

Обоснование чисел подобия для физического моделирования тепловых процессов взаимодействия микрохолодильников с жидким металлическим расплавом при непрерывной разливке колесной стали

Рассмотрена перспектива моделирования процесса кристаллизации колесной стали, разливаемой на МНЛЗ при вводе микрохолодильников. Проанализированы известные числа подобия для моделирования процессов затвердевания металлов и сплавов, на основе которых сформулированы числа подобия, удовлетворяющие поставленные задачи исследования.

Ключевые слова: колесная сталь, непрерывная разливка, микрохолодильники, моделирование, числа подобия

Постановка проблемы. При производстве колесной стали важно получить мелкозернистую структуру в осевой части непрерывнолитой заготовки, обладающую высокой изотропией механических свойств. Эта цель достигается при объемной кристаллизации стали, которая может быть инициирована вводом в расплав растворимых (железных, стальных или чугуновых) микрохолодильников.

Одним из эффективных способов определения характера воздействия микрохолодильников на макроструктуру заготовки является физическое моделирование, основанное на теории подобия. Моделирование процессов, сопровождающих разливку и кристаллизацию стали, значительно упрощается и удешевляется, если вместо жидкой стали использовать легкоплавкие металлы.

Процессы формирования макроструктуры всех металлов и сплавов имеют одинаковую природу и могут быть описаны одними параметрами [1]. Первым такую попытку осуществил Б. Чалмерс [2], сформулировав критерий концентрационного переохлаждения, определяющий развитие зоны концентрационного переохлаждения перед фронтом кристаллизации. Этот критерий зависит от условий охлаждения расплава и его свойств, и поэтому описывает кристаллизацию любых металлических расплавов. Позднее этот критерий был уточнен в работах В. Маллинза и Р. Секерки [3].

Таким образом, процесс кристаллизации средне- и тугоплавких металлов можно имитировать на таких металлах, как свинец, олово, цинк и т. д. В работе [4], например, в качестве модельного материала выбраны сплавы Sn + 20 % Bi, Sn + 10 % Pb, Sn + 85 % Pb. Результаты этих исследований хорошо согласуются с математическими моделями, приведенными авторами в той же работе.

В данной работе была поставлена цель определить числа подобия, которые позволят имитировать кристаллизацию стали при суспензионной разливке на легкоплавких металлах и сплавах.

Состояние вопроса. Для имитации затвердева-

ния стального слитка в работе [5] принимают подобие на модели и натуре числа Фурье $Fo = idem$ и произведение числа Био и критерия фазового перехода $Bi \cdot N = idem$. Те же безразмерные комплексы использованы в работе [6] для определения времени затвердевания металлических расплавов. Дополнительно для обеспечения подобия кристаллической структуры авторы ввели следующие числа подобия:

– температурный симплекс

$$\Theta = \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{cp}}}{t_s - t_{\text{cp}}} = idem, \quad (1)$$

где $t_{\text{пер}}$, t_s , t_{cp} – температура соответственно перегретого металла, солидус и охлаждающей среды, К;

– безразмерный комплекс

$$A = \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{c_L(t_s - t_{\text{cp}})}} = idem, \quad (2)$$

где α_L , α_s – коэффициенты температуропроводности соответственно жидкой и твердой фаз, m^2/c ; L – теплота кристаллизации, Дж/кг; c_L – теплоемкость жидкого расплава, Дж/(кг·К); t_L – температура ликвидус, К;

– симплекс теплопроводности

$$\Lambda = \frac{\lambda_L}{\lambda_s} = idem, \quad (3)$$

где λ_L , λ_s – коэффициенты теплопроводности соответственно жидкой и твердой фаз, Дж/(м·с·К);

– симплекс объемного расширения

$$B = \frac{\beta_L}{\beta_s} = idem, \quad (4)$$

где β_L , β_s – коэффициенты объемного расширения соответственно жидкой и твердой фаз.

Однако по данным А. Оно [7] существенную роль в процессе кристаллизации играют также циркуляционные потоки, имеющие место в реальных условиях разливки стали. Наличие этих потоков способствует скалыванию ветвей растущих дендритов, которые

в объеме кристаллизующегося металла служат зародышами новой фазы. Помимо этого наличие потоков вынужденной конвекции интенсифицирует удаление ликватов от фронта кристаллизации, что приводит к снижению концентрационного переохлаждения. В работе [8] В. А. Ефимов приводит зависимость вида $Re = f(Sc)$ для расчета критической скорости, при которой ликваты будут смываться с фронта кристаллизации вглубь расплава.

Проанализировав работы [1-8], получаем $n = 10$ размерных факторов, сказывающихся на формировании макроструктуры сплавов: коэффициент теплопередачи α , разница температур ΔT , коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , теплота кристаллизации L , характерный размер l , удельная теплоемкость c , скорость потока у фронта кристаллизации w , кинематическая вязкость ν и коэффициент диффузии примеси в расплаве D . Раскрыв $Dж = кг \cdot м^2 / с^2$, получим $k = 4$ основные единицы: кг, м, К и с. Тогда после преобразования получим $n - k = 10 - 4 = 6$ безразмерных комплексов. Приведение рассмотренных факторов и параметров к безразмерному виду показано в таблице. Показатели степеней величин в полученных безразмерных комплексах осуществляли по методике [9] решением системы линейных уравнений в программе Mathcad 2000 Professional.

Определение чисел подобия физического моделирования

Величина	Единица измерения	Масштабная единица	Безразмерный комплекс
α	кг/с ³ ·К	–	$\pi_1 = \frac{\alpha l}{\lambda}$
ΔT	К	К	–
λ	кг·м/с ³ ·К	с	–
ρ	кг/м ³	кг	–
L	м ² /с ²	–	$\pi_2 = \frac{L\rho^{2/3}l^{2/3}}{\Delta T^{2/3}\lambda^{2/3}}$
l	м	м	–
D	м ² /с	–	$\pi_3 = \frac{D\rho^{1/3}}{l^{2/3}\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}}$
c	м ² /с ² ·К	–	$\pi_4 = \frac{c\rho^{2/3}l^{2/3}\Delta T}{\lambda^{2/3}}$
w	м/с	–	$\pi_5 = \frac{w\rho^{1/3}l^{1/3}}{\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}}$
ν	м ² /с	–	$\pi_6 = \frac{\nu\rho^{1/3}l^{1/3}}{\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}}$

Для увеличения числа степеней свободы и упрощения полученных комплексов необходимо преобразовать их путем взаимного перемножения. Комплекс π_1 – упомянутое выше число Био.

Разделив комплекс π_2 на π_4 , получают критерий фазового перехода N :

$$N = \frac{\pi_2}{\pi_4} = \frac{L\rho^{2/3}l^{2/3}}{\Delta T^{2/3}\lambda^{2/3}} \cdot \left(\frac{c\rho^{2/3}l^{2/3}\Delta T}{\lambda^{2/3}} \right)^{-1} = \frac{L}{c\Delta T}. \quad (5)$$

Разделив комплекс π_6 на π_3 , получают число Шмидта Sc :

$$Sc = \frac{\pi_6}{\pi_3} = \frac{\nu\rho^{1/3}l^{1/3}}{\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}} \cdot \left(\frac{D\rho^{1/3}}{l^{2/3}\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}} \right)^{-1} = \frac{\nu}{D}. \quad (6)$$

Умножив комплекс π_4 на π_5 , получают число Пекле Pe :

$$Pe = \pi_4\pi_5 = \frac{c\rho^{2/3}l^{2/3}\Delta T}{\lambda^{2/3}} \cdot \frac{w\rho^{1/3}l^{1/3}}{\Delta T^{1/3}\lambda^{1/3}} = \frac{w\rho c l}{\lambda} = \frac{wl}{\lambda}. \quad (7)$$

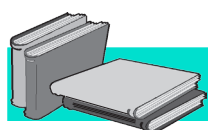
Роль функционального критерия играет безразмерный симплекс $R = \delta/r$, показывающий отношение толщины δ макроструктурной зоны заготовки к ее радиусу r .

Полученные в результате преобразования безразмерные комплексы включают в себя все величины, входящие в числа подобия (1)-(3). К ним следует добавить неучтенные в анализе симплексы (1) и (4).

Ввод в кристаллизующийся расплав инокулятора из материала матрицы сопровождается «намерзанием» на него тонкого слоя металла, который после нагрева до температуры кристаллизации плавится вместе с самим инокулятором, снимая переохлаждение расплава. Тогда при диаметре частицы меньше критического ($d < d_{кр}$) он будет полностью расплавляться, снижая перегрев расплава. Искомый критический диаметр находят из дифференциального уравнения, полученного в работе [10] при начальном условии $\tau = \tau_{затв}$ ($\tau_{затв}$ – время полного затвердевания заготовки). Для описания остаточного диаметра частички вводят линейный симплекс $\Delta = d/d_{кр}$.

Выводы

Проведен расчет чисел подобия для моделирования процесса формирования макроструктуры непрерывнолитой заготовки при суспензионной разливке. Определяющими выбраны комплексы Био Bi , Шмидта Sc , Пекле Pe , критерий фазового перехода N и симплексы: линейный Δ , температурный Θ , объемно-го расширения V .



ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое описание кристаллизации слитка с учетом фазовых превращений / В. Т. Борисов, В. В. Виноградов, И. Л. Тяжелникова и др. // Непрерывное литье стали: Тематический отраслевой сборник № 3. – М.: Металлургия, 1976. – С. 6-25.
2. Чалмерс Б. Физическое металловедение. / Под ред. А. К. Натансона. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 456 с.

3. Флеминг М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 424 с.
4. Борисов В. Т., Виноградов В. В., Духин А. И. – Металлы. – 1971. – № 6. – С. 104-109.
5. Акименко А. Д., Скворцов А. А., Сидоров С. П. Исследование затвердевания стальных слитков на физических моделях // Непрерывное литье стали: Тематический отраслевой сборник № 3. – М.: Metallurgy, 1976. – С. 30-35.
6. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче.– Л.; М.: Государственное энергетическое изд-во, 1958. – 416 с.
7. Оно А. Затвердевание металлов / Под ред. В. А. Ефимова. – М.: Metallurgy, 1980. – 152 с.
8. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Metallurgy, 1976. – 552 с.
9. Румянцев В. Д. Теория тепло- и массообмена: Учебн. пособие. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.
10. Мочалов А. А., Гайша А. А., Шаповал Н. А. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников // Сб. науч. трудов НУК. – 2008. – № 6. – С. 76-80.

Анотація

Величко О. Г., Синегін Є. В., Бойченко Б. М., Герасименко В. Г., Молчанов Л. С.
Обґрунтування чисел подібності для фізичного моделювання теплових процесів взаємодії мікрохолодильників із рідким металевим розплавом при безперервному розливанні колісної сталі

Розглянуто перспективу моделювання процесу кристалізації колісної сталі, що розливається на МБЛЗ при введенні мікрохолодильників. Проаналізовано відомі числа подібності для моделювання процесів тверднення металів і сплавів, на підґрунті яких сформульовано числа подібності, які задовольняють поставлені задачі дослідження.

Ключові слова

колісна сталь, безперервне розливання, мікрохолодильники, моделювання, числа подібності

Summary

Velichko A. G., Synegin E. V., Boichenko B. M., Gerasimenko V. G., Molchanov L. S.
Substantiation of similarity numbers for physical modeling of thermal processes of microcoolers and liquid steel interaction during continuous casting of wheel steel

The prospect of modelling of crystallization process of wheel steel which is casted by CCM with applying microcoolers is considered. Based on analysis of well known similarity numbers for imitation of metals and alloys solidification processes, the similarity numbers which satisfy set challenges were formulated.

Keywords

wheel steel, continuous casting, microcoolers, modeling, similarity numbers

Поступила 25.04.13