - T_{low}}{\tau_{up} - \tau_{low}} \right|,$$

здесь T_{up}, T_{low} – верхняя и нижняя границы температурного диапазона, в котором оценивается скорость охлаждения, τ_{up}, τ_{low} – времена достижения соответствующих границ температурного диапазона. Обычно в качестве T_{up} принимают температуру ликвидуса T_l , а в качестве T_{low} – температуру солидуса T_s .

НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Начальными условиями являются заданные в пространстве функции температуры, давления и вектора скорости:

$$T(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0(x), \quad p(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = p_0(x),$$

$$\mathbf{w}(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = \mathbf{w}_0(x).$$

Граничные условия по скорости:

- на входе потока задается значение скорости, соответствующее заданному расходу расплава, причем это значение изменяется во

времени и согласовано со скоростью опускания поддона;

- на твердых поверхностях задается нулевое значение скорости;
- на плоскостях симметрии задается нулевая нормальная составляющая вектора скорости.

Тепловые граничные условия:

- во входном потоке расплава задается постоянное значение температуры расплава;
- в местах контакта расплава с твердыми поверхностями Γ (кристаллизатором и поддоном) задаются конвективные граничные условия вида

$$-\lambda(T)\text{grad}T\mathbf{n}|_{\Gamma} = \alpha(\tau, T)(T - T_f) \text{ на } \Gamma,$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности Γ , α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), T_f – температура движущейся среды, К;

- на внешних поверхностях модели задаются граничные условия излучения:

$$-\lambda(T)\text{grad}T\mathbf{n}|_{\Gamma} = \sigma\varepsilon(T^4 - T_s^4),$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, $5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

ε – приведенная степень черноты системы;

T_s – температура тел окружающей среды, К;

- со стороны кристаллизатора задается комбинация конвективных граничных условий и условий излучения.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ

Схематично процесс полунепрерывного литья (ПНЛ) для производства алюминиевых слитков показан на рис. 1.

Перед началом ПНЛ металлический поддон частично заводится в водоохлаждаемый кри-

сталлизатор. Затем конструкцию из поддона и кристаллизатора постепенно заполняют расплавленным алюминием до уровня, обозначенного на кристаллизаторе, одновременно поддон постепенно опускают в литейную яму, заполненную водой. Процесс литья продолжается до тех пор, пока слиток не достигнет желаемой длины. Большое значение при моделировании процесса кристаллизации имеет решение задачи теплообмена. Теплообмен осуществляется в трех характерных зонах (рис. 2):

- зона I – зона косвенного охлаждения, где образуется первая корка;
- зона II – промежуточная зона, где теплота не отводится через корку;
- зона III – зона прямого охлаждения, где большая часть теплоты отводится путем сильного охлаждения водой.

В общем случае отвод тепла осуществляется всеми способами теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием в условиях изменяющихся параметров окружающей среды. К сожалению, никакая модель не в состоянии адекватно учесть все особенности такого процесса. В этой связи используют коэффициенты эффективного теплообмена, заложенные в базу данных и учитывающие специфику литейных процессов.

Необходимо отметить, что контактная теплопередача через поддон будет определяться областями плотного контакта и областями, характеризующимися зазором между нижней границей слитка и поддоном величиной в несколько сотых долей миллиметра. Для повышения адекватности расчетной модели необходимо проведение замеров температуры с целью уточнения значений коэффициентов в зависимости от особенностей реализации процесса литья.

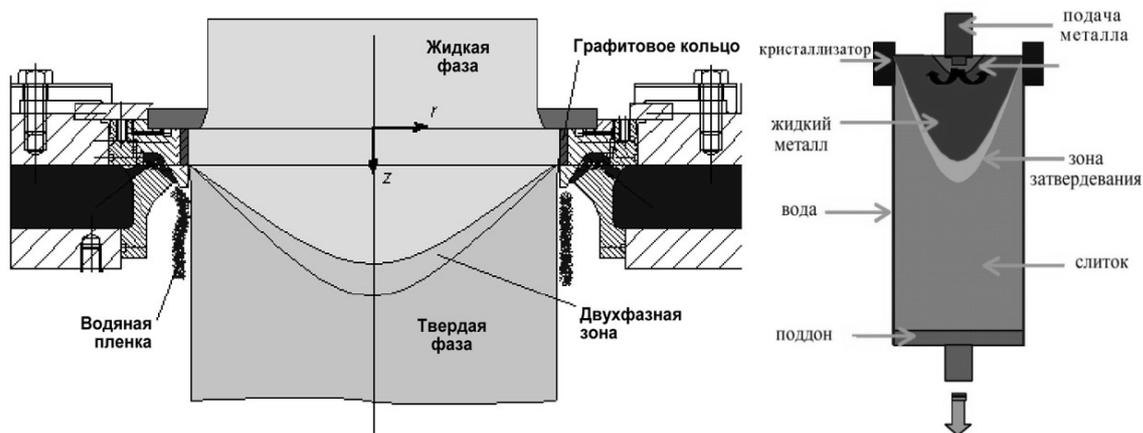


Рис. 1. Схема процесса непрерывного литья

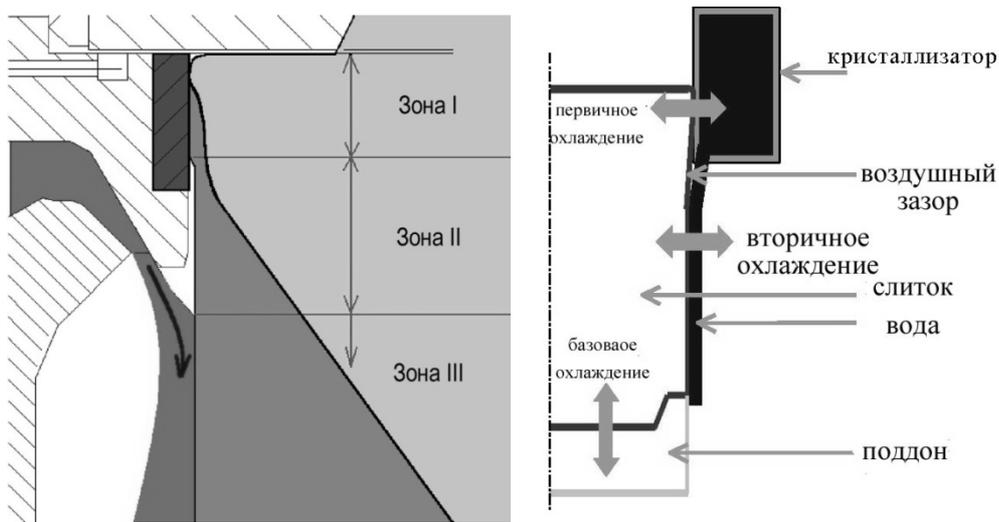


Рис. 2. Характерные зоны теплообмена в процессе полунепрерывного литья

Более 90% тепла отводится в зоне вторичного охлаждения. Однако для хода литейного процесса важно образование корки в зоне первичного охлаждения, поэтому анализ процессов, протекающих в этой зоне, важен для конструкции литейной машины.

Скорость охлаждения жидкого металла в первой зоне влияет на образование корки, которая должна приобрести достаточную толщину для возможности отделения от стенки вследствие усадки.

Скорость отвода тепла во второй зоне определяется расходом воды и ее температурой. От этого зависит скорость разливки. К сожалению, сильно увеличивать скорость течения воды нельзя, так как струя может либо отскакивать от поверхности, либо проникать в поверхность слитка. Характер течения охлаждающей воды может быть подробно проанализирован только с помощью специализированных гидродинамических пакетов.

Технологические параметры процесса литья слитков:

- температура металла в центральном канале 680 °С;
- температура охлаждающей воды 20 °С;
- скорость литья в соответствии с графиком движения поддона.

Теплофизические свойства алюминия, используемые в расчетах: плотность жидкой фазы 2450 кг/м³; плотность твердой фазы 2710 кг/м³; удельная теплоемкость жидкой фазы 1100 Дж/(кг·К); удельная теплоемкость твердой фазы 1027 Дж/(кг·К); скрытая теплота плавления 390000 Дж/кг; теплопроводность жидкой фазы 90.8 Вт/(м·К); теплопроводность твердой фазы 175.5 Вт/(м·К); вязкость жидкой фазы 0.0013

Па·с; температура ликвидуса 622 °С; температура солидуса 570 °С.

При проведении моделирования параметры теплоотдачи в зонах первичного и вторичного охлаждения задавались постоянными:

- средняя температура воды в кристаллизаторе в камере первичного охлаждения кристаллизатора 40 °С;
- коэффициент теплоотдачи от воды в зоне первичного охлаждения к рабочей поверхности кристаллизатора 1000 Вт/(м·К);
- средняя температура воды в зоне вторичного охлаждения 50 °С;
- коэффициент теплоотдачи от воды в зоне вторичного охлаждения к поверхности слитка 3000 Вт/(м·К).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

При построении модели приняты следующие допущения: граничные и начальные условия симметричны относительно плоскостей симметрии слитка; в начальный момент времени температура во всех узлах одинакова и равна температуре разливки 680 °С.

На рис. 3, а показан общий вид сеточной модели для формирования слитка сечением 1510×560 мм и длиной 6000 мм. Модель состоит из нескольких областей: внешней граничной поверхности (1), определяющей границу области радиационного теплообмена; кристаллизатора (2); формирующегося слитка (на поддоне) (3), область расположения поддона (4). На рис. 3, б показана основная расчетная область слитка и кристаллизатора (исключена область радиационного теплообмена).

В процессе расчета воспроизводится заполнение полости кристаллизатора жидким металлом при условии сохранения неизменным уровня заливки. При этом осуществляется движение слитка вниз в соответствии с заданным графиком движения, показанным на рис. 4. Граничные условия учитывают скорость литья (как функцию времени), а также изменяющийся характер теплообмена по высоте образующегося слитка. Вдоль продольной оси слитка выделяются зоны, в которых имеются разные условия охлаждения – это кристаллизатор, зона вторичного охлаждения, участок охлаждения на воздухе. Разработанная модель позволяет регулиро-

вать интенсивность теплообмена на границе выплавляемый металл – поддон в зависимости от фазового состояния металла и обеспечивает возможность учета «неидеальности» теплового контакта.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Получены температурные поля, изменение соотношения между твердой и жидкой фазами, а также значение критерия дефектности как функции времени на всех стадиях литейного процесса во всем объеме образующегося слитка.

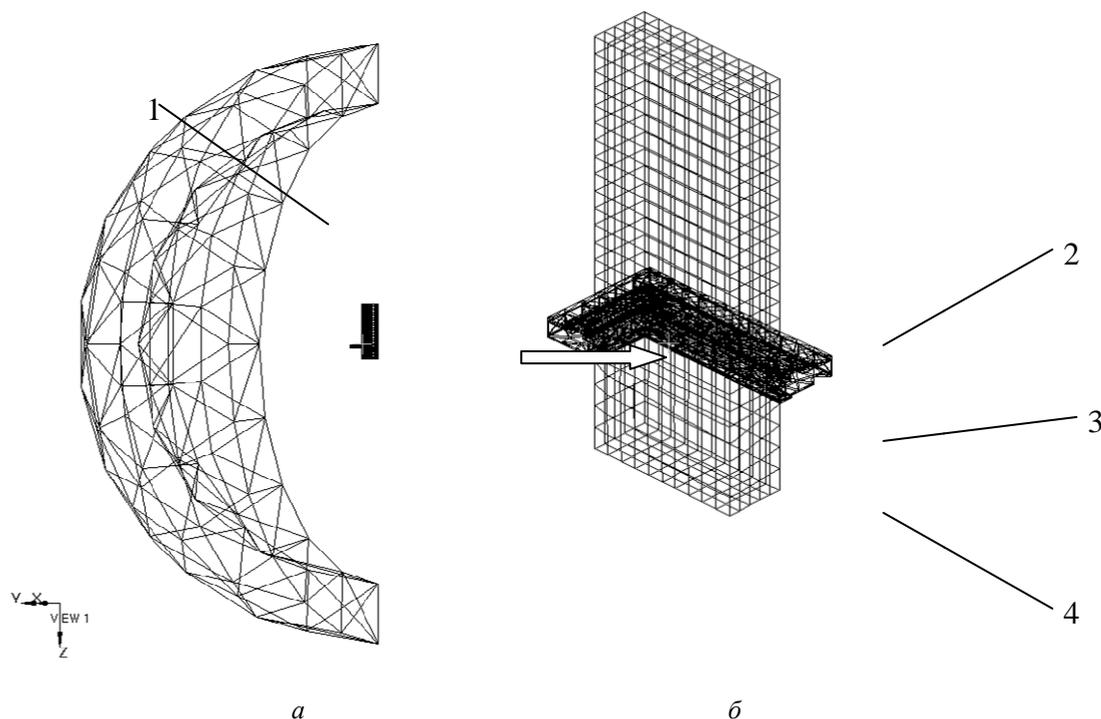


Рис. 3. Общий вид модели, иллюстрирующий характер области радиационного теплообмена (а), сеточное разбиение основной части расчетной области (слитка и кристаллизатора) с учетом симметрии (б)

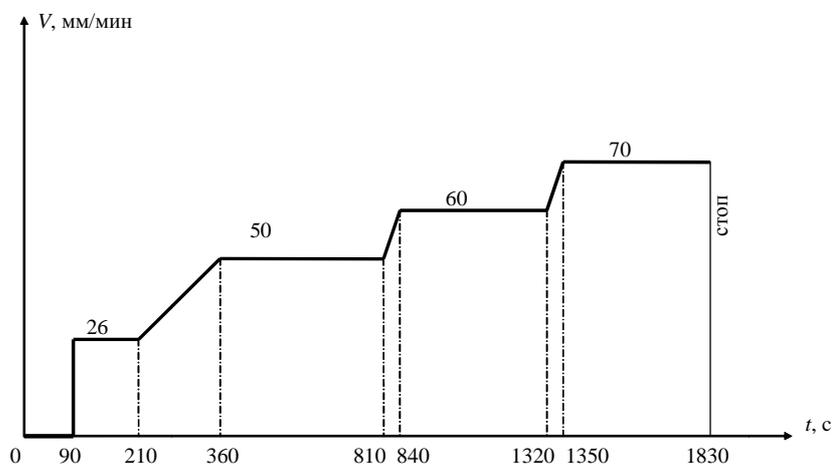


Рис. 4. Зависимость скорости литья от времени

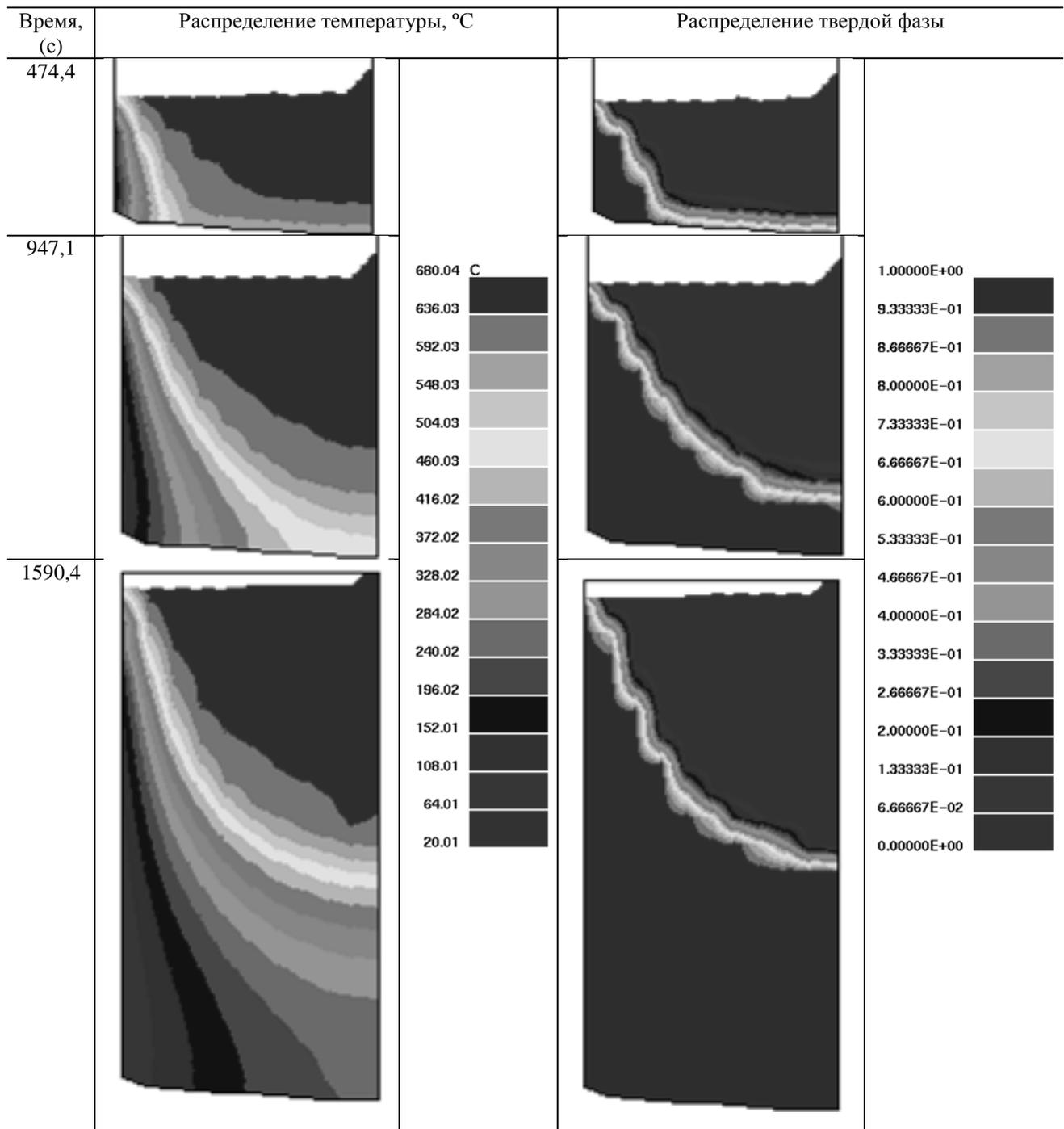


Рис. 5. Распределение температуры и твердой фазы по ходу процесса в среднем сечении вдоль длинной стороны слитка

В качестве примера на рис. 5 приведены поля распределения температуры и твердой фазы по ходу процесса в среднем сечении вдоль длинной стороны слитка.

Рис. 6 иллюстрирует распределение доли твердой фазы и температуры в объеме на 1590 секунде процесса (приведено сечение вдоль короткой стороны слитка).

Для идентификации расчетной модели было проведено сравнение формы лунки, замеренной в осевом сечении слитка по его короткой стороне при реальном процессе литья со скоростью 50 мм/мин и полученной расчетом. На рис. 7 приведены результаты сравнения, свидетельствующие о достаточной степени практической адекватности расчетной модели.

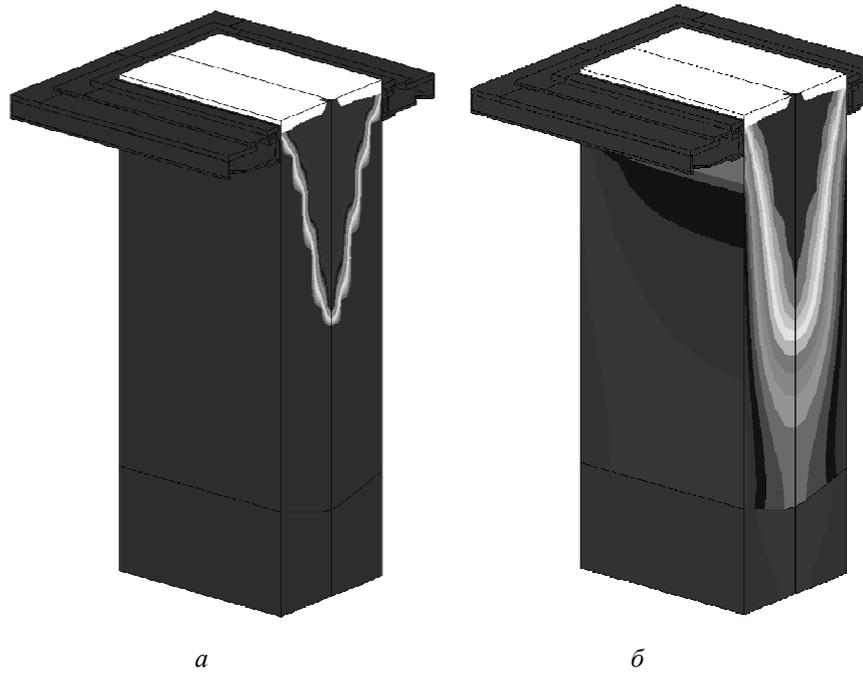


Рис. 6. Доля твердой фазы (а); температура (б) на 1590 секунде процесса

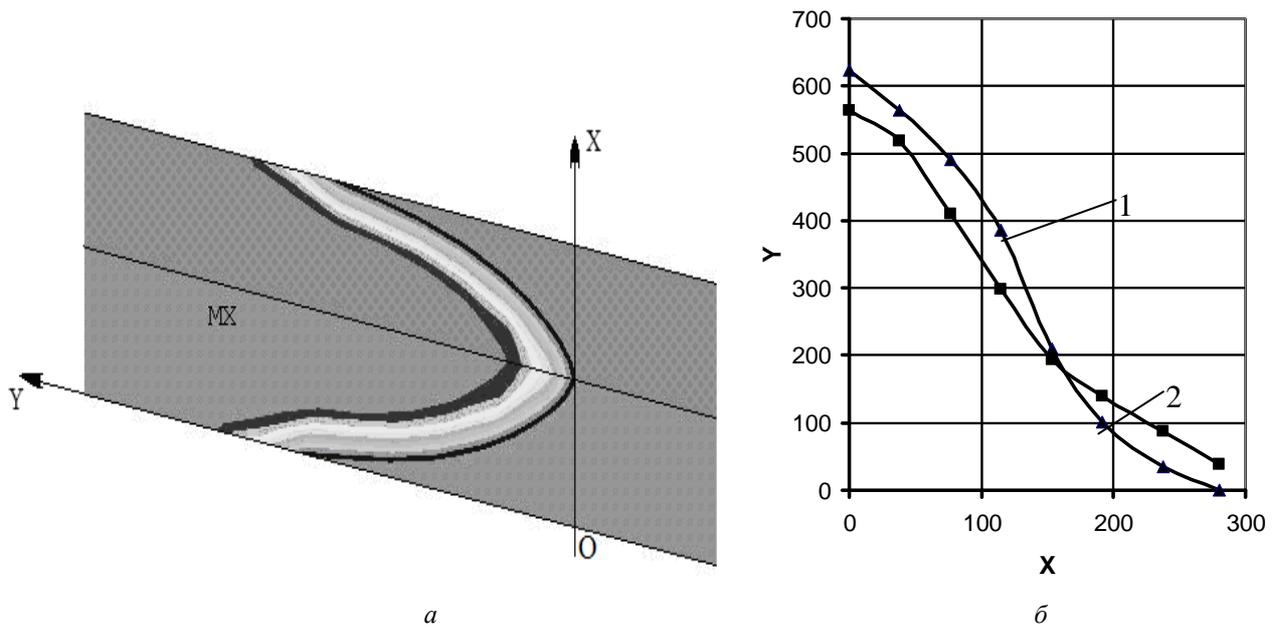


Рис. 7. Сравнение формы лунки: а – форма лунки по расчету; б – сравнение формы лунки по расчету (1) и предоставленным данным (2)

Распределение критерия дефектности на 1891с процесса в плоском слитке иллюстрирует рис. 8. Показано, что при реализации процесса литья в соответствии с технологическим регла-

ментом, вероятность образования дефектов незначительна. Образование пористости возможно на поверхности слитка в его начальной части в зоне контакта с поддоном.

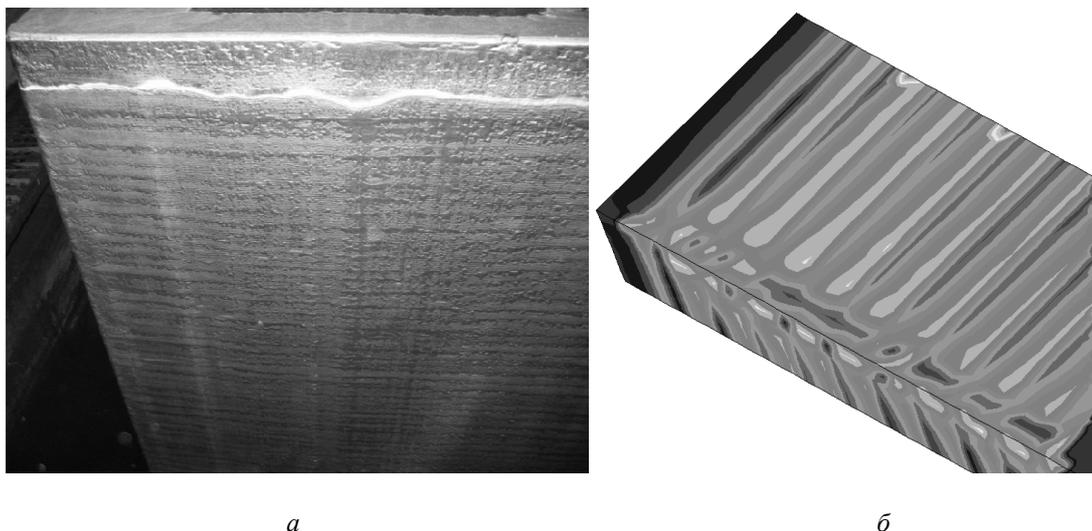


Рис. 8. Вид поверхности слитка (а) и распределение критерия дефектности (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием кода ProCast разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм, позволяющие осуществлять моделирование процесса полунепрерывного литья плоских алюминиевых слитков с учетом изменяющихся технологических параметров: графика и скорости движения поддона; изменения характеристик теплоотвода через боковые поверхности формирующегося слитка; а также параметров контактного интерфейса поддон-металл. В процессе заливки учитывается гидродинамика течения жидкого металла и его влияние на теплопередачу в зоне контакта. Выполнено моделирование формирования слитка прямоугольного сечения 1510×560 мм и длиной 6000 мм, результаты которого прошли практическую апробацию и используются на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров М. Д. Модели литейных процессов в САМ ЛП «Полигон» // Литейные материалы, технология, оборудование: сб. тр. ЦНИИМ. Вып. I. С.-Петербург, 1995. С. 21–26.
2. ProCAST User's Manual & Technical Reference. Copyright © 1996, 1997 by UES Software, Inc.

ОБ АВТОРАХ

Будилов Игорь Николаевич, проф. каф. сопр. матер. Дипл. инж. по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УГАТУ, 1998). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (ЧПИ, 1972). Иссл. в обл. механики разрушения, прочности элементов газотурбинных двигателей.

Лукашук Юрий Валентинович, доц. каф. основ констр. механизмов и машин. Дипл. инж. по автоматизации машиностр. промышленности (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УАИ, 1981). Иссл. в обл. прочности и надежности элементов конструкций методами компьютерного моделирования.

Лукашук Станислав Юрьевич, доц. каф. высокопроизв. Вычисл. технологий и систем. Дипл. инженер по авиац. и ракетн.-косм. теплотехн. (УГАТУ, 1997). Канд. физ.-матем. наук по теплофизике и молекулярн. физике (БГУ, 1999). Иссл. в обл. матем. моделирования.