УДК 621.74

В.М. Ломакін, доц., канд. техн. наук, В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, О.В. Кузик, канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
E-mail: vik284333@gmail.com
В.І. Дубодєлов, проф., д-р техн. наук, М.С. Горюк, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, м. Київ, Україна

Дослідження процесу затвердіння та прогнозування структури литих чавунних молольних тіл

Розглядається використання методу скінченних елементів для чисельного розрахунку процесу затвердіння виливків молольних тіл циліндричної і сферичної форми в кокілі в залежності від хімічного складу сплаву та для прогнозування співвідношення між кількістю ледебуриту, що визначає зносостійкість молольних тіл, та кількістю аустеніто-графітної евтектики
цильпебс, лита куля, легований чавун, хром, кокіль, затвердіння, структура, моделювання

В.Н. Ломакин, доц., канд. техн. наук, В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук, А.В. Кузык, канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
В.И. Дубодєлов, проф., д-р техн. наук, М.С. Горюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

Исследование процесса затвердевания и прогнозирование структуры литых чугунных мелющих тел

Рассматривается использование метода конечных элементов для численного расчета процесса затвердевания отливок мелющих тел цилиндрической и сферической формы в кокиле в зависимости от химического состава сплава и для прогнозирования соотношение между количеством ледебурита, что определяет износостойкость мелющих тел, и количеством аустенито-графитный эвтектики
цильпебс, литой шар, легированный чугун, хром, кокиль, затвердевание, структура, моделирование

Постановка проблеми. Молольні тіла (МТ), що складають, по деяким оцінкам, до 3% від усього обсягу світового виробництва металопродукції, піддаються багаторазовим ударним навантаженням і активному абразивному зносу. Тому, до матеріалу МТ пред'являються дві взаємовиключних вимоги. Він має характеризуватися високою твердістю (50…60 HRC), оскільки стикається з високоміцною породою, а з іншого боку – в’язкістю, яка, здебільшого, визначає ударостійкість МТ.

Виробництво сталевих МТ, що включає їх пластичну деформацію, очевидно, малоперспективно з огляду структури, яку можна отримати в сталях. Низьковуглецеві сталі – добре деформуємі сплави, але ці сталі практично не загартовуються на мартенсит. Для МТ з такого матеріалу характерна висока ударостійкість, але низька зносостійкість. Високовуглецеві леговані сталі можна досить легко загартувати на мартенсит, але вони важко деформуються. Досить широке використання сталевих МТ, незважаючи на їх низькі експлуатаційні властивості, обумовлено кон'юнктурою ринку і відносно низькою вартістю на них [1].

© В.М. Ломакін, В.В. Клименко, В.В. Пукалов, О.В. Кузик, В.І. Дубодєлов, М.С. Горюк 2018

Зносостійкість білих чавунів в 2-5 разів вище, ніж сталей через значний вміст в структурі цементиту і спеціальних карбідів. Однак, МТ зі звичайних білих чавунів не відповідають вимогам по ударостійкості. Підвищення цієї важливої експлуатаційної властивості, при збереженні зносостійкості, досягають високим легуванням чавунів хромом, до 30%, що різко підвищує собівартість продукції.

Таким чином, розробка відносно дешевого, зносостійкого та ударостійкого матеріалу для МТ є проблемним питанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з останніми дослідженнями МТ із високохромистиого білого чавуну економні тільки при твердості подрібнюваного мінералу не більше 6 по Моосу (приблизно HV 470). Саме тому МТ і футеровки млинів із такого матеріалу широко застосовуються в цементній промисловості. Для підвищення в'язкості високохромитого чавуну необхідно проводити термообробку МТ. Ця обставина, а також дорожнеча і дефіцитність легуючих елементів змусили відмовитися від такого матеріалу на користь низьколегованого білого чавуну.

По впливу основних компонентів такого сплаву на властивості МТ можна зазначити таку коротку характеристику:

- вуглець збільшує ударостійкість, твердість і зносостійкість МТ; підвищує схильність до графітизації і до отримання структури половинчастого чавуну МТ, зменшуючи їх схильність до відбілу; збільшує вміст ледебуриту і зменшує кількість перліту в мікроструктурі;
- кремній збільшує ударостійкість, але знижує твердість і зносостійкість МТ; різко підвищує схильність до графітизації і отримання структури половинчастого чавуну, зменшуючи схильність до відбілу; знижує вміст ледебуриту і збільшує вміст перліту в мікроструктурі;
- марганець різко збільшує твердість і зносостійкість МТ. Знижує схильність до графітизації і отримання структури половинчастого чавуну.

Саме на підставі зазначеного для дослідження було прийнято експериментальний, половинчастий чавун (3-3.9% C, 2.8-4% Si, 0.6-1.2% Mn; до 0.03% P, до 0,02% S) з порівняно високим вмістом кремнію для графітизації чавуну в центральній частині виливка і підвищення ударостійкості МТ. Разом з цим для утворення карбідної фази і забезпечення зносостійкості МТ запропоновано додавати хром у кількості 0,8-1,0%.

Постановка завдання. Найбільш простою і дешевою є технологія отримання структури половинчастого (або білого) чавуну – литтям в кокіль. Але при цьому внаслідок явно вираженого напрямку тепловідведення і високої швидкості охолодження розплаву зазвичай виникає транскристалізація МТ. Ця особливість різко знижує ударостійкість чавунних МТ. Зважаючи, що при зменшенні маси (і об’єму) МТ на половину розмелювальна властивість значною мірою втрачається, то задачею дослідження було розрахунок кінетики кристалізації і визначення раціонального режиму охолодження виливків МТ циліндричної (цильпебс) і сферичної (куля) форми в кокілі для забезпечення при кристалізації поверхневого зносостійкого вибіленого шару не більше третини розміру (або радіусу кулі) від поверхні тіла.

Виклад основного матеріалу. Основним процесом структуроутворення виливків МТ в кокілі є тепловий процес при кристалізації. Рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат для тіла цильпебса має вигляд [2]:

$$c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}], \quad (1)$$

де r – радіус-вектор, м;
τ – час, с;
T – температура, град, функція r і τ;
ρ – густина сплаву, кг/м^3;
$c(T)$ – теплоємність сплаву, Дж/(кг·град);
λ – коефіцієнт теплопровідності сплаву, Вт/(м×град).
Граничні умови:
при r=0 – умова симетричного охолодження в центральній частині виливка

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0; \tag{2}$$

при $r = R_0$ (радіус циліндру) прийнято конвективну тепловіддачу з поверхні виливка

$$-\lambda \frac{\partial T_0}{\partial r} = \alpha[T_0 - T_c], \tag{3}$$

де T_0 – температура на поверхні тіла циліндру, град;
T_c – температура навколишнього середовища (ливарної форми), град;
α – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м^2×град);
Помноживши вирази (1) та (3) на варіацію температури δT, та інтегруючи, відповідно, по об'єму тіла V та його поверхні S після складання отримаємо:

$$\int_V \left[c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \delta T + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \delta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi + \int_S \alpha[T_0 - T_c]\delta T \cdot R_0 \cdot dz \cdot d\varphi = 0, \tag{4}$$

де $(r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi) = dV$ – елементарний об'єм циліндру на відстані r від початку координат, м^3;
$(R_0 \cdot dz \cdot d\varphi) = dS$ –- елемент поверхні циліндру, м^2;
dr – диференціал координати r, м;
dz – диференціал координати z (по довжині l циліндру), м;
$d\varphi$ –- зміна кута, рад.

Якщо винести варіацію δ за знаки інтегралів в (4) отримаємо **варіаційне рівняння теплопровідності**:

$$\delta \int_V \left[c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} T + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \right] \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi + \delta \int_S \alpha[\frac{T_0}{2} - T_c]T_0 \cdot R_0 \cdot dz \cdot d\varphi = 0. \tag{5}$$

І, остаточно, враховуючи симетрію температурного поля, та зважаючи, що температура циліндру не змінюється вздовж осі z:

$$\delta\left\{2\pi\cdot l\cdot\int_r\left[c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial\tau}T+\frac{\lambda}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2\right]\cdot r\cdot dr\right\}+\delta\left\{2\pi\cdot R_0\cdot l\cdot\alpha[\frac{T_0}{2}-T_c]T_0\right\}=0, \qquad (6)$$

де під знаком варіації маємо функціонал теплопровідності I для виливка циліндричної форми:

$$I=\pi\cdot l\int_r\left[2c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial\tau}T+\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2\right]\cdot r\cdot dr+\pi\cdot R_0\cdot l\cdot\alpha[T_0-2T_c]T_0. \qquad (7)$$

Таким чином, замість задачі (1), (2) і (3) ставиться еквівалентна задача пошуку мінімуму функціоналу I (7). Очевидно, такий пошук має здійснюватися у класі неперервних і двічі диференційованих функцій T. При цьому можна показати (рівняння Ейлєра [3]) , що функція T, при якій функціонал I приймає мінімальне значення, і є істинним розподілом температури в тілі циліндру та задовольняє рівнянню процесу (1):

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial I}{\partial T'}\right)-\frac{\partial I}{\partial T}=0. \qquad (8)$$

Для МТ у вигляді сфери (куля) рівняння процесу теплопровідності має вигляд [2]:

$$c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial\tau}=\lambda[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}]. \qquad (9)$$

Для сукупності виразів (9), (2) та (3) аналогічним чином можна отримати функціонал теплопровідності для виливка сферичної форми:

$$I=\pi^2\int_r\left[4c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial\tau}T+2\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2\right]\cdot r^2\cdot dr+2\pi^2R_0^2\alpha[T_0-2T_c]T_0, \qquad (10)$$

де $\left(r^2\cdot dr\cdot d\varphi\cdot d\theta\right)=dV$ – елементарний об'єм кулі на відстані r від початку координат, м^3;

R_0 – радіус кулі;

$(R_0^2\cdot d\varphi\cdot d\theta)=dS$ – елемент поверхні кулі, м^2;

dr – диференціал координати r, м;

$d\varphi$ – зміна кута, рад;

$d\theta$ – зміна кута, рад.

Процес кристалізації рідкого чавуну характерний наявністю фазових перетворень. Для розрахунку саме такого процесу для тіл циліндричної та сферичної форми в кокілі теплоємність матеріалу виливка $c(T)$ було замінено “згладженою” або ефективною спектральною (в інтервалі температур “ліквідус-слідус”) вличиною $\bar{c}(T)$:

$$\bar{c}(T) = \begin{cases} c_p, T > T_L; \\ \dfrac{c_p + c_T}{2} + \dfrac{L}{T_L - T_S}, T_S < T < T_L \\ c_T, T < T_S] \end{cases}, \qquad (11)$$

де c_p – теплоємність рідкого чавуну, Дж/(кг·град);

c_T – теплоємність твердого чавуну, Дж/(кг·град);

L – питома теплота кристалізації, Дж/кг;

T_L – температура ліквідус, град;

T_S – температура солідус, град.

Як слідує з (11) вводиться лінійний розподіл теплоти фазового перетворення, що виділяється зі сплаву при кристалізації в двохфазній твердо-рідкій частині виливка в інтервалі температур “ліквідус-слідус”. Криві зміни температур “ліквідус” та ”слідус” на відповідній діаграмі стану замінюються прямими лініями. Хімічний склад чавуну враховували адитивно в теплофізичних константах.

Іншим важливим моментом було врахування термічного впливу стінки кокілю. Математичні формулювання теплових задач для тіл циліндричної (7), (11) і сферичної форми виливка (10), (11) ігнорують теплопередачу через стінку кокілю. Проте такий вплив врахували опосередковано, через величини T_c і α. В якості T_c прийнято середню за технологічний цикл температуру кокілю (згідно з промисловими випробуваннями). Коефіцієнт конвективної тепловіддачі від розплаву до ливарної форми, α, залежить від великої кількості чинників. Згідно з класичними роботами по теорії затвердіння [4], [5] його визначали як ефективний параметр:

$$\alpha = \frac{\lambda_\phi}{\varepsilon}, \qquad (12)$$

де λ_ϕ – коефіцієнт теплопровідності кокільної вогнетривкої фарби, Вт/(м×град);

ε – товщина шару кокільної фарби, м.

Згідно з формалізованою постановкою задачі затвердіння МТ функціонали (7) та (10) мінімізували чисельним методом **скінченних елементів**. Для цього було розроблено алгоритм, блок-схему та програму чисельного розрахунку на персональному комп'ютері температурного поля та кінетики кристалізації виливків МТ в кокілі. Тіло виливків молольних циліндру та кулі було розбито на скінченні елементи різної довжини. По мірі наближення до граничної поверхні контакту виливка з стінкою кокілю довжина скінченних елементів зменшувалась і в приграничній області становила 1 мм.

Як видно на рис. 1 спочатку виливок охолоджується до температури початку кристалізації. Потім відбувається кристалізація в інтервалі темератур “ліквідус”-“солідус”. Кристалізація виливка закінчується після заповнення ливарної форми через 250-300 сек. Потім твердий виливок охолоджується до температури вибивки з кокілю.

З метою прогнозування структури металу в чавунних цильпебсах Ø25 мм і в чавунних кулях Ø30 мм із легованого чавуну розраховували розподіл лінійної швидкості затвердіння по перерізу виливків.

Отримані дані вказують на неоднорідність розподілу лінійної швидкості затвердіння по перерізу литих виробів. На початку процесу фронт солідусу має відносно високу швидкість (0,08 мм/сек), яка стрімко зменшується при збільшенні товщини кірки. Далі, з плином часу, товщина двохфазної зони поступово зменшується і в центральній частині виливка швидкість затвердіння становить ~0,005 мм/сек.

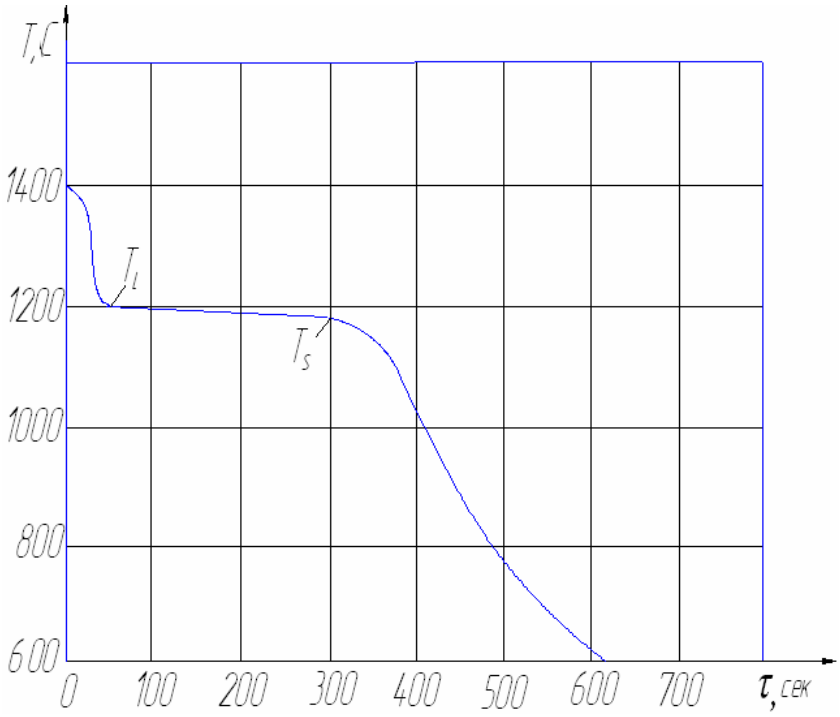

Рисунок 1 – Крива зміни температури в центральній частині виливка “Цильпебс”

Розрахована залежність швидкості затвердіння від положення границі кристалізації (по ізотермі солідусу) показана на рис. 2.

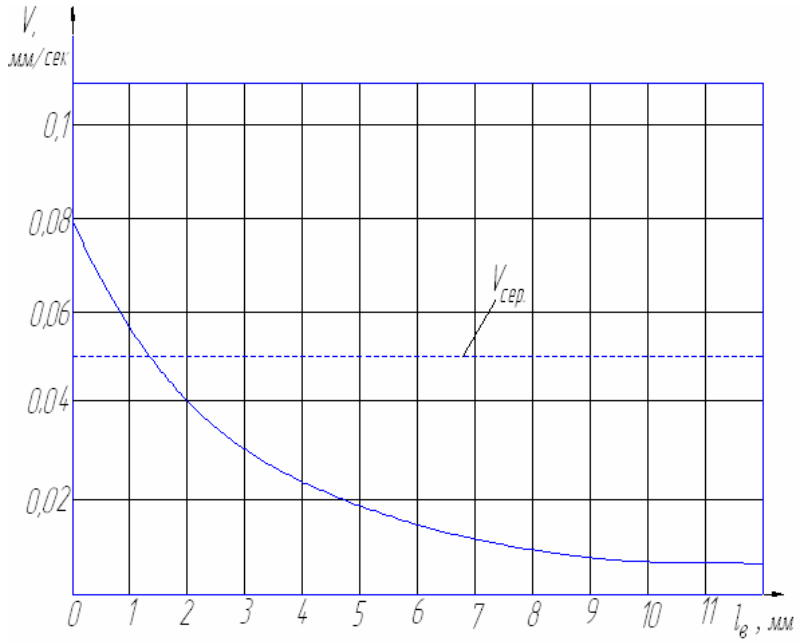

Рисунок 2 – Крива зміни швидкості затвердіння виливка “Цильпебс” Ø25 мм

В результаті проведених розрахунків визначили, що найбільш ефективний режим охолодження чавунних молольних тіл має досягатись при використанні кокільних фарб із коефіцієнтом теплопровідності ($\lambda_{ф}$) 0,24 – 0,38 Вт/(м×^{0}С). В цьому випадку швидкість затвердіння забезпечує товщину вибіленого шару ~5…8 мм. Згідно з структурними діаграмами Г.Ф. Баландіна – А.І. Вейніка [6, 7] прогнозована твердість вибіленої поверхневої частини у виливках із низьколегованого чавуну знаходиться на рівні 400 - 520 НВ (~42-50 HRC), а перліто-графітної серцевини – від 210 до 286 НВ в межах міцності 250 – 320 МПа.

Мікроструктуру таких чавунів вивчали на шліфах, виготовлених із тіла молольних тіл. Тип хромистих карбвідів і металевої матриці визначали тепловим травленням і рентгеноспектральним аналізом.

Встановлено, що мікроструктура низькохромистого чавуну (~1% Cr) перліто-ледебуритна. Карбідна фаза представлена легованим цементитом $(Fe, Cr)_3C$ (рис. 3).

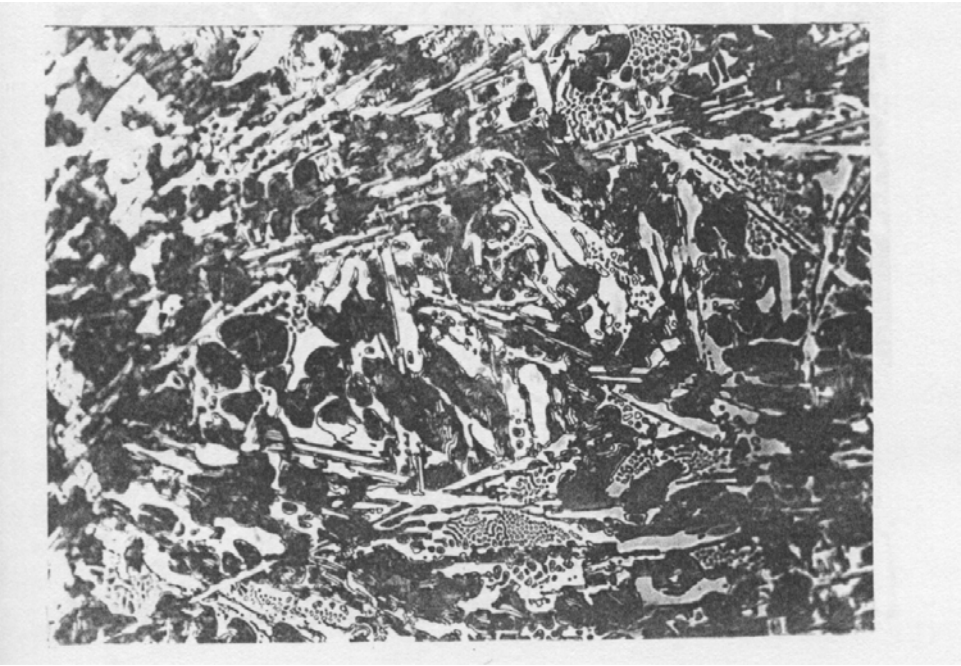

Рисунок 3 – Мікроструктура білого чавуну (0,8% Cr) ×500

Експлуатаційні властивості литих чавунних цильпебсів і молольних куль (ударно-абразивну зносостійкість і ударостійкість) було перевірено на зразках, вирізаних в радіальному напрямку. Випробування здійснювали в лабораторному млину.

На рис. 4 та рис. 5 показано, відповідно, виливок чавунної кулі та її злом з поверхневим вибіленим шаром, та структурою сірого чавуну в центральній частині.

Рисунок 4 – Молольна куля (Ø30 мм)

Рисунок 5 – Злом виливка молольної кулі (Ø30 мм)

Висновки. Порівняльний аналіз експлуатаційних властивостей і вартості їх досягнення показав, що в умовах сьогодення компромісним є виготовлення литих молольних тіл із низьколегованого хромом чавуну (0,8-1%). Дані, отримані розрахунковим способом, добре узгоджуються із результатами виробничих випробувань литих молольних тіл, що дозволило оптимізувати технологію виготовлення таких виробів.

Список літератури

1. Бестужев Н.И. Графитизированный белый чугун – перспективный материал для мелющих тел [Текст] / Н.И. Бестужев, С.П. Королев // Литейное производство. – 1999. – №3. – С. 20-21.
2. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки [Текст] / Г.Ф. Баландин. – М: Машиностроение, 1976. – 328 с.
3. Корн Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М: Наука, 1978. – 832 с.
4. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки [Текст] / А.И. Вейник. – М: Машиностроение, 1960. – 435 с.
5. Жуховицкий А.А. Физическая химия [Текст] / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман; под ред. С.И. Попеля. – М.: Металлургия, 1987. – 688 с.
6. Дубоделов В.И. Численное исследование кинетики затвердевания мелющих тел в металлических формах с естественным воздушным охлаждением [Текст] / В.И. Дубоделов, В.К. Погорский, В.Н. Кропивный, В.Н. Ломакин // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – 1999. – №4. – С.5-10.
7. Справочник по чугунному литью [Текст] / под ред. Г.Ф. Гиршовича. – Л: Машиностроение. – 1978. – 758 с.

Referencis

1. Bestuzhev, N.I. & Korolev, S.P. (1999). Grafitizirovannyj belyj chugun – perspektivnyj material dlja meljushhih tel [Graphitized white cast iron is a promising material for grinding media]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry, 3*, 20-21.
2. Balandin, G.F. (1976). *Osnovy teorii formirovanija otlivki [Fundamentals of the casting formation theory]*. Moscow: Mashinostroenie.

3. Korn, G. & Korn, T.(1978). *Spravochnik po matematike [Math Handbook]*. Moscow: Nauka.
4. Vejnik, A.I (1960). *Teorija zatverdevanija otlivki [Theory of Casting]*. Moscow: Mashinostroenie.
5. Zhuhovickij, A.A. & Shvarcman, L.A. (1987). *Physical chemistry*. C.I. Popelja (Ed.). Moscow: Metallurgija.
6. Dubodelov, V.I., Pogorskij, V.K., Kropivnyj, V.N. & Lomakin, V.N. (1999). Chislennoe issledovanie kinetiki zatverdevanija meljushhih tel v metallicheskih formah s estestvennym vozdushnym ohlazhdeniem [Numerical study of the kinetics of hardening of grinding bodies in metal forms with natural air cooling]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Collection of scientific works of Kirovograd State Technical University*, *4*, 5-10.
7. Girshovicha, G.F. (Eds.). (1978). *Cast Iron Handbook*. Leningrad: Mashinostroenie.

Viktor Lomakin, Prof. Assist., PhD tech. sci., Vasyl Klymenko, Prof., DSc., Viktor Pukalov, Prof. Assist., PhD tech. sci., Olexandr Kuzyk, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskiy, Ukraine
Viktor Dubodelov, Prof., DSc., Maxym Goriuk, Sen. Res., PhD tech. sci.
Physiko-Technologikal Institute of Metals and Alloys

Research of the Solidification Process and Prediction of the Structure of Cast Cast-Iron Grinding Bodies

The aim of the study was to calculate the kinetics of crystallization and to determine the rational mode for cooling castings of a crushing cylinder and a crushing ball in metallic form to ensure that the surface wear-resistant bleached layer does not have more than a third of the size (or radius of the ball) from the surface of the body.

The use of the finite element method for numerical calculation of solidification of castings of grinding bodies of cylindrical and spherical bodies in chill molds is considered depending on the chemical composition of the alloy and for predicting the ratio between the amount of ledeburite, which determines the wear resistance of grinding bodies, and the amount of austenite-graphite eutectic. The experimental chemical composition of cast iron for grinding bodies: 3-3.9% C, 2.8-4% Si, 0.6-1.2% Mn; less 0.03% P, less 0,02% S. For cylindrical and spherical bodies, the thermal conductivity functional was obtained and the kinetics of crystallization of castings was calculated. The data obtained indicate an inhomogeneity in the distribution of the linear rate of solidification along the cross-section of cast products. At the beginning of the process, the solidus front has a relatively high velocity (0.08 mm / s), which rapidly decreases with increasing thickness of the crust. Further, with the passage of time, the thickness of the two-phase zone gradually decreases and in the central part of the casting the rate of solidification is ~ 0.005 mm / sec. It is established that the microstructure of low-chromium cast iron (~ 1% Cr) is perlite-ledeburite. The carbide phase is represented by doped cementite $(Fe, Cr)_3C$.

A comparative analysis of the operational properties and the cost of their achievement showed that in today's conditions, it is a compromise to make cast grinding bodies from low-alloyed cast iron (0.8-1% Cr). The data obtained by the calculation method are in good agreement with the results of production tests of cast grinding bodies, which made it possible to optimize the technology for manufacturing such products.

cylinder for crushing, cast ball, alloyed cast iron, chromium, metallic form, solidification, structure, modeling

Одержано (Received) 27.04.2018