

РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ОТРИМАННІ МІКРОГРАНУЛ ГАЗОВИМ РОЗПИЛЮВАННЯМ

Терновий Ю.Ф., д.т.н., проф., Лічконенко Н.В., старший викладач
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету

Анотація. Наведено різні методики розрахунків швидкостей охолодження при газовому розпиленні металевих розплавів. Показано, що розрахунок швидкості охолодження при кристалізації залежить від розміру мікрогранул і присутності сателітів на їх поверхні.

Ключові слова: газове розпилення, мікрогранула, теплообмін, кристалізація, сателіт, швидкість охолодження, число Біо, траєкторія.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МИКРОГРАНУЛАМ ГАЗОВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Терновой Ю.Ф., д.т.н., проф., Личконенко Н.В., старший преподаватель
Инженерный учебно-научный институт Запорожского национального университета

Аннотация. Приведены различные методики расчетов скоростей охлаждения при газовом распылении металлических расплавов. Показано, что расчет скорости охлаждения при кристаллизации зависит от размера частиц и присутствия сателлитов на их поверхности.

Ключевые слова: газовое распыление, микрогранула, теплообмен, кристаллизация, сателлит, скорость охлаждения, число Био, траектория.

CALCULATION OF COOLING RATE WHEN PRODUCING MICROGRANULES BY GAS SPRAYING

Ternovyi Yurii, Doct. of Technical Sciences, Prof., Lichkonenko Natalia, Senior Teacher
Engineering Institute of Zaporizhzhia National University

Annotation. Various methods for calculating the cooling rates during gas sputtering of metal melts are presented. It is shown that the calculation of the cooling rate during crystallization depends on the size of particles and the presence of satellites on their surface.

Key words: gas atomization, microgranule, heat transfer, crystallization, satellite, cooling rate, Bio number, trajectory.

Вступ

Інженерні розрахунки процесів отримання мікрогранул при газовому розпилюванні передбачають визначення наступних параметрів: фракційного складу, координати (треку) і швидкості частинки, що відповідають початку і закінчення процесу її кристалізації; змінення температури і швидкості руху краплі в часі, коефіцієнта теплопередачі в залежності від розміру гранул, швидкості охолодження, а також тривалості процесів охолодження і кристалізації [1].

Процес отримання порошків (гранул) пов'язаний з диспергуванням струменя розплаву. Теоретичний аналіз механізму дроблення струменя представлений в роботах Волинського М.С., Лишевського А.С., Ничипоренко О.С. та ін. авторів [2-5].

Аналіз публікацій

Швидкість охолодження при кристалізації визначає і величину переохолодження розплаву, і швидкість кристалізації, і кінетичні параметри процесу (коефіцієнти розподілу елементів перед фронтом кристалізації і коефіцієнти дифузії в твердому і рідкому станах). Тому дуже важливо правильно оцінювати і вимірювати швидкість охолодження при кристалізації, як один з основних технологічних

факторів, що визначає фазовий склад, структуру і властивості частинок сплаву [6].

Оцінку умов кристалізації і швидкості охолодження при утворенні гранул в процесах газового розпилювання виконували в багатьох роботах [6-11], хоча характеризувати процеси, які відбуваються в металогазовому факелі дуже важко через мінливість умов в часі і просторі, а також складність постановки експерименту.

Постановка завдання

Розрахувати швидкість охолодження частинок при газовому розпилюванні для коректного визначення габаритів камери розпилювання, що забезпечуватимуть повну кристалізацію сферичних частинок (мікрогранул) різних розмірів.

Основна частина досліджень

В роботі [5] реалізований підхід до розрахунку процесу охолодження крапель при розпилюванні розплаву при великій теплопровідності власне тіла частинки. При цьому критерій Біо (Bi) є важливою характеристикою процесу штучного теплообміну частинок розплаву з газом і характеризується відношенням термічного опору матеріалу частинки, що визначається її теплопровідністю і термічним опором конвективного перенесення навколишнього середовища:

$$Bi = \frac{\alpha_{вк} \cdot d_k}{\lambda_{Me}}, \quad (1)$$

де λ_{Me} – теплопровідність рідкого металу; $\alpha_{вк}$ – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок вимушеної конвекції, $\alpha = Nu \cdot \lambda_r / d_k$, Nu – число Нуссельта, $Nu = 2 + 0,576Re^{0,5} \cdot Pr^{0,3}$; λ_r – теплопровідність газу-енергоносія; Re , Pr – число Рейнольдса і Прандтля відповідно.

При $Bi < 0,1$ тепла енергія краплі сконцентрована в «геометричній точці» і діаметр металеві краплі $d_k \leq 10^2$ мкм. Розмір вертикальної камери при розпилюванні частинок $d_k = 50$ мкм дорівнює 0,21 м, а швидкість охолодження розпилених гранул, яка становить до початку кристалізації порядку $7 \cdot 10^4$ К/с, однозначно пов'язана з дендритним параметром [12].

У разі коли $Bi > 0,1$ (для частинки металу $d_k > 100$ мкм) для наближеного вирішення задачі про тверднення кулі, що забезпечує точність в межах 15-20%, можна використовувати метод Ковнера [13], коли задача лінійної швидкості кристалізації крапель відрізняється граничними умовами і умовами охолодження, які змінюються в часі.

При цьому для розрахунку швидкості кристалізації приймаємо модель, де рідка частинка має форму кулі, розподіл температури по її тілу до початку кристалізації рівномірний і дорівнює температурі ліквідус, а розподіл температури в сферичній оболонці, що закристалізувалась, - стаціонарний. На межі цієї оболонки з розплавленим ядром ($r = \eta$) температура дорівнює температурі кристалізації T_k , а на поверхні частинки ($r = R$) теплообмін з газом відбувається за рахунок вимушеної конвекції і випромінювання.

Рішення рівняння теплопровідності в задачі Стефана [14]

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2)$$

з граничними умовами:

$$T_i|_{r=R} = T_r ; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} = \alpha_i \cdot [T_i(R) - T_r] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i^4 - T_{cm}^4] \quad (4)$$

має вигляд

$$T_i(R) = T_k - \frac{R^2}{\lambda} \cdot \left\{ \alpha_i \cdot \left(\frac{1}{\eta_i} - \frac{1}{r} \right) \cdot [T_i(R) - T_2] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{cm}^4] \right\}, \quad (5)$$

де T_k - температура кристалізації; T_2 - температура газу; ε - ступінь чорноти; σ - універсальна постійна Стефана; T_{cm} - температура стінки камери розпилення.

Рівняння (5) описує розподіл температури по товщині оболонки, яка вже є кристалічною, в залежності від радіуса r .

Підставляючи рівняння (5) в умову, справедливу на межі розділу «оболонка-розплав»

$$-\lambda \left. \frac{dT_i(r)}{dr} \right|_{r=\eta_i} = q \cdot \rho \cdot \frac{d\eta_i}{dt} \quad (6)$$

отримаємо диференціальне рівняння руху фронту кристалізації:

$$d\eta_i = \frac{R^2}{\eta_i^2 \cdot q \cdot \rho} \cdot \left\{ \alpha_i \cdot [T_i(R) - T_2] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{cm}^4] \right\} dt_i, \quad (7)$$

де ρ - щільність розплаву; q - питома теплота кристалізації розплаву; t - час.

У рівнянні (7) невідомою величиною є значення температури поверхні мікрогранули в i -тий момент часу $T_i(R)$. Дану температуру визначимо з умови збереження теплового потоку:

$$\frac{4\pi\lambda[T_k - T_i(R)] \cdot \eta_i \cdot R}{\eta_i - R} = 4\pi R^2 \cdot \left\{ \alpha_i \cdot [T_i(R) - T_2] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{cm}^4] \right\}, \quad (8)$$

яке відносно температури поверхні частинок $T_i(R)$ можна перетворити в рівняння четвертого ступеня:

$$T_i(R)^4 + A_i \cdot T_i(R) - B_i = 0, \quad (9)$$

$$\text{де } A_i = \frac{\alpha_i}{\varepsilon \cdot \sigma} + \frac{\eta_i \cdot \lambda}{R(\eta_i - R) \cdot \varepsilon \cdot \sigma}; \quad B_i = T_{cm}^4 + \frac{\alpha_i \cdot T_2}{\varepsilon \cdot \sigma} + \frac{\eta_i \cdot \lambda \cdot T_k}{R(\eta_i - R) \cdot \varepsilon \cdot \sigma}.$$

Рішення задач теплообміну до початку кристалізації і в процесі її виконували на прикладі нікелю для умов розпилення аргонем. Величину розраховували на кожному кроці інтегрування в залежності від миттєвих значень швидкості руху частинки.

Довжина вертикальних координат траєкторій, що забезпечують повну кристалізацію і швидкість охолодження, для різних розмірів частинок з використанням рівнянь руху представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Довжина траєкторій крапель, що закристалізувались, при розпилюванні нікелевого розплаву аргонем при $T_2 = 293$ К і перегріванні розплаву 100 К

Розмір частинки $d_k, 10^{-6}$ м	100	200	400	800
Довжина траєкторії u , м	0,56	1,45	4,23	10,23
Швидкість охолодження $V_{охол}$, К/с	$2,5 \cdot 10^4$	$8,50 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$

Рішення нестационарної задачі Стефана дозволяє коректно розрахувати температурні поля в розпиленних мікрогранулах в будь-якій точці траєкторії при газовому розпилюванні, а також габарити камери розпилювання, що забезпечують повну кристалізацію в порівнянні з відомим підходом, що характеризує розпилену краплю як точковий об'єкт.

Однак на практиці в стандартних технологіях газового розпилення поряд з утворенням дрібних частинок, також має місце і утворення великих частинок ($d_k > 50-150$ мкм) з «привареними» до поверхні сателітами. Процес утворення частинок з сателітами реалізується за рахунок:

- більш швидкого охолодження дрібних частинок в газовому середовищі;
- більшій швидкості руху дрібних частинок в газовому середовищі, що призводить до зіткнення при тій же швидкості газу, при цьому частота зіткнень з урахуванням викривлення траєкторії дрібних частинок при їх наближенні до великих, описується залежністю [5]:

$$N_{1,2} = \frac{3}{2} E_{21} \cdot \beta_2 \frac{(d_1 + d_2)^2}{(d_1^3 + d_2^3)} \cdot (V_2 - V_1), \quad (10)$$

де E_{21} - коефіцієнт осадження малих частинок на велику ($E_{21} = 0,7-0,9$); β_2 - об'ємна концентрація малих частинок; V_1 і V_2 - швидкості частинок великої і дрібної фракції; d_1 і d_2 - їх розміри відповідно.

Розрахунки процесів теплообміну при утворенні частинок з сателітами вимагають уточнення - необхідно враховувати явище більш швидкого охолодження за рахунок впровадження в тіло гранули і прилипання до її поверхні більш холодних дрібних закристалізованих сателітів. Це призводить до того, що кристалізація великих часток з сателітами відбувається за більш короткий час і розмір камери розпилення може бути зменшений.

В такому випадку оцінку швидкості охолодження розплавів з високою температурою ліквідус пропонується виконувати за спрощеною методикою. З огляду на велику різницю температур розплаву і газу швидкість охолодження незалежно від температури зливу T_{Me} можна розраховувати з різниці температури ліквідус T_L і температури газу T_g . Так, для нікелевого сплаву з $T_L = 1350$ °C при $T_{Me} = 1500$ °C і $T_g = 50$ °C, відносна помилка визначення швидкості охолодження складе 12%, що цілком прийнятно для практичних розрахунків.

Швидкість охолодження визначається за формулою:

$$V_{охол} = \frac{T_{Me1} - T_{Me2}}{\Delta\tau} = \alpha \frac{(T_{Me1} - T_g) \cdot S}{c_{Me} \cdot m_{Me}}, \quad (11)$$

де S - площа поверхні частинки; m_m - маса частинки.

Коефіцієнт тепловіддачі може бути визначений по формулі $\alpha = Nu \cdot \lambda_r / d_k$.

Тоді кінцевий вид рівняння для швидкості охолодження:

$$V_{охол} = 6 \left(2 + \frac{0,276 V_g^{0,5} \cdot d_k^{0,5} \cdot \rho_g^{0,5} \cdot c_g^{0,3}}{v_g^{0,2} \cdot \lambda_g^{0,3}} \right) \cdot \frac{\lambda_g \cdot (T_L - T_1)}{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_k^2}. \quad (12)$$

З рівняння (12) видно, що $V_{охол} \sim 1/d_k^{1,5}$. Найбільш важливим є коректний вибір швидкості газу. Виходячи з даних швидкісної кінозйомки [15] виходить, що досить великі частинки набувають швидкості не вище $0,1 V_g$. Пиловидна фракція прискорюється швидше, хоча і швидше втрачає теплову енергію. Прискорення, що набуває частка пропорційно d_k (при $Re > 10^3$). Швидкість охолодження, виходячи з формули (12) пропорційна рівнянню $(A/d_k^2) + (B/d_k^{1,5})$. Оцінка показує, що якщо до початку кристалізації велика частинка прискорилося до $0,1 V_g$, то і дрібна для своїх умов прискорилося приблизно на величину порядку V_g . Звідси можна вважати, що підвищення швидкості газу сприяє зіштовхуванню дрібних і великих частинок. Для гранул розміром 100-500 мкм в стандартних умовах розпилювання кількість дрібних частинок, що впроваджуються в тіло краплі через поверхню, складе не менше 10-30 штук, а сумарна маса сателітів щодо маси основної краплі - від 5 до 10%. Орієнтовні

розрахунки показують, що довжина вертикальних треків частинок в цьому випадку зменшується приблизно на 10%, що дає можливість зменшити габарити камери розпилювання.

Висновки

Розглянуто різні підходи до розрахунку процесу охолодження крапель при газовому розпилюванні розплаву. Показано, що для розрахунку габаритів камери розпилювання необхідно враховувати явище утворення на поверхні частинок сателітів і їх вплив на процес кристалізації частинок діаметром більше 100 мкм.

Рішення задачі дозволяє коректно розрахувати треки частинок і розміри при проектуванні установок розпилення, що забезпечують повну кристалізацію сферичних мікрогранул різних розмірів.

Література

1. Терновой Ю.Ф., Кудиевский С.С., Пашетнева Н.Н. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов. Запорожье, 2005. 149 с.
2. Вебер К. Распад струи жидкости. В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. Т. 1. Москва, 1936. С. 23-27.
3. Вольнский М. С. О дроблении капель в потоке воздуха. Докл. АН СССР. 1948. № 3. С. 301-304.
4. Лышевский А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. Москва, 1963. 179 с.
5. Ничипоренко О.С., Найда Ю.И., Медведовский А.Б. Распыленные металлические порошки. Киев, 1980. 240 с.
6. Дейнеко Л. Н., Романова Н. С., Кокашинская Г. В., Ушаков Ю. Н. Теплофизические особенности и методики оценки скоростей охлаждения гранулированных алюминиевых сплавов. *Строительство, материаловедение, машиностроение : Стародубовские чтения*. 2017. С. 73-78.
7. Гессингер Г. Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Челябинск, 1988. 320 с.
8. Рудской А. И., Соколов Ю. А., Копаев В. Н. Определение теплофизических свойств материалов для моделирования процесса получения металлических гранул. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Металлургия*. 2014. № 3 (202). С. 170-179.
9. Ничипоренко, О. С. О теплообмене между частицами металла и газом. *Порошковая металлургия*. 1968. № 7. С. 3-5.
10. Путимцев Б. И. Влияние теплофизических свойств газов и металлических расплавов на свойства распыленных порошков. *Порошковая металлургия*. 1967. № 3. С. 1-7.
11. Найда Ю. И., Ничипоренко О. С., Медведовский А. В., Шульга Ю. В. Экспериментальные исследования критерия дробления расплавов. *Порошковая металлургия*. 1973. № 1. С. 1-5.
12. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. Москва, 1982. 168 с.
13. Ковнер С. С. Условие термического подобия в процессах промерзания и оттаивания. *Известия АН СССР*. 1943. Т. 3. С. 143-149.
14. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. Москва, 2003. 784 с.
15. Терновой Ю. Ф., Баглюк Г. А., Кудиевский С. С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов. Запорожье, 2008. 298 с.