Ю.Ф. Терновий¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: ferrous.metals@ukr.net

А.Г. Пригунова², д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: adel_nayka@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-8030-9160>

В.О. Панова¹, асистент, e-mail: panova_vira@ukr.net

¹Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Вимушений теплообмін і швидкість охолодження крапель при одержанні металевих порошків розпилюванням розплаву водою

Одержання якісних металевих порошків є одним з важливих етапів технологічного процесу виробництва металовиробів методом порошкової металургії. Серед великого різноманіття способів виготовлення порошків за економічністю і продуктивністю вигідно відрізняється розпилення розплавів водою високого тиску, при якому геометрична форма та мікроструктура частинок суттєво залежать від швидкості охолодження, що пов'язано з особливостями теплообміну в системі крапля розплаву – вода – газова фаза. Проте експериментальне підтвердження того чи іншого режиму теплообміну не представляється можливим, що пов'язано з малим розміром частинок, кількість яких у 1 см³ зони розпилення складає близько 10⁷. У роботі проаналізовано вплив теплофізики процесу розпилення на швидкість тверднення крапель металу. На підставі аналізу відомих закономірностей та явищ тепломасопереносу оцінено коефіцієнти тепловіддачі, щільність теплового потоку для різних режимів теплообміну, а також внески кондуктивної, конвективної і радіаційної складових тепловіддачі. Показано, що частка передачі тепла випромінюванням становить не більше 0,1 %. Теоретично підтверджено, що охолодження крапель відбувається в бульбашковому режимі кипіння води. Для інструментальної сталі швидкість охолодження частинок, що розрахована на основі коефіцієнта тепловіддачі при розвиненому бульбашковому режимі, складає порядку 10⁶ К/с. Така швидкість охолодження при бульбашковому або псевдобульбашковому кипінні забезпечується, коли парова плівка, що утворюється, «зривається» водяним потоком, імітуючи охолодження «псевдобульбашками». Формування коміркової структури порошків, яке спостерігається на практиці під час розпилення водою під тиском, підтверджує правильність теоретичних викладок. Результати роботи можуть бути використаними для обґрунтування теплових режимів отримання порошків з різною структурою, у тому числі аморфною.

Ключові слова: розпилення водою високого тиску, теплопередача, вимушена конвекція, коефіцієнт тепловіддачі, кипіння, бульбашковий режим, швидкість охолодження.

Вступ. Розвиток порошкової металургії, що зумовлено істотним скороченням витрат матеріалів на виробництво, можливістю отримання матеріалів і виробів зі структурою і властивостями, яких не можна досягти традиційними металургійними технологіями, потребує удосконалення всіх стадій цього процесу (підготовки порошків, змішування, спікання, механічного оброблення). Перш за все, це стосується одержання якісних порошків, методи виготовлення яких є досить різноманітними [1]. Серед них важливе місце належить водяному розпиленню розплавів, що, передусім, пов'язано з його високою продуктивністю

і економічністю. Разом з тим, не дивлячись на досить широке практичне використання водяного розпилення для одержання металевих порошків, теоретичні аспекти цього питання недостатньо вивчено, що являє собою актуальну наукову задачу.

Постановка задачі і мета роботи. Ґрунтуючись на роботах Ничипоренка О.С. [2–4], можна прогнозувати, що при контакті води з поверхнею розплавленого металу теплообмін може відбуватися за однією з наступних схем: теплопередача за рахунок вимушеної конвекції з водою, бульбашкове кипіння з максимальним коефіцієнтом тепловіддачі і в подаль-

шому стійке плівкове кипіння з порівняно низьким коефіцієнтом тепловіддачі в умовах, коли температура розплаву в зоні контакту істотно перевищує критичне значення для води. Такий механізм підтверджується цілим рядом досліджень, зокрема, роботами Кутателадзе С.С. та Міхєєва М.А. [5–7].

Вочевидь, що процес теплообміну в системі крапля розплаву – вода – пар визначає структуру, а отже й експлуатаційні характеристики одержуваного порошку [8]. Проте, оскільки в зоні розпилення міститься близько 10^7 частинок в 1 см^3 об'єму, експериментальне підтвердження того чи іншого режиму теплообміну не представляється можливим. Тому **метою роботи** є визначення теоретичних режимів теплообміну при розпилюванні розплаву водою високого тиску та проведення аналізу впливу теплофізики процесу розпилення на швидкість твердіння крапель при одержанні металевих порошків.

Результати дослідження. В реальних умовах розпилення температура води, що подається на струмись розплаву, близька до кімнатної, а температура розплаву перед розпиленням становить 1673–1973 К. За таких умов температура металу набагато перевищує температуру насичення води, що, згідно з уявленнями про охолодження крапель розплавленого металу в недогрітій рідині [8, 9], забезпечує при контакті практично миттєве встановлення плівкового режиму кипіння. По мірі охолодження металу режим теплообміну буде визначатися щільністю теплового потоку в області контакту.

Критична щільність теплового потоку $q_{\text{кр}1}$, що характеризує перехід від бульбашкового до плівкового режиму кипіння, залежить від тиску і слабо залежить від природи матеріалу і форми об'єкта, що охолоджується. Так, в роботі [6] на підставі обробки чисельних літературних даних показано практично повний збіг щільності теплового потоку при охолодженні водою труби, пластини, дроту з ніхром, графіту, міді, нікелю, сплаву Ni-Cr, хрому, хромелі. При тиску води 2,0–14,0 МПа величина $q_{\text{кр}1} \approx (3,5 \dots 4,1) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Для визначення теплового режиму при розпилюванні водою оцінимо величину теплових потоків для випадку високотемпературних розплавів (понад 1273 К), користуючись відомим законом Ньютона-Ріхмана для конвективного теплообміну:

$$q = \alpha (T_{\text{ме}} - T_{\text{в}}), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; $T_{\text{ме}}$ – температура металу; $T_{\text{в}}$ – температура води.

При нагріванні води внаслідок контакту з розплавом від вихідної температури до температури насичення, яка в широкому діапазоні високих тисків дорівнює 350 °С, розрахунок коефіцієнту тепловіддачі α_1 в цьому випадку може вестися з урахуванням відомих залежностей [11]:

$$\alpha_1 = (Nu \cdot \lambda_{\text{в}}) / d_{\text{к}}, \quad (2)$$

$$\text{де } Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} (Re > 10^4), \quad (3)$$

де Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; $d_{\text{к}}$ – діаметр краплі розплаву; $\lambda_{\text{в}}$ – коефіцієнт теплопровідності води.

У разі розвиненого бульбашкового кипіння при $P \leq 2,0$ МПа, згідно з уявленнями С.С. Кутателадзе, коефіцієнт тепловіддачі визначається формулою [5]:

$$\alpha_2 \approx 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot P^{0,4} \left\{ 4,8 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{H}_2\text{O}} \left[\gamma_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{н}}^2 (\rho_{\text{ме}} - \rho_{\text{н}}) \right]^{-0,5} \right\}, \quad (4)$$

де P – тиск води в контакті з охолоджуваною поверхнею; $\beta_{\text{в}}$ – питома теплота пароутворення; $\gamma_{\text{в}}$ – питома поверхнева енергія води; $\rho_{\text{н}}$ – щільність водяної пари; $\rho_{\text{ме}}$ – щільність металу.

У роботі [7] для широкого набору експериментальних даних показано, що величина α_2 практично не залежить від швидкості водяного потоку, але, як це видно з формули (4), залежить від тиску. Крім того, згідно з [7], α_2 – нелінійна величина і істотно залежить від щільності теплового потоку:

$$\alpha_2 = q^{2/3} \cdot (3,4 P^{0,18}) / (1 - 0,0045 P). \quad (5)$$

Справедливість формули (5) експериментально підтверджено в діапазоні тисків 1,0–20,0 МПа.

При плівковому кипінні [5, 12] коефіцієнт тепловіддачі α_3 при вимушеній конвекції визначається за виразом:

$$\alpha_3 = \left[\frac{\lambda_{\text{н}} \beta_{\text{в}} \rho_{\text{н}} V_{\text{в}} \phi}{(T_{\text{ме}} - T_{\text{н}}) d_{\text{к}}} \right]^{-0,5}, \quad (6)$$

де $\lambda_{\text{н}}$ – коефіцієнт теплопровідності пари; $V_{\text{в}}$ – швидкість руху води;

$$\phi = 1 + \frac{c_{\text{п}}}{2 \beta_{\text{в}} (T_{\text{ме}} - T_{\text{н}})},$$

де $c_{\text{п}}$ – питома теплоємність водяної пари; $T_{\text{н}}$ – температура водяної пари.

Оскільки величини q , що реалізуються в різних режимах, заздалегідь невідомі, оцінимо їх на всіх стадіях теплообміну і порівняємо з величиною $q_{\text{кр}1}$. Це дозволить встановити реальний режим теплообміну, що реалізується при розпиленні високотемпературних матеріалів.

Величина α_1 для крапель інструментальної сталі розміром 10–100 мкм, яка розрахована за формулами (2) і (3), становить $(12 \dots 7,3) \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ і практично не залежить від розміру крапель розплаву. Величина α_3 , що розрахована за формулою (6), для розміру частинок, що попадають у вище зазначений діапазон, складає $(3,6 \dots 1,1) \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Складніше виконати розрахунки α_2 за формулою (5). Беручи до уваги залежності (1) і (5), отримаємо:

$$q = (T - T_{\text{в}})^3 \left(\frac{3,4 P^{0,18}}{1 - 0,0045 P} \right)^3. \quad (7)$$

Звідси, величина α_2 визначиться за виразом:

$$\alpha_2 = (T - T_B)^2 \left(\frac{3,4P^{0,18}}{1 - 0,045P} \right)^3. \quad (8)$$

При температурі розплаву $T \approx 1673$ К і тиску води $P \approx 10,0$ МПа величина α_2 становить приблизно $4 \cdot 10^9$ Вт/(м² · К). Така величина α_2 вимагає оцінки числа Ві. Дійсно, для частинок розміром 100–10 мкм величина $Bi \approx 5 \cdot (10^1 \dots 10^2)$. Тобто, при теплообміні краплі не можна вважати точковими об'єктами, а процесом, що лімітує тепловий потік, буде теплопровідність тіла частинки. Тому для крапель розміром 100 мкм:

$$\alpha_2^* \sim \lambda_{Me}/d_k \approx 4 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (9)$$

У роботі [13] оцінено кондуктивну складову коефіцієнта тепловіддачі. Показано, що на відміну від α , розрахованого за формулою (4), його величина на 1–2 порядки нижча. В роботі [14] разом з конвективною складовою тепловіддачі проведено оцінку внеску радіаційної складової. Конвективну складову ($Q_{конв}$) для умов вимушеної конвекції оцінено з використанням уявлень про вільну конвекцію, а радіаційну складову ($Q_{випр.}$) оцінено як співмірну за порядком величини з конвективною. Так, при тиску 5,0 МПа ці величини для сталі Р6М5 склали відповідно $1 \cdot 10^4$ і $5 \cdot 10^4$ Вт/(м² · К). Проте відомо, що втрати теплової енергії в одиницю часу за рахунок конвекції складають:

$$\frac{dQ_{конв}}{dt} = \alpha S (T_{Me} - T_{cp}), \quad (10)$$

а за рахунок випромінювання:

$$\frac{dQ_{випр.}}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{Me}^4 - T_{cp}^4), \quad (11)$$

де T_{cp} – температура середовища охолодження; σ – константа Стефана-Больцмана; S – площа поверхні теплообміну; ε – ступінь чорноти.

Якщо величину α при 5 МПа прийняти такою, як визначено в роботі [14], і знайти співвідношення величин dQ/dt за формулами (10) і (11), то навіть при ступеню чорноти $\varepsilon = 1$ воно складе 10^{-3} . Це говорить про те, що внесок випромінювання при початковій температурі розпилення складає не більше 0,1 %. Далі по мірі охолодження крапель розплаву цей внесок буде падати відповідно до T_{Me}^3 . Абсолютний внесок теплообміну випромінюванням може бути оцінений за виразом:

$$\alpha_{випр.} = \varepsilon \sigma \frac{T_{Me}^4 - T_{cp}^4}{T_{Me} - T_{cp}} \approx 10^2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (12)$$

Тобто, ця величина в 10^2 разів нижче наведеної в роботі [14].

З огляду на те, що за оціночними даними $\alpha_1 \approx 10^5 \dots 10^6$ Вт/(м² · К), тепловий потік складе $10^8 \dots 10^9$ Вт/м². Це в 30–300 разів вище за $q_{кр1}$. Згідно з класичним уявленням, перевищення критичної щільності теплового потоку означає встановлення плівкового режиму кипіння. Однак величина коефіцієнта тепловіддачі є типовою для бульбашкового режиму кипіння і свідчить про дестабілізацію парової плівки в умовах розпилення, що може бути обумовлено, зокрема, великою швидкістю потоку води, що омиває поверхню, його турбулентністю, а також формою частинок, що утворюються. В роботі [15] також показано зростання температури Лейденфроста зі збільшенням сили удару крапель води (числа Вебера) об поверхню нагріву, що також звужує область температур існування плівкового режиму кипіння. Таким чином, є очевидним, що охолодження крапель металу при розпилюванні розплаву здійснюється в режимі бульбашкового кипіння.

З огляду на високі температури розпилення і ліквідусу спеціальних сталей і сплавів, різниця температур ліквідусу і води, а також різниця температур перегріву і води близькі, досить великі, тому швидкість охолодження можна оцінити так:

$$V_{охл} = \frac{T_{Me1} - T_{Me2}}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{Me1} - T_B}{c_{Me} m_{Me}} S^*, \quad (13)$$

або після підстановки в явному вигляді S і m_{Me} :

$$V_{охл} = 6\alpha_2 \frac{T_{Me1} - T_B}{c_{Me} d_k \rho_{Me}}, \quad (14)$$

де T_{Me1} , T_{Me2} – температура металу на початку та наприкінці інтервалу часу охолодження Δt відповідно; c_{Me} – теплоємність металу; m_{Me} – маса краплі металу.

Беручи до уваги значення α_2 , що розраховане за формулою (4), швидкість охолодження крапель розплаву інструментальної сталі розміром 10, 50 і 100 мкм склали відповідно: $6,7 \cdot 10^6$ К/с; $1,3 \cdot 10^6$ К/с; $7,0 \cdot 10^5$ К/с. З урахуванням даних Мірошніченка І.С. [16], таким швидкостям охолодження крапель металу відповідає утворення коміркової структури, що підтверджено мікроструктурними дослідженнями порошків, отриманих розпиленням водою високого тиску з використанням форсунок різного типу (рисунок, а–б). Забезпечується така швидкість охолодження бульбашковим або псевдобульбашковим кипінням, коли парова плівка, що формується, «зривається» водяним потоком, імітуючи охолодження «псевдобульбашками». У той же час, дендритна структура, яка спостерігається при розпиленні легкоплавких металів з характерними швидкостями охолодження порядку 10^4 К/с, є ідентичною структурі, що формується при газовому розпиленні рідкого металу (рисунок, в), що опосередковано говорить на користь наявності газової оболонки в процесі охолодження частинок, тобто плівкового кипіння.

а

б

в

Мікроструктура порошків: а – сталь Р6М5Ф3, розпилення водою високого тиску, форсунка Маннесманна, фракція 100–160 мкм, $\times 300$; б – феромарганець ФМн1,5, розпилення водою високого тиску «в смерчі» [17], фракція 65–100 мкм, $\times 400$; в – лігатура Mn-Si-Mo-Ti-Fe, розпилення газом, фракція 100–160 мкм, $\times 400$

Висновки

1. Теоретично підтверджено, що процес охолодження крапель розплавленого металу при одержанні порошків розпилюванням води під високим тиском переважно здійснюється в режимі бульбашкового кипіння.

2. Швидкість охолодження частинок металевого порошку при водному розпиленні розплаву можна оцінити за залежностями для обчислення коефіцієнта тепловіддачі при розвиненому бульбашковому режимі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 385 с.
2. Ничипоренко О.С., Найда Ю.И., Медведевский Л.Б. Распыленные металлические порошки. Киев: Наукова думка, 1980. 237 с.
3. Ничипоренко О.С. Формирование частиц порошка при распылении расплава водой. *Порошковая металлургия*. 1976. № 9. С. 5–10.
4. Ничипоренко О.С. О механизме диспергирования расплава водой. Труды XII Всесоюзной конференции по порошковой металлургии: Сб. ЛатНИТИ. Рига. 1975. Т. 2. С. 10.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. Москва: Энергия, 1979. 284 с.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 660 с.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1973. 319 с.
8. Терновой Ю.Ф., Баглюк Г.А., Кудиевский С.С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов: Монография. Запорожье: ЗГИА, 2008. 298 с.
9. Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Низовский В.Л., Шехтер Ю.Л. Микропузырьковое кипение: механизм процесса, задачи и методы исследований. *Теплофизика высоких температур*. 2009. Т. 47. № 5. С. 707–711.
10. Ягов В.В., Забиров А.Р., Лексин М.А. Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости. *Теплоэнергетика*. 2015. № 11. С. 70–80.
11. Галицейский Б.М., Данилов Ю.И., Дрейцер Г.А. и др. Теплообмен в энергетических установках космических аппаратов. Москва: Наука, 1975. 271 с.
12. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Москва: Энергия, 1975. 483 с.
13. Ничипоренко О.С. Формообразование частиц порошка при распылении расплава водой. *Порошковая металлургия*. 1976. № 9. С. 5–10.
14. Санин А.Ф., Ничипоренко О.С. Влияние давления воды на форму частиц порошка при распылении. Сообщение 1. Особенности теплообмена в факеле распыления при высоких давлениях энергоносителя. *Порошковая металлургия*. 1988. № 9. С. 1–5.

15. Tran T., Staat H.J.J., Prosperetti A., Sun Ch., Lohse D. Drop Impact on Superheated Surfaces. *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108, 036101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.036101>
16. Мирошніченко І.С. Закалка из жидкого состояния. Москва: Металлургия, 1982. 168 с.
17. А. с. 1603649 СССР. А1 В22 F9/08. Способ получения пассивированного порошка среднеуглеродистого ферромарганца / Ю.Ф. Терновой, В.И. Билан, А.П. Александров; заявл. 27.10.1988, опубл. 27.10.1989.

Надійшла 13.10.2020

REFERENCES

1. Girshov, V.L., Kotov, S.A., Tsemenko, V.N. (2010). Modern technologies in powder metallurgy. St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. University, 385 p. [in Russian].
2. Nichiporenko, O.S., Naida, Yu.I., Medvedovsky, L.B. (1980). Atomized metal powders. Kiev: Naukova Dumka, 237 p. [in Russian].
3. Nichiporenko, O.S. (1976). Formation of powder particles by spraying the melt with water. *Powder metallurgy*, no. 9, pp. 5–10 [in Russian].
4. Nichiporenko, O.S. (1975). About the mechanism of melt dispersion by water. Proceedings of the XII All-Union Conference on Powder Metallurgy: Sat. LatNITI. Riga, vol. 2, p. 10 [in Russian].
5. Kutateladze, S.S. (1979). Heat transfer by condensation and boiling. Moscow: Energiya, 284 p. [in Russian].
6. Kutateladze, S.S. (1970). Foundations of the theory of heat transfer. Novosibirsk: Nauka, 660 p. [in Russian].
7. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. (1973). Basics of heat transfer. Moscow: Energiya, 319 p. [in Russian].
8. Ternovoy, Yu.F., Baglyuk, G.A., Kudievsky, S.S. (2008). Theoretical foundations of processes of sputtering of metal melts: Monograph. Zaporozhye: ZGIA, 298 p. [in Russian].
9. Zeigarnik, Yu.A., Khodakov, K.A., Nizovsky, V.L., Shekhter, Yu.L. (2009) Microbubble boiling: process mechanism, tasks and research methods. *Thermal physics of high temperatures*, vol. 47, no. 5, pp. 707–711 [in Russian].
10. Yagov, V.V., Zabirow, A.R., Leksin, M.A. (2015). Unsteady heat transfer during film boiling of a subcooled liquid. *Heat power engineering*, no. 11, pp. 70–80 [in Russian].
11. Galitseyskiy, B.M., Danilov, Yu.I., Dreitser, G.A. et al. (1975). Heat transfer in power plants of spacecraft. Moscow: Nauka, 271 p. [in Russian].
12. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. (1975). Heat transfer. Moscow: Energiya, 483 p. [in Russian].
13. Nichiporenko, O.S. (1976). Formation of powder particles by spraying the melt with water. *Powder metallurgy*, no. 9, pp. 5–10 [in Russian].
14. Sanin, A.F., Nichiporenko, O.S. (1988). Influence of water pressure on the shape of powder particles during spraying. Message 1. Features of heat transfer in the spray plume at high pressures of the energy carrier. *Powder metallurgy*, no. 9, pp. 1–5 [in Russian].
15. Tran, T., Staat, H.J.J., Prosperetti, A., Sun, Ch., Lohse, D. (2012). Drop Impact on Superheated Surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, 036101, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.036101>
16. Miroshnichenko, I.S. (1982). Quenching from a liquid state. Moscow: Metallurgiya, 168 p. [in Russian].
17. Ternovoy, Yu. F., Bilan, V.I., Aleksandrov, A.P. (1989). Method of obtaining passivated medium-carbon ferromanganese powder. A. s. 1603649 USSR. А1 В22 F9/08, declared 10/27/88, publ. 10/27/89. [in Russian].

Received 13.10.2020

Summary

Yu.F. Ternovyi¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department,
e-mail: ferrous.metals@ukr.net

A.G. Prigunova², Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of
Department, e-mail: adel_nayka@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8030-9160>

V.O. Panova¹, Assistant, e-mail: panova_vira@ukr.net

¹*Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)*

²*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Forced heat exchange and cooling rate of drops at producing metal powders by melt water atomization

The production of high-quality metal powders is one of the important stages of the technological process for the production of metal products using the powder metallurgy method. Among the wide variety of methods for making powders, in terms of efficiency and productivity, the spraying of melts with high-pressure water is favorably distinguished, in which the geometric shape and microstructure of particles significantly depend on the cooling rate, which is associated with the peculiarities of heat transfer in the melt drop – water – gas phase system. However, experimental confirmation of one or another mode of heat transfer is not possible, which is associated with the small size of particles, the number of which in 1 cm³ of the spray zone is about 10⁷. The influence of the thermal physics of the sputtering process on the solidification rate of metal droplets is analyzed. Based on the analysis of the known regularities and phenomena of heat and mass transfer, the heat transfer coefficients, the heat flux density for various heat transfer modes, as well as the contribution of the conductive, convective and radiation components of heat transfer are estimated. It is shown that the fraction of heat transfer by radiation is no more than 0.1 %. It has been theoretically proven that droplets are cooled in the bubble mode of water boiling. For tool steel, the particle cooling rate calculated on the basis of the heat transfer coefficient in the developed bubble mode is about 10⁶ K/s. Such a cooling rate during bubble or pseudobubble boiling is provided when the resulting vapor film is "torn off" by the water flow, simulating "pseudobubble" cooling. The formation of a cellular structure of powders, which is observed in practice during spraying with water under pressure, confirms the correctness of the theoretical calculations. The results of the work can be used to substantiate the thermal regimes for obtaining powders with various structures, including amorphous ones.

Keywords

High pressure water spraying, heat transfer, forced convection, heat transfer coefficient, boiling, bubble regime, cooling rate.