

УДК 621.74:669.23: 536. 42

Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины

А.П. Скуратов^{а*},

Д.И. Махов^а, Е.А. Павлов^б

*^аСибирский федеральный университет,
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

*^бОАО «Красцветмет»,
Россия, 660027, Красноярск, Транспортный проезд, 1*

Received 10.10.2013, received in revised form 04.12.2013, accepted 12.14.2014

На основе программных комплексов ANSYS и ProCAST разработаны компьютерные модели литья платины в водоохлаждаемую изложницу с подвижным дном. Изучено влияние режимных параметров работы литейной установки на процесс кристаллизации слитков. Установлены количественные зависимости, позволяющие снизить величину усадочной раковины, а также исключить поверхностные и внутренние дефекты в готовых слитках платины.

Ключевые слова: компьютерная модель литья, программные комплексы ANSYS и ProCAST, слитки платины, изложница, подвижное дно, режимные параметры, усадочная раковина.

Введение

В производстве заготовок и изделий из благородных металлов существует ряд проблем, связанных с литейными дефектами, приводящими к снижению выхода, годного за счет их дополнительной механической обработки, и повышению себестоимости из-за переплава отходов. Так, при литье слитков платины могут возникать трещины на поверхности и в объеме слитка, поры и значительная объемная усадка, достигающая 15...20 %. Возникновение таких дефектов связано, как правило, с несоответствием режимных параметров литейного процесса оптимальным значениям, определить которые в промышленных условиях не всегда представляется возможным. Поэтому наиболее перспективным здесь следует считать использование аппарата математического моделирования, позволяющего избежать трудности с постановкой физических экспериментов и существенно уменьшить производственные затраты. В частности, использование системы компьютерного моделирования литейных процессов благородных металлов обеспечивает снижение брака и расходов на отработку технологии, временных затрат на внедрение новых технологий, расхода материалов, а также позволяет обеспечить гарантированно высокий уровень свойств отливок.

В работе представлены результаты математического моделирования литья слитков платины в промышленной установке с использованием программных комплексов ANSYS и ProCAST.

На базе этих программ разработаны две компьютерных модели процесса, в которых решатели дифференциальных уравнений (в частности, гидродинамический и тепловой) основаны на методе конечных элементов (МКЭ). Проведена оценка степени согласованности этих моделей по результатам тепловых расчетов процесса литья. Основная цель исследования заключалась в определении оптимального комплекса режимных параметров разлива платины, позволяющего минимизировать величину усадочной раковины, количество внешних и внутренних дефектов в готовых слитках.

Теоретическая часть

На рис. 1 показана схема промышленного процесса низкоскоростного литья платины с направленной кристаллизацией [1]. Технологический процесс получения слитка платины заключается в следующем: в индукционной печи происходит плавление металла с некоторым его перегревом, после чего тигель наклоняется и расплав сливается через воронку в медную изложницу с охлаждаемыми водой стенками. На протяжении всего слива расплавленного металла дно изложницы опускается с заданной скоростью. Далее в соответствии с технологическим регламентом готовый слиток платины некоторое время выдерживается в изложнице.

Анализ теплового состояния металла в процессе литья проводили с использованием программного комплекса ANSYS. Программный комплекс ProCAST позволил наряду с анализом температурного поля при кристаллизации оценить гидродинамику заполнения расплавом формы, поверхностные и внутренние дефекты отливки. Отметим, что в программных модулях ProCAST при расчете газовой и усадочной микропористости используется метод конечных разностей, при расчете процесса зарождения и роста зеренной структуры – МКЭ и клеточные автоматы.

На рис. 2, а показана сеточная твердотельная модель отливки, созданная в программном комплексе ANSYS и интегрированная в модель ProCAST. Отливка прямоугольного сечения размером 0,300 x 0,104 x 0,074 м. Сетка модели состояла из 131510 элементов в виде тетраэдров. В работе все результаты моделирования представлены графически в сечении отливки ZOX (заштрихованная область на рис. 2, б).

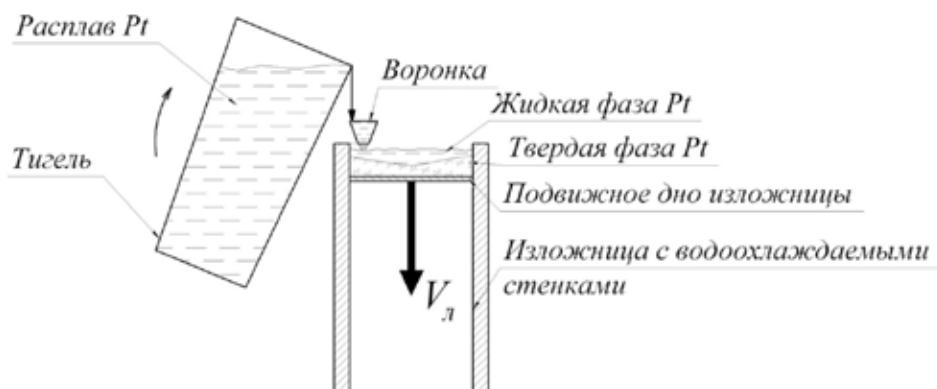


Рис. 1. Схема процесса слива расплава платины

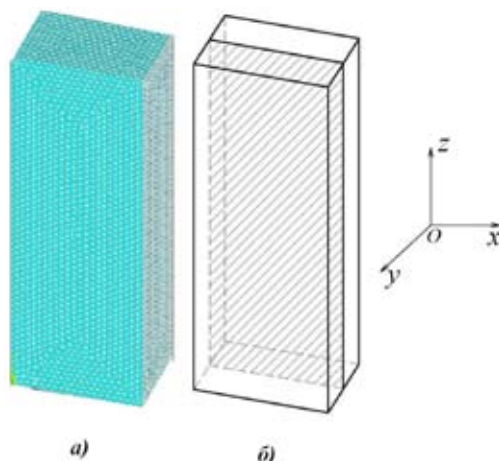


Рис. 2. Сеточная модель отливки (а) и расчетное сечение ZOX (б)

Механизм теплопереноса описывается в моделях нелинейным трехмерным уравнением теплопроводности, где полная производная температуры по времени учитывает движение расплава в изложнице по оси координат OZ :

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{(\rho(T) \cdot c_v(T))} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + v_z(\tau) \frac{\partial T}{\partial z}$; $q_v(x, y, z, \tau)$ – функция, характеризующая объемный источник теплоты фазового перехода, Вт; v_z – скорость движения дна изложницы (скорость литья), м/с. Принято, что величина q_v прямо пропорциональна локальной скорости затвердевания сплава [2]. Решение уравнения (1) при выдержке металла в изложнице существенно упрощается, так как значения v_z и q_v равны нулю.

На верхней плоскости слитка в сечении XOY принимались граничные условия первого рода (температура поверхности принята равной температуре перегрева расплава), на всех остальных поверхностях слитка – третьего рода.

В общем случае коэффициент теплопередачи от поверхности слитка к охлаждающей воде $K_{тп}$ рассчитывали по выражению

$$K_{тп} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_u}{\lambda_u} + \frac{\bar{\delta}_g(\tau)}{\lambda_g} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – соответственно коэффициент теплоотдачи от слитка к внутренней стенке изложницы и от ее наружной стенки к охлаждающей воде, Вт/(м²·К); δ_u и $\bar{\delta}_g(\tau)$ соответственно толщина стенки изложницы и средняя эффективная величина воздушного зазора между стенкой изложницы и кристаллизующимся слитком, м; λ_u и λ_g соответственно коэффициенты теплопроводности медной изложницы и воздуха, Вт/(м·К).

Как видно из выражения (2), при расчете величины $K_{тп}$ учитывали образование газового зазора между стенками изложницы и боковыми поверхностями кристаллизующейся отливки. В газовом зазоре при расчете величины α_1 принимали теплообмен только излучением. Кроме

того, учитывали то обстоятельство, что образующийся зазор неодинаков по высоте слитка и в процессе слива металла изменяется по следующему закону [4]:

$$\bar{\delta}_b(\tau) = - \int_0^\tau \left(\int_0^{\xi_c(\tau)} \beta_l(t) \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} dx \right) d\tau, \quad (3)$$

где τ – время затвердевания, с; x – координата, направленная по нормали к поверхности слитка; $\xi_c = \xi_c(\tau)$ – толщина оболочки слитка по температуре солидус, м; $t(x,\tau)$ – температурное поле оболочки; $\beta_l = \beta_l(t)$ – температурный коэффициент линейного расширения твердой платины, $1/K$.

При разработке математических моделей принято, что процесс заполнения однокомпонентным гомогенным расплавом происходит равномерно по всему поперечному сечению изложницы без гидравлического удара струи о поверхность жидкой фазы.

Результаты и их обсуждение

Проведена количественная оценка воздействия трех основных режимных параметров на кристаллизацию слитка: скорость литья v_d (скорость движения дна изложницы), температура разливаемого металла T_p и интенсивность охлаждения изложницы q_b . В качестве критерия оптимального управления процессом принято условие минимизации величины усадочной раковины. Диапазон изменения параметров соответствовал техническим характеристикам промышленной установки: v_d от 0,02 до 0,012 м/с (время литья τ_d от 15 до 25 с), T_p – от 2042 до 2192 К, q_b – от 100 до 600 кВт/м². Параметр q_b принимается пропорциональным задаваемой в моделях величине коэффициента $K_{тп}$, который изменялся в диапазоне от 200 до 3500 Вт/(м²·К). Отметим, что, изменяя расход воды в установке, можно управлять плотностью теплового потока q_b на охлаждаемой внешней поверхности изложницы и, соответственно, процессом кристаллизации. Теплофизические свойства платины принимались по данным [5].

На рис. 3,а показано температурное поле отливки, полученное в базовом варианте расчета, соответствующем промышленным условиям: $v_d = 0,02$ м/с ($\tau_d = 15$ с); $T_p = 2092$ К; $q_b = 100$ кВт/м². Видно, что фронт кристаллизации значительно смещен вниз ко дну изложницы, что является основным признаком возникновения усадочной раковины.

Проведена оценка влияния каждого из исследуемых режимных параметров (при фиксировании двух других) на тепловое состояние процесса литья. Установлено существенное влияние изменения всех трех параметров и, как следствие, температурно-временных условий на расположение фронта кристаллизации и возникновение поверхностных и внутренних дефектов в слитке платины. Так, например, анализ температурных полей при увеличении T_p и v_d свидетельствует о вероятности возрастания усадки отливки и возникновения горячих трещин. При этом увеличение скорости отвода теплоты в верхней части изложницы за счет интенсификации величины q_b выравнивает скорость кристаллизации по высоте расчетного сечения слитка и соответственно уменьшает величину усадочной раковины. Отметим, что характер влияния исследуемых режимных параметров хорошо согласуется с имеющимися теоретическими положениями и опытом литья цветных металлов [6].

Серией расчетов установлены температурно-временные условия литейного процесса, снижающие вероятность образования брака в виде значительной усадочной полости отливки

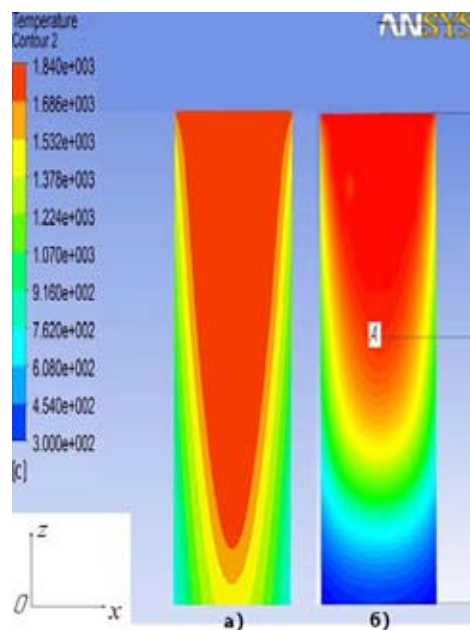


Рис. 3. Температурное поле в расчетном сечении отливки при времени слива 15 с (а) и 20 с (б)

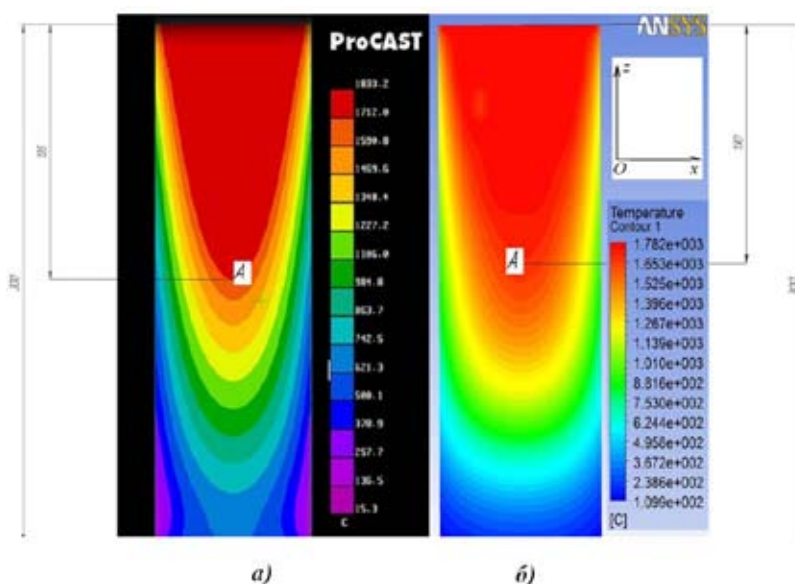


Рис. 4. Температурное поле в расчетном сечении отливки по окончании слива расплава

(рис. 3,б). При этом определено следующее оптимальное сочетание режимных параметров литья платины: $v_{\text{л}} = 0,016$ м/с ($\tau_{\text{л}} = 20$ с); $T_{\text{п}} = 2112$ К; $q_{\text{в}} = 600$ кВт/м².

Проведена оценка степени адекватности результатов тепловых расчетов, полученных в моделях ANSYS и ProCAST. Установлено, что характер и численные значения температурных полей в обеих моделях оказались достаточно близки (рис. 4). Так, например, в моделях получен

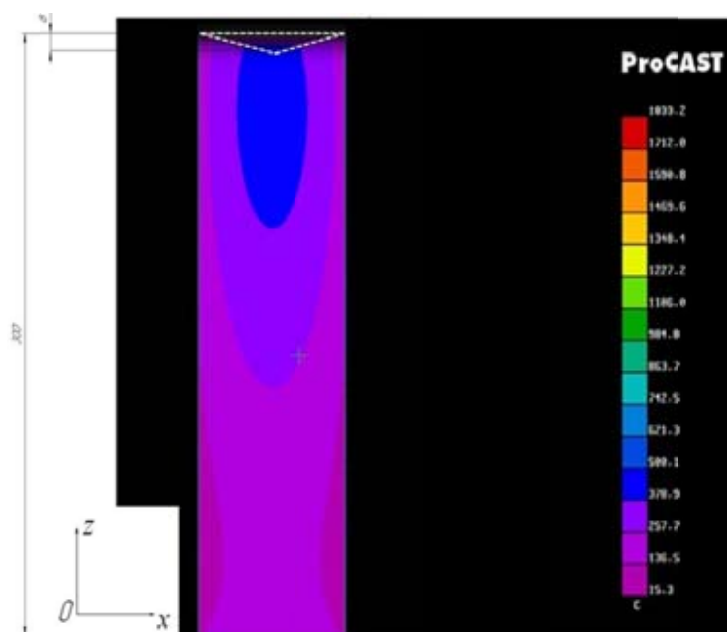


Рис. 5. Температурное поле в расчетном сечении отливки и величина усадочной раковины после выдержки слитка в кристаллизаторе

ярко выраженный параболический характер распределения температурного поля в сечении отливки *ZOX* по окончании слива. При этом координаты точки «А» по оси *OZ*, лежащей на изотерме жидкого металла 2003 К, относительно верхнего среза слитка отличаются в моделях на 0,005 м (см. рис. 4).

Дальнейшая оценка литейного процесса проведена с использованием компьютерной модели ProCAST, где наряду с тепловым расчетом определялись размеры усадочной раковины и вероятность возникновения пор в объеме слитка. Установлено, что при выбранных режимных параметрах литья поверхностных и внутренних дефектов отливки платины не обнаружено. Величина усадочной раковины не превышает 3 % от объема слитка. На рис. 5 белой пунктирной линией обозначена зона возникновения усадочной раковины, глубина лунки которой равна 8 мм.

Заключение

На основе программных комплексов ANSYS и ProCAST разработаны компьютерные модели литья платины в промышленной установке. Сравнительный анализ полученных температурных полей в отливках показал хорошую сходимость в моделях результатов решения тепловой задачи.

Изучено влияние режимных параметров работы литейной установки на процесс получения слитков: скорость литья или движения дна изложницы, температура перегрева расплава и интенсивность охлаждения изложницы. В результате исследования температурно-временных зависимостей установлено оптимальное сочетание технологических режимов литья, позволяющее исключить поверхностные и внутренние дефекты, а также снизить величину усадочной раковины в готовых слитках платины.

Список литературы

- [1] Андронов В.П. Плавильно-литейное производство драгоценных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1974. 320 с.
- [2] Самойлович Ю.А. Формирование слитка. М: Металлургия, 1977. 160 с.
- [3] Лисиенко В.Г., Самойлович Ю.А. Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок: учебное пособие. Красноярск: Изд-во КГУ, 1986. 120 с.
- [4] Шестаков Г.Н. // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2011. 17 с.
- [5] Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочное изд. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
- [6] Баландин Г. Ф. Теория формирования отливки. Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки: учебник для вузов. М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 360 с.

Computer Simulation and Optimization Casting Process Ingot Platinum

**Alexander P. Skuratov^a,
Dmitry I. Makhov^a and Yevgeny A. Pavlov^b**

^a*Siberian Federal University,
79 Svobodny Str., Krasnoyarsk, 660041, Russia*

^b*Krastsvetmet
1 Transportny Proezd, Krasnoyarsk, 660027, Russia*

On the basis of ANSYS software complexes and ProCAST developed computer model casting platinum in a water cooled mold with movable bottom. We studied the influence of operating parameters of work of the foundry installation on the crystallization of ingots. Installed quantitative dependences allowing to reduce the magnitude of the shrink shell, and also exclude the surface and internal defects in the ready ingot platinum.

Keywords: computer model casting, software packages ANSYS and ProCAST, platinum ingots, a water cooled mold, mobile bottom, the regime parameters, shrink shell.
