

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В ЦЕНТРАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЗЛИТКУ

Мочалов А.А., Коваль С.С

Найбільш актуальним питанням при одержанні сучасних литих матеріалів з заданими службовими характеристиками, є формування їх внутрішньої структури. Фазовий перехід в двохкомпонентній системі супроводжується тепломасопереносом фаз, взаємодією хімічних елементів гетерогенних систем, переміщенням макрооб'ємів та розвитком різного виду неоднорідностей. Для отримання оптимальних алгоритмів управління процесом необхідне глибоке розуміння механізму кристалізації. Сучасні теоретичні дослідження теплофізичних властивостей гетерогенних систем проводяться за допомогою комп'ютерних систем моделювання, що значно знижує витрати у порівнянні з промисловими експериментами.

Температурні поля, які встановлюються в процесі кристалізації, формують неоднорідний тепловий та гідродинамічний пограничний шар. В об'ємі злитку виникає натуральна конвекція, інтенсивність якої істотно залежить від фізичних властивостей компонентів рідкого металу. Тепловий пограничний шар формує гідродинамічний пограничний шар, що розділює злиток на області низхідного потоку в двохфазній зоні, який залучено до процесу теплообміну, та висхідного потоку в центральній області злитку, який не приймає участі в теплообміні. Внаслідок кристалізації, рідка фаза двохфазної області збагачена ліквіційними домішками. Розподіл цих домішок по двохфазній області відбувається нерівномірно. Таким чином, більш холодна рідка фаза внаслідок натуральної конвекції стікає в нижню частину злитку, температура та концентрація якої відповідає початковій. В цій частині злитку відбувається перебудова низхідного гідродинамічного потоку, та формування висхідного потоку в центральній області злитку. Внаслідок інтенсивного змішування, відбувається вирівнювання концентрації охолодженого металу двохфазної області. В виникаючих умовах відбувається виділення твердої фази в нижній частині центральної області, яку далі будемо називати область змішання.

Існуюча модель кристалізації [1] металу в області змішання злитку, дозволяє розрахувати процес виділення твердої фази при сталих теплофізичних характеристиках двохфазної області. Метою даної роботи є створення математичної моделі кристалізації двохкомпонентної системи в області змішання злитку, з використанням фазових діаграм рівноваги. Проведення числового експерименту при різних параметрах двохфазної області, а також встановлення особливостей кристалізації для систем з різними фазовими діаграмами рівноваги.

Виділимо в центральній частині прямокутного злитку с розмірами $A \times B \times C$ область змішання (Рис.1), висота якої сумірна з товщиною теплового пограничного шару в цій області [2]. Внаслідок симетричності задачі всі рівняння будемо записувати для 1/4 частини області змішання.

Рівняння зміни концентрації домішки в рідкій фазі, в області змішання, з часом:

$$C_0' f_{\text{пс}} \bar{W}_{\text{пс}} \rho - C_0'' f_{\text{в}} \bar{W}_{\text{в}} \rho = \frac{d(\rho V_{\text{ж}} C_0'')}{d\tau}, \quad (1)$$

де C_0', C_0'' – концентрація домішки в рідкій фазі на вході до області змішання та на

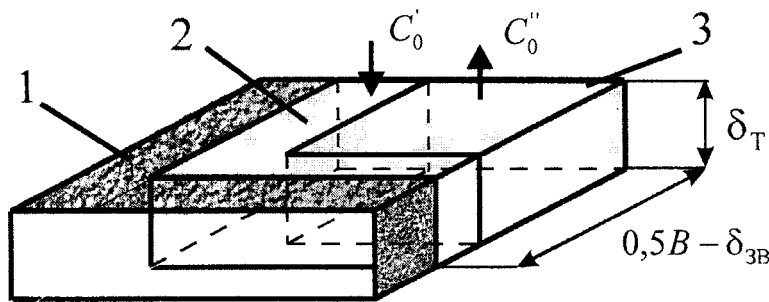


Рис.1 Схема виділення елемента область змішання.

(1 – тверда фаза; 2 – переріз гідродинамічного потоку на вході в область змішання; 3 – переріз потоку на виході).

виході з неї, відповідно; $f_{\text{пс}}, f_{\text{в}}$ – площа поперечного перерізу потоку в пограничному шарі та висхідного потоку в центральній області злитку; ρ – густина рідкого металу; $V_{\text{ж}}$ – об'єм рідкої фази в області змішання; $\bar{W}_{\text{пс}}, \bar{W}_{\text{в}}$ – середньо витратна швидкість рідкого металу в пограничному шарі та висхідного потоку, відповідно.

В рівнянні (1) перший доданок описує масову витрату компонента на вході в область змішання, другий – масову витрату компонента на виході з області змішання, член праворуч – зміну маси компонента за одиницю часу в виділеному елементі.

Перетворимо рівняння (1) с урахуванням рівняння неперервності [3]

$$\chi_S (C_0' - C_0'') = \frac{dC_0''}{d\tau} \frac{C_0'' - C_S}{C_L - C_S} - C_0'' \frac{d\varepsilon''}{d\tau}, \quad (2)$$

де $\chi_S = \frac{0,5A - \delta_{3A} + 0,5B - \delta_{3B} - \delta_T}{(0,5A - \delta_{3A})(0,5B - \delta_{3B})} \bar{W}_{\text{пс}}$, – характеристичний коефіцієнт, що

характеризує геометричні параметри злитку та двофазної області; δ_{3A} – товщина твердої фази з боку А; δ_{3B} – товщина твердої фази з боку В; δ_T – товщина теплового пограничного шару на вході до області змішання; C_S, C_L – концентрації солідус і ліквідус, які

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В ЦЕНТРАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЗЛИТКУ

визначаються по фазовій діаграмі; ε'' – відносна кількість твердої фази, що виділилася в області змішання.

Рівняння зміни ентальпії з часом, для центральної частини злитку

$$c^{\text{ж}} f_{\text{л}} \bar{W}_{\text{л}} \rho T' - c^{\text{ж}} f_{\text{в}} \bar{W}_{\text{в}} \rho T'' + r \frac{dM_{\text{т}}}{d\tau} = \frac{d(Mc^{\text{ж}}T'')}{d\tau}, \quad (3)$$

де T' – середньо витратна температура рідкої фази теплового пограничного шару; T'' – температура на виході з області змішання; r – теплота фазового переходу; $M, M_{\text{т}}$ – маса області змішання, маса твердої фази; $c^{\text{ж}}$ – питома теплоємність рідкої фази.

Проводячи аналогічні перетворення, запишемо

$$\chi_{\text{с}}(T' - T'') + \frac{r}{c^{\text{ж}}} \frac{d\varepsilon''}{d\tau} = \frac{dT''}{d\tau}. \quad (4)$$

Зміна відносної кількості твердої фази [4]:

$$\frac{d\varepsilon''}{d\tau} = -\frac{1}{C_{\text{л}} - C_{\text{с}}} \frac{dC_0''}{d\tau} + \left(\frac{(C_{\text{л}} - C_0'') \frac{dC_{\text{с}}}{dT''} - (C_0'' - C_{\text{с}}) \frac{dC_{\text{л}}}{dT''}}{(C_{\text{л}} - C_{\text{с}})^2} \right) \frac{dT''}{d\tau}, \quad (5)$$

де $\frac{dC_{\text{с}}}{dT''}$, $\frac{dC_{\text{л}}}{dT''}$ – градієнт концентрації солідус та ліквідус по температурі, який визначається по фазовій діаграмі.

Для того щоб замкнути систему рівнянь (2), (4) і (5), доповнимо її початковими та граничними умовами:

$$\text{початкові } T''|_{\tau=0} = T_0, \quad C_0''|_{\tau=0} = C_0, \quad \varepsilon'' = 0;$$

$$\text{граничні } C_0' = f(x, y, z, \tau), \quad T' = f(x, y, z, \tau).$$

В якості прикладу систем з різними видами діаграм фазової рівноваги приймемо сплав міді та нікелю марки НЖМЦ ($Cu - 28\%$), а також вуглеводисту сталь марки AISI_1008 ($Fe - 99,4\%$; $C - 0,08\%$) [5]. Результати експерименту на модельних середовищах (Рис.2.а) свідчать про те, що виникаючі низхідні конвективні потоки формують в донній частині злитку область в якій відбувається перебудова гідродинамічного потоку. Це сприяє вирівнюванню теплофізичних параметрів виділеного об'єму. Результати числового експерименту, проведеного на базі розробленої моделі (Рис.2.б), підтверджують, що в процесі вирівнювання термодинамічних параметрів в області змішання виникають умови, при яких в центральній області злитку виділяється тверда фаза, з концентрацією домішок нижче початкової (зворотна ліквіація). Дане явище спостерігається при кристалізації реальних злитків [6].

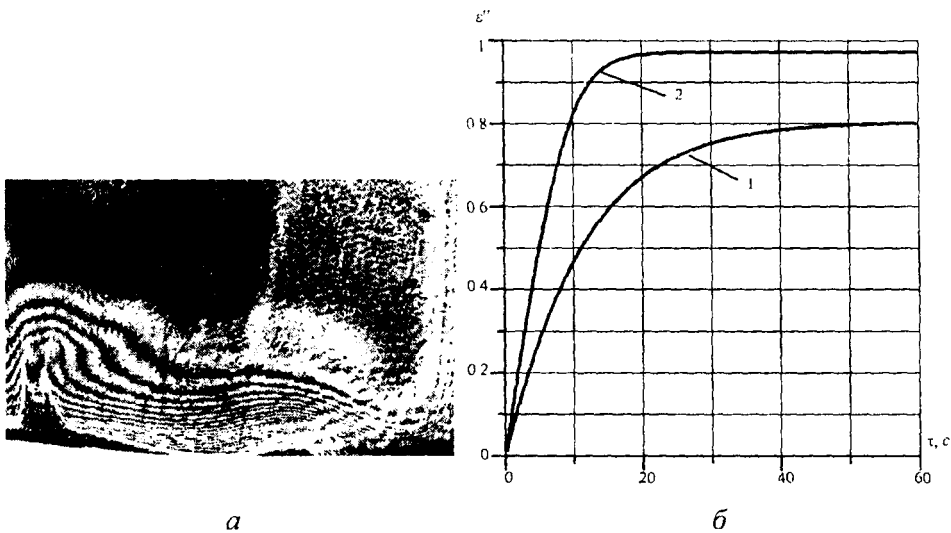


Рис.2 Интерферограма вихолодження області змішання злитку (а), та залежність відносної кількості твердої фази ε'' (б) в області змішання від часу. (1 – система $Cu-Ni$; 2 – система $Fe-C$) при постійному переохолодженні $\Delta T = 20 K$.

Універсальність розробленої моделі дозволяє проводити дослідження системи при наявності фазової діаграми рівноваги. Так при однаковій величині переохолодження перехідний процес в ізоморфній системі протікає повільніше ніж в евтектичній (Рис.2.б). На інтенсивність виділення твердої фази впливає градієнт концентрації солідус.

Розроблена модель дозволяє проаналізувати вплив граничних умов на процес

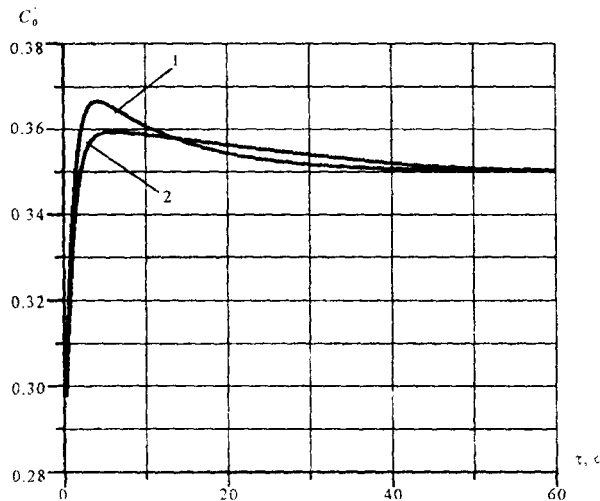


Рис.3. Залежність концентрації рідкої фази від часу в ізоморфній системі $Cu-Ni$. (1 – $T' = const$; 2 – $T' = f(x, v, z, \tau)$)

виділення твердої фази. На Рис. 3 зображено залежність концентрації рідкої фази в

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В ЦЕНТРАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ЗЛИТКУ

виділеному об'ємі від часу при різних параметрах вхідного потоку двохфазної області для ізоморфного сплаву.

На Рис.4. представлена залежність концентрації твердої фази та температури області змішання від часу для евтектичної системи.

Так при постійній температурі конвективного потоку інтенсивність виділення твердої фази вище. Це впливає на розподіл ліквідаційних домішок по перерізу седиментаційного конуса.

Отримані результати числового моделювання дають можливість оцінити вплив геометричних параметрів злитку та теплофізичних параметрів двохфазної області на кількісний та якісний склад твердої фази в нижній частині центральної області злитку. Приведена модель може бути використана як складова частина при побудові моделей кристалізації двохкомпонентних систем.

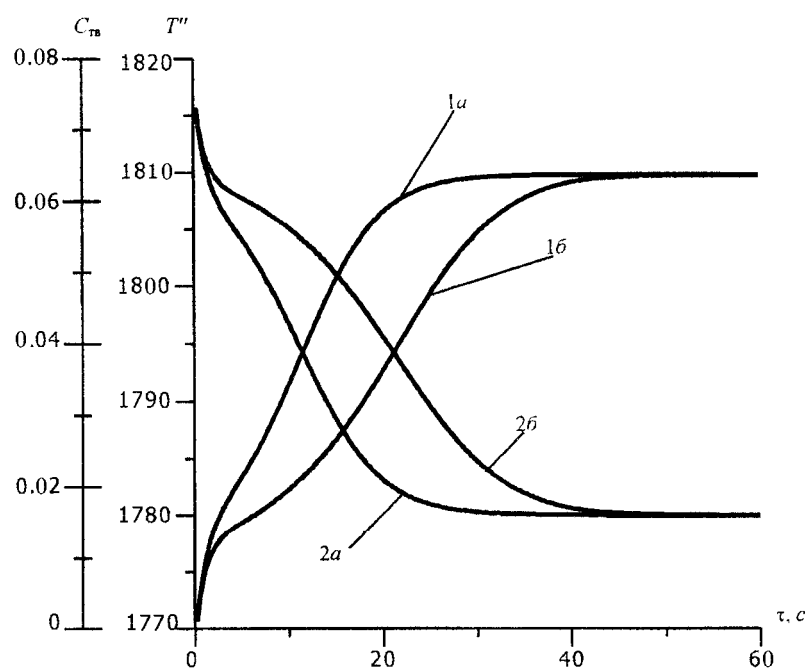


Рис.4. Залежність температури області змішання (1) та концентрації твердої фази (2) від часу в системі $Fe-C$ ($a - T' = const$; $б - T' = f(x, y, z, \tau)$).

Список літератури

1. Мочалов А.А., Коваль С.С. Исследование влияния параметров двух фазной зоны на кристаллизацию металла в зоне смешения слитка.// Збірник наукових праць УДМУ. – Миколаїв: УДМУ, 2000. – №5, с.114–120.
2. Мочалов А.А., Фоменко К.П., Сыпко В.П. – Исследование процесса захлаживания центральной части слитка при естественной конвекции на модельных средах методом голографической интерферометрии// Теплоэнергетика и хладотехника: Сб. науч. тр. – Николаев: НКИ, 1988. – С. 81-85.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. -- М.: Наука, 1974. -- 712с.
4. Мочалов О.О., Коваль С.С. -- Математична модель нерівноважної кристалізації двокомпонентного сплаву// Науковий вісник МДПУ: Зб. наук. пр. -- 1999.-- Вип.1.
5. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас: справочник/ под ред. Е.А. Ульянина. -- М: Металлургия, 1989. -- 398с.
6. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. -- М.: Металлургия, 1976. -- 552с.

Поступила в редакцию 30.10.2002 г.