

40 лет ИТМ НАН Беларуси

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ПУМПУР, В. М. ИЛЬЮШЕНКО,
К. Э. БАРАНОВСКИЙ, ИТМ НАН Беларуси

УДК 519:669.27

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ОТЛИВКИ ИЗ ИЧХ ПРИ ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ, ПЕСЧАНУЮ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ФОРМЫ

The comparative analysis of hardening of ingot of abrasion-resistant chromic iron in chill, sand and combination molds is carried out according to the results of mathematical and computer calculations.

Литые детали из износостойких хромистых чугунов (ИЧХ) широко используются в рабочих органах машин дробильно-размольного оборудования. Они работают в условиях интенсивного ударно-абразивного воздействия с перерабатываемым минеральным сырьем и быстро изнашиваются. Отливки из ИЧХ в основном изготавливают методом литья в песчаные формы. Срок эксплуатации изготовленных таким образом деталей непродолжителен. Поэтому повышение ресурса работы литых деталей из ИЧХ является актуальным.

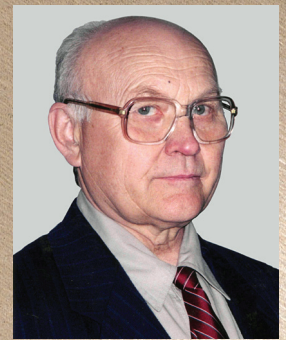
Одно из перспективных направлений решения этой проблемы – разработка новых технологий получения отливок из ИЧХ в кокилях [1], а также комбинированных формах, стенки которых частично выполнены из песчаной смеси, а частично из металла [2]. В таких формах условия теплообмена частей отливки, контактирующих с металлическими или песчаными стенками, существенно отличаются. Это позволяет получать литую деталь со специальными физическими и эксплуатационными свойствами на тех участках, которые подвергаются наиболее интенсивному износу.

Разработка технологии получения отливок из ИЧХ в кокилях и комбинированных формах требует проведения исследований по изучению теплообмена отливки с формой для оценки скоростей ее затвердевания на металлических и песчаных поверхностях форм, интенсивности охлаждения залитого расплава, а также затвердевающей отливки до момента выбивки.

Целью настоящей работы является определение основных закономерностей затвердевания и охлаждения отливок из ИЧХ в кокиле и комбинированных формах, а также сравнительный анализ параметров их формирования с отливкой, полученной в песчаной форме из ХТС. Для решения этих задач проведено компьютерное моделирование теплообмена при затвердевании и охлаждении отливки в кокиле, песчаной и комбинированных формах.

Примем, что отливка затвердевает в форме, образованной пластинами 1–3 одинаковой толщины, которые создают полость отливки 4 (рис. 1). На границах расчетных областей теплообмен происходит при граничных условиях третьего рода с постоянными коэффициентами теплообмена.

С учетом сделанных допущений разработана математическая модель теплообмена при формировании отливки в виде длинномерного бруса прямоугольного сечения.



Барановский Э. Ф.



Пумпур В. А.



Ильюшенко В. М.



Барановский К. Э.

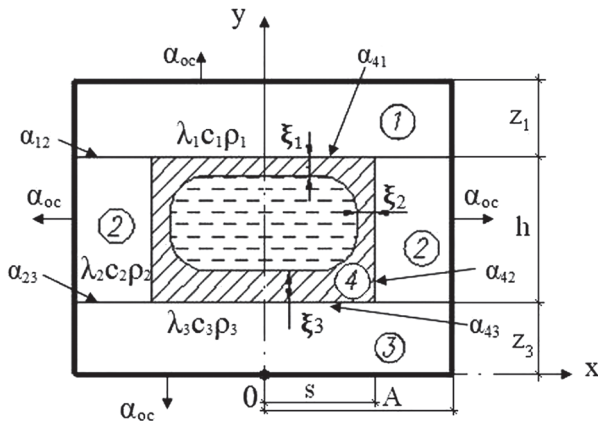


Рис. 1. Расчетные области и граничные условия теплообмена при затвердевании прямоугольного бруса в форме из пластин 1, 2 и 3, образующих контур отливки 4: α_{12}, α_{23} – коэффициенты теплообмена между элементами формы; $\alpha_{41}, \alpha_{42}, \alpha_{43}$ – коэффициенты теплообмена отливки 4 со стенками формы; α_{oc} – коэффициент теплообмена стенок формы с окружающей средой

Уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (1)$$

где ρ_i, c_i, λ_i – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала для i -й расчетной области; T_i – температурное поле для i -й расчетной области.

Начальные условия на момент заполнения расплавом формы:

$$\begin{aligned} T_1 \Big|_{\tau=0} &= T_{01}, \quad T_2 \Big|_{\tau=0} = T_{02}, \\ T_3 \Big|_{\tau=0} &= T_{03}, \quad T_4 \Big|_{\tau=0} = T_{зал}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_{зал}$ – температура заливки расплава в форму; T_{01}, T_{02}, T_{03} – соответственно начальные температуры крышки, боковой стенки и дна формы.

Граничные условия вдоль оси Ox имеют следующий вид:

на оси симметрии при $x = 0$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad (3)$$

на границе контакта отливки и рабочей поверхности боковой стенки формы

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=s} = \alpha_{42}(T_4 - T_2), \quad (4)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=s} = \alpha_{42}(T_4 - T_2);$$

на наружной поверхности элементов формы с окружающей средой

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=A} &= \alpha_{oc}(T_1 - T_{oc}), \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=A} &= \alpha_{oc}(T_2 - T_{oc}), \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=A} &= \alpha_{oc}(T_3 - T_{oc}). \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия вдоль оси Oy имеют следующий вид:

на внешней поверхности дна формы 3

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (6)$$

на границе контакта отливки и поверхности дна формы

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=z_3} = \alpha_{43}(T_4 - T_3), \quad (7)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=z_3} = \alpha_{43}(T_4 - T_3);$$

на границе контакта отливки и поверхности крышки формы 1

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=z_3+h} = \alpha_{41}(T_4 - T_1), \quad (8)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=z_3+h} = \alpha_{41}(T_4 - T_1);$$

на внешней поверхности крышки формы с окружающей средой

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=z_3+h+z_1} = \alpha_{oc}(T_1 - T_{oc}). \quad (9)$$

В рассмотренной системе уравнений введены следующие обозначения: T_{oc} – температура окружающей среды; α_{12}, α_{23} – коэффициенты теплообмена между элементами комбинированной формы; $\alpha_{41}, \alpha_{42}, \alpha_{43}$ – коэффициенты теплообмена отливки 4 с соответствующими элементами комбинированной формы; α_{oc} – коэффициент теплообмена формы с окружающей средой.

Тепловыделение при кристаллизации сплава учитывали путем введения эффективной теплоемкости двухфазной зоны [3]:

$$c_{\text{Э}}(T_4) = \begin{cases} c_T(T_4), & T_4 < T_c, \\ c_T(T_4) - L \frac{\partial \psi}{\partial T_4}, & T_c \leq T_4 \leq T_L, \\ c_{\text{ж}}(T_4), & T_4 > T_L, \end{cases} \quad (10)$$

где $c_T(T_4)$, $c_{ж}(T_4)$ – теплоемкость твердой и жидкой фаз отливки; $\partial\Psi / \partial T_4$ – темп кристаллизации; ψ – доля твердой фазы в двухфазной зоне (по квазиравновесной модели); L – удельная скрытая теплота кристаллизации; T_c , T_l – соответственно температура солидуса и ликвидуса.

Решение задачи (1)–(10) осуществляли методом конечных разностей по неявной схеме с использованием прямой и обратной прогонки для определения температурных полей для каждой из расчетных областей [4].

Математическая модель (1)–(10) и разработанный программный комплекс для расчета затвердевания и охлаждения прямоугольной длинномерной отливки в металлической, комбинированных и песчаной формах использованы для изучения теплообмена при формировании и охлаждении отливки из ИЧХ в виде бруса сечением 85×85 мм, который применяется как отбойная плита в центробежных мельницах для размолва песка и другого минерального сырья. Расчеты выполнены для трех вариантов комбинированных форм, а также для случая затвердевания и охлаждения отливки в чугунном кокиле и песчаной форме из ХТС. Принято, что формы состоят из отдельных стенок толщиной 50 мм и между ними происходит контактный теплообмен с заданной величиной интенсивности.

Расчеты проводили для случая мгновенного заполнения формы расплавом ИЧХ при температуре 1450 °С. Температура ликвидуса расплава составляла 1250 °С, а температура солидуса – 1200 °С. Кокиль и металлические стенки комбинированных форм выполнены из серого чугуна, а песчаная форма и неметаллические стенки комбинированных форм – из холоднотвердеющей смеси. Начальная температура всех видов форм принята равной 100 °С. Интенсивность контактного теплообмена

между отливкой, рабочими поверхностями кокиля и металлическими стенками комбинированных форм α_{4i} принята равной термической проводимости кокильной краски толщиной 0,4 мм с $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К), т. е. $\alpha_{4i} = 1000$ Вт/(м²·К). Коэффициент конвективного теплообмена элементов комбинированной формы с окружающей средой (воздух) $\alpha_{oc} = 30$ Вт/(м²·К). Коэффициенты теплообмена α_{12} и α_{23} в контактных зонах металлических стенок приняты равными 500 Вт/(м²·К), между металлической и песчаной стенкой – 150, а между песчаными стенками 70 Вт/(м²·К).

Вывод результатов численных экспериментов осуществляли по определению максимальных, минимальных и средних значений температур расплава, затвердевающих корок отливки, стенок формы; доли твердой фазы ψ , %, в отливке по мере ее образования; толщины затвердевшей корки ξ , образующейся на рабочих поверхностях формы в процессе затвердевания; толщины корки $\xi_{ц}$ и скорости ее роста $d\xi_{ц}/dt$ на центральных участках рабочих поверхностей стенок формы.

Время снятия перегрева τ_p определяли от момента контакта расплава со стенками формы до его охлаждения ниже температуры ликвидуса во всем объеме отливки. Время затвердевания отливки $\tau_{кр}$ принято от момента контакта расплава с рабочей поверхностью формы до охлаждения отливки ниже температуры солидуса во всем объеме.

Обобщенные результаты расчета теплообмена при формировании отливки из ИЧХ в чугунном кокиле, трех типах комбинированных форм и форме из ХТС приведены в таблице.

Охлаждение перегретого расплава происходит со скоростью, среднее значение которой в форме из ХТС составляет 0,53 К/с, в кокиле – 4,9, а в комбинированных формах – от 2 до 4 К/с. Не-

Расчетные значения параметров формирования отливки из ИЧХ в чугунной, песчаной и комбинированных формах

Номер типа формы	Тип формы	Время полного затвердевания отливки $\tau_{кр}$, с	Время охлаждения перегретого расплава в форме τ_p , с	Время охлаждения отливки в форме до 700 °С, τ , с	Скорость охлаждения перегретого расплава S_p , К/с	Скорость затвердевания отливки на стенках формы U , мм/с		Скорость образования твердой фазы в отливке $d\psi/d\tau$, %/с	Скорость охлаждения отливки в диапазоне температур 800–700 °С S_{oc} , К/с
						песчаной	чугунной		
1	Чугунный кокиль	196,5	40,6	374	6,5–3	–	0,42–0,29	1,9–0,56	1,8–1,6
2	Комбинированная: стенка 1 – ХТС, стенки 2 и 3 – чугун	248	50,4	520	4,6–2	0,15–0,06	0,39–0,22	1,7–0,46	1,6–1,45
3	Комбинированная: стенка 2 – ХТС, стенки 1 и 3 – чугун	271	61,9	980	3,4–1,9	0,12–0,05	0,31–0,2	1,5–0,42	0,37–0,3
4	Комбинированная: стенки 1 и 2 – ХТС, стенка 3 – чугун	521	108	1460	2,5–1,6	0,08–0,06	0,27–0,16	0,54–0,16	0,23–0,19
5	Песчаная (ХТС)	1508	382	6900	0,65–0,48	0,046–0,0247	–	0,11–0,05	0,07–0,065

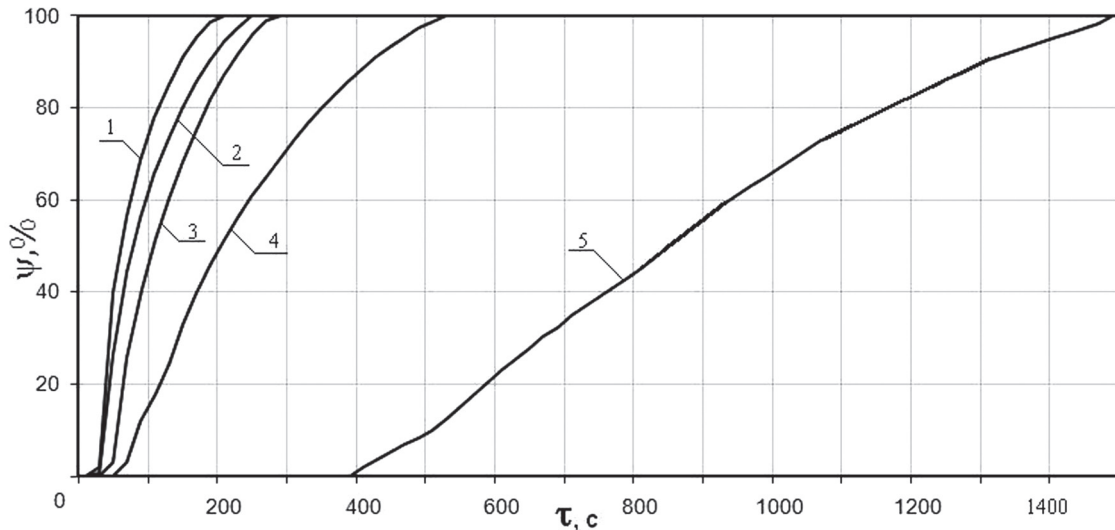


Рис. 2. Кинетика образования твердой фазы ψ , %, от объема отливки из ИЧХ в формах 1–5 типов (см. таблицу)

посредственно у металлических стенок комбинированных форм интенсивность охлаждения расплава в 1,3–1,5 раза выше, чем ее среднее значение для отливки.

Более высокие скорости охлаждения расплава в кокиле и комбинированных формах по сравнению с песчаной создают благоприятные условия для увеличения числа центров кристаллизации в расплаве, формирования структуры отливки с более мелкими зёрнами металлической матрицы и карбидной фазы, повышения плотности литого металла.

Затвердевание отливки является важнейшим параметром, определяющим формирование ее кристаллического строения и свойств. На рис. 2 приведены результаты расчета кинетики образования твердой фазы во всем объеме затвердевающей отливки ψ , %, на протяжении всего периода кристаллизации расплава в форме.

Характерной особенностью затвердевания отливки в кокиле и комбинированных формах является то, что образование твердой фазы в отливке начинается значительно раньше, чем расплав во всем рабочем пространстве формы охладится ниже температу-

ры ликвидуса $T_{л}$, т. е. при наличии в форме перегретого расплава. Так, на момент полного охлаждения перегретого расплава в кокиле (40,6 с) образуется почти 41% твердой фазы ψ , а в комбинированных формах типа 2, 3 и 4 величина ψ составляет 36, 25,4 и 17,8% соответственно. В песчаной форме полностью затвердевшая корка появляется практически только после полного снятия перегрева.

Скорость образования твердой фазы $d\psi/dt$ во всех случаях уменьшается по мере роста продолжительности охлаждения отливки. Скорость образования твердой фазы в кокиле в первые 30 с теплообмена составляет 1,9 %/с, а в конце затвердевания уменьшается до 0,56 %/с. В комбинированных формах интенсивность образования твердой фазы зависит от соотношения количества металлических и песчаных стенок формы. Так, для формы, у которой металлическим является только дно, интенсивность затвердевания почти в 3 раза ниже, чем в форме, где всего одна песчаная стенка. Скорость образования твердой фазы в песчаной форме составляет 0,11–0,05 %/с, что в 11–17 раз меньше, чем в кокиле.

Рост корки на стенках кокиля, а также на металлических и песчаных стенках комбинированных

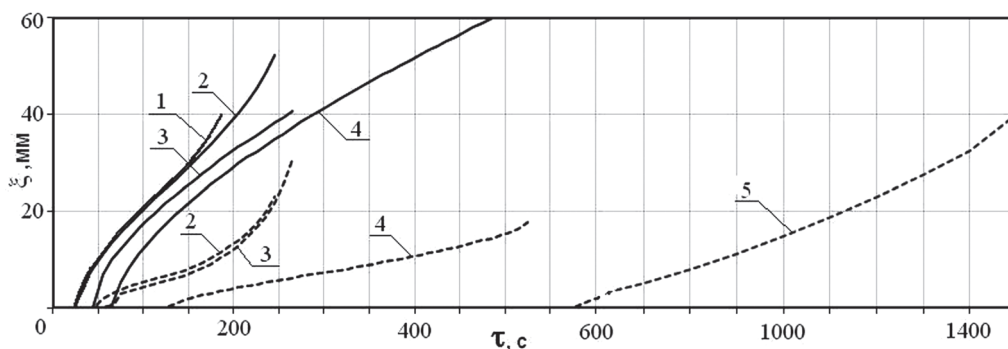


Рис. 3. Рост корок ИЧХ при затвердевании в формах 1–5 типов на поверхностях стенок из чугуна (сплошная линия) и ХТС (штриховая линия)

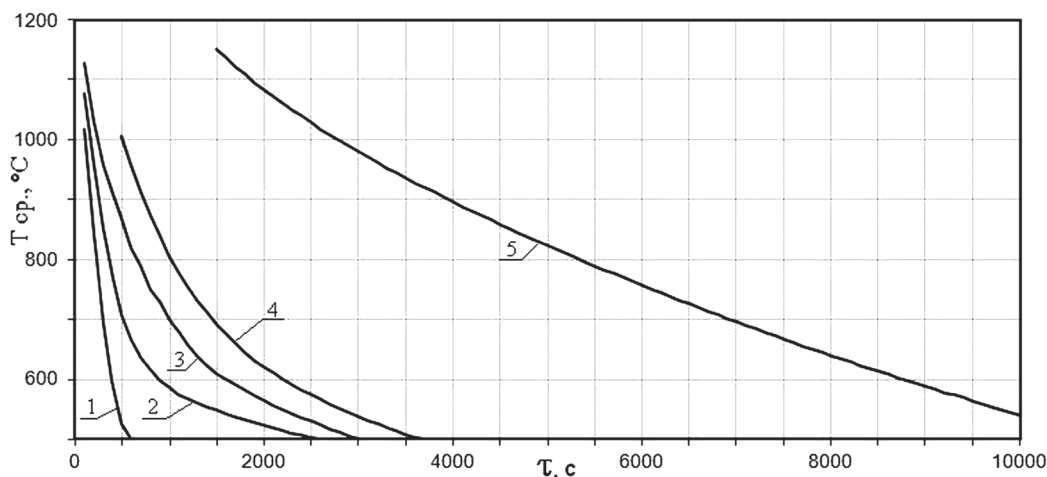


Рис. 4. Изменение средней температуры отливки из ИЧХ при охлаждении в формах 1–5 типов

форм происходит неравномерно по оси OX (см. рис. 1). На рис. 3 приведены результаты расчетов толщин корок, намерзших в центральной зоне поверхности стенок формы ($X = 0$). Рост корки начинается через некоторый промежуток времени после контакта расплава с поверхностью формы при охлаждении его до температуры солидуса. На стенках кокиля корка начинает образовываться через 25 с, а на металлических стенках комбинированных форм в зависимости от соотношения количества металлических и песчаных стенок — через 25, 48 и 70 с для типов форм 2, 3 и 4 соответственно. На песчаных стенках этих форм затвердевание корок начинается через 50, 70 и 130 с соответственно. Образование затвердевшей корки на стенках песчаной формы начинается только через 560 с, когда в объеме отливки содержится около 18% твердой фазы.

Скорости затвердевания корок на металлических стенках кокиля и комбинированных форм на начальной стадии затвердевания отличаются в меньшей степени, чем на завершающей. В частности, корка толщиной 10 мм образуется на поверхности кокиля и металлических стенках комбинированных форм за 50–100 с со средней скоростью 0,4–0,29 мм/с. Затем неравномерность скоростей роста корок возрастает. Затвердевание отливки на песчаных стенках комбинированных форм начинается позже, чем на металлических и с более низкими скоростями. Так, затвердевание корки толщиной 10 мм на песчаных стенках таких форм происходит со средней скоростью 0,095; 0,08 и 0,047 мм/с для типов форм 2, 3 и 4 соответственно. Следует отметить, что интенсивность роста корки на песчаных стенках комбинированных форм в 1,3–1,7 раза выше, чем в песчаной форме, так как при взаимодействии с металлическими стенками формы температура расплава быстро понижается. Рост корки на стенках формы из

ХТС начинается только через 200 с после снятия перегрева (рис. 3) и происходит при наличии большого количества твердой фазы в расплаве со скоростью в 4–9 раз меньшей скорости затвердевания на металлических стенках комбинированных форм.

Охлаждение затвердевшей отливки в форме. На рис. 4 показано изменение средней калориметрической температуры $T_{ср}$ затвердевшей отливки при охлаждении в форме до 500 °C. Скорость охлаждения отливки в кокиле непосредственно после затвердевания составляет около 2 °C/с, а в песчаной форме — около 0,5 °C/с. В интервале температур 800–700 °C скорость охлаждения отливки в кокиле в 25 раз выше, чем в земляной форме. В комбинированных формах типов 2, 3 и 4 интенсивность охлаждения отливки в интервале температур 800–700 °C в 12,8, 5,3 и 3,3 раз выше, чем в форме из ХТС.

Таким образом, проведенное математическое моделирование и компьютерные расчеты теплообмена отливки из хромистого чугуна в кокилях, комбинированных и песчаной формах позволили определить основные параметры ее затвердевания и охлаждения. Установлено, что в кокиле и комбинированных формах значительная часть отливки затвердевает при наличии в ней перегретого расплава, а в песчаной форме твердая корка образуется после снятия перегрева из расплава, содержащего в значительных количествах твердо-жидкую фазу. Скорость затвердевания отливки в кокиле превышает скорость затвердевания в песчаной форме в 7–9 раз. Скорость затвердевания отливки в комбинированных формах больше, чем в песчаной. Она зависит от соотношения числа металлических и песчаных стенок в форме. На металлических стенках скорость затвердевания в 3–7 раз, а на песчаных стенках в 1,3–1,7 раза больше, чем

в песчаной форме. Скорость охлаждения затвердевшей отливки в диапазоне температур 800–700 °С в песчаной форме ниже, чем в кокиле почти в 25 раз, а в комбинированных – от 4 до 17 раз.

Методика и результаты проведенных исследований используются при разработке технологических регламентов литья деталей из ИЧХ с повышенным ресурсом работы.

Литература

1. Барановский К. Э., Ильюшенко В. М., Станюленис Ю. Л. Литье деталей из износостойких хромистых чугунов для центробежных мельниц в комбинированные формы и кокили // *Литье и металлургия*. 2009. № 3. С. 162–164.
2. Анисович Г. А., Жакин Н. П. Охлаждение отливки в комбинированной форме. М.: Машиностроение, 1969.
3. Кац А. М., Шадек Е. Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков литых металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.
4. Самарский А. А. Введение в численные методы. М.: Высш. шк., 1987.