

В.І. Іванов ⁽¹⁾, ст. наук. співробітник
Т.М. Нестеренко ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
В.О. Скачков ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
Ю.М. Радченко ⁽²⁾, доцент, к.т.н.
Г.В. Карпенко ⁽¹⁾, асистент

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС УЩІЛЬНЕННЯ ВОГНЕТРИВКИХ ПОРОШКОВИХ СИСТЕМ ТИСКОМ

(Повідомлення 1)

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,

⁽²⁾ Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ

С позицій термодинамики необратимых процессов проанализированы особенности процесса уплотнения огнеупорных порошковых систем давлением. Рассмотрены варианты начальных и граничных условий развития данного процесса, а также закономерности изменения полей давления по сечению уплотняемого полуфабриката в ходе процесса прессования. Представлены понятия о «тонких» и «массивных» телах при уплотнении огнеупорных порошковых систем давлением.

З позицій термодинаміки необоротних процесів проаналізовано особливості процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском. Розглянуто варіанти початкових і межових умов розвитку даного процесу, а також закономірності змінювання полів тиску за перерізом ущільнюваного напівфабрикату протягом процесу пресування. Подано поняття про «тонкі» та масивні» тіла під час ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском.

Вступ. Завданням розробки будь-якої теоретичної моделі є створення аналітичного опису механізму перенесення енергії та маси на певній стадії технологічного процесу в просторі та за часом, а, отже, й забезпечення прогнозування розвитку окремих стадій процесу, що досліджують.

Аналіз досягнень. У роботі [1] запропоновано феноменологічну теорію, за якої процес пресування вогнетривких порошкових систем розглядають не як деформацію об'єму маси у прес-формі з початковою насипною щільністю ρ_0 до заданих кінцевих розмірів напівфабрикату та його середньої кінцевої щільності $\bar{\rho}_k$, а як перенесення енергії й маси речовини до просторової області із заданою формою та кінцевими розмірами для одержання напівфабрикату із заданою середньою (щодо перерізу) щільністю.

Такий підхід дозволяє не тільки значно спростити математичний опис динаміки розвитку даного процесу за просторово-часовими координатами, але й намітити шляхи вирішення інженерних задач щодо прогнозування раціональних енерготехнологічних умов продукування вогнетривкого напівфабрикату та його якісних показників.

Головні початкові положення запропонованої теорії пресування базуються на відомих уявленнях про розвиток даного процесу [2,3], які одержано різними дослідниками на підставі значного обсягу експериментальних даних.

Відповідно до зазначеної теорії процес пресування вогнетривких порошкових систем є бародифузійним процесом перенесення енергії та маси речовини: потік енергії компресії $\vec{J}_p$ від пуансонів до поверхні порошкової системи спричиняє виникнення потоків маси речовини $\vec{J}_m$ вглиб ущільнюваного напівфабрикату, які, в свою чергу,

дифузійним шляхом забезпечують перенесення енергетичних потоків. Стаціонарні потоки перенесення маси та енергії описуються лінійними співвідношеннями Онзагера [4]:

$$\vec{J}_m = -L_{mp} \cdot \text{grad } P = -L_{mp} \frac{dP_z}{dz} \quad (1)$$

$$\vec{J}_p = -L_{pp} \cdot \text{grad } P = -L_{pp} \frac{dP_z}{dz}, \quad (2)$$

де $\vec{J}_m$, $\vec{J}_p$ – питомі потоки маси речовини та енергії компресії відповідно; L_{mp} , L_{pp} – феноменологічні коефіцієнти за бародифузійним перенесенням маси речовини та тиску під час пресування вогнетривких порошкових систем відповідно; $\frac{dP_z}{dz}$ – градієнт тиску щодо осі z – рушійна сила перенесення.

Процеси перенесення енергії та маси речовини під час пресування є нестационарними і необоротними, що дозволяє описувати локальні змінювання тиску та щільності щодо перерізу напівфабрикату за часом (τ) узагальненими диференціальними рівняннями Умова [5]:

$$\frac{\partial P_z}{\partial \tau} = \text{div} \left(-L_{pp} \frac{dP_z}{dz} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div} \left(-L_{mp} \frac{dP_z}{dz} \right). \quad (4)$$

Після сумісного вирішення рівнянь (3) і (4) залежність концентрації маси (ρ) речовини від наданого тиску (P_z) записують як

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{L_{mp}}{L_{pp}} \frac{\partial P_z}{\partial \tau} \quad (5)$$

або

$$\Delta \rho = \frac{L_{mp}}{L_{pp}} \cdot \Delta P_z. \quad (6)$$

Співвідношення L_{mp}/L_{pp} , що наведено у рівнянні (6), має складний функціональний характер, залежить від властивостей вогнетривких порошкових систем та значення наданого тиску, тому й не може бути визначено аналітичним шляхом.

У зв'язку з цим опис процесів перенесення для конкретної вогнетривкої порошкової системи здійснюють за такою послідовністю. На початковій стадії виконують розрахунок усереднених значень тиску $\bar{P}_z$ щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату (z) за часом, а потім переходять до розрахунку полів концентрації маси речовини $\rho = \rho(z, \tau)$ за допомогою відомих емпіричних «рівнянь пресування» $\rho = \rho(P)$ або після проведення додаткових експериментальних досліджень. Результати перевірки адекватності запропонованої моделі реальному технологічному процесу пресування вогнетривкового напівфабрикату подано у роботах [1,6].

За декартовою системою координат рівняння енергопровідності (3), що приведене до одновимірної задачі, має вигляд:

$$\frac{\partial P_z}{\partial \tau} = a_p \frac{\partial^2 P_z}{\partial z^2}, \quad (7)$$

де a_p – коефіцієнт потенціалопровідності вогнетривкої порошкової системи у прес-формі; під час зональних розрахунків його значення визначають на підставі експериментальних результатів з використанням кривих $P = f(\tau)$, а також наступних обчислень, для відповідних періодів ($\Delta\tau$) режиму пресування.

Для одержання однозначних вирішень рівняння енергопровідності (7) необхідним є завдання крайових умов процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском, тобто початкових і граничних умов зазначеного процесу.

Постановка завдання. Дане повідомлення присвячене розгляду різних варіантів завдання початкових і граничних умов процесу ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском, а також закономірностей змінювання полів тиску за перерізом ущільнюваного напівфабрикату під час процесу пресування.

Основна частина досліджень. Початкові умови процесу, що розглядають, характеризують форму та розміри напівфабрикату, фізико-мінералогічний склад, вологість і насипну щільність вогнетривкої порошкової системи, розподіл тиску та концентрації маси щодо товщини ущільнюваного напівфабрикату за $\tau = 0$.

Граничні умови визначають умови взаємодії енерго- та масосприймаючої поверхні ущільнюваного напівфабрикату з енергетичною системою пресу (умови першого, другого та третього роду).

Граничні умови першого роду визначають характер змінювання тиску на енерго- та масосприймаючій поверхні ущільнюваного напівфабрикату ($P_{нов}$) під час обробки вогнетривкої порошкової системи тиском:

– $P_{нов} = \text{const}$ – ущільнення вогнетривкої порошкової системи на пресах ударної дії під час «миттєвого» підвищення тиску на поверхні ущільнюваного напівфабрикату до максимальної величини з подальшою витримкою за його постійним значенням на окремих стадіях процесу ущільнення;

– $\partial P_{нов} / \partial \tau = \text{const}$ – ущільнення вогнетривкої порошкової системи за постійної швидкості підвищення тиску на поверхні ущільнюваного напівфабрикату (окремі стадії процесу ущільнення).

Граничні умови другого роду визначають характер змінювання енергетичного потоку (q_p), що приходить на енерго- та масосприймаючу поверхню ущільнюваного напівфабрикату, під час обробки вогнетривкої порошкової системи:

– $q_{нов} = \text{const}$ – ущільнення вогнетривкої порошкової системи за постійного значення енергетичного потоку, що приходить на поверхню ущільнюваного напівфабрикату (окремі стадії процесу ущільнення);

– $\partial q_{нов} / \partial \tau = C_q = \text{const}$ – ущільнення вогнетривкої порошкової системи під час постійної швидкості підвищення енергетичного потоку, що приходить на поверхню ущільнюваного напівфабрикату (окремі стадії процесу ущільнення).

Граничні умови третього роду визначають інтенсивність енерговіддачі для системи «прес-вогнетривка порошкова система» у вигляді співвідношення:

$$q_p = \alpha_e \cdot (P_{дж} - P_{нов}), \quad (8)$$

де α_e – коефіцієнт енерговіддачі; $P_{дж}$ – максимальний тиск джерела – енергосистеми пресу.

Таким чином, граничні умови дозволяють подати режими ущільнення вогнетривких порошкових систем за аналітичною формою. Вирішення рівняння енергопровідності (7) за відповідних крайових умов є аналітичним описом розподілу тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату протягом процесу його ущільнення за функцією $P = f(z, \tau)$.

Моделюючи ущільнюваний напівфабрикат прямокутної форми «нескінченною пластиною», що має товщину 2δ за необмеженими розмірами щодо довжини та ширини, можна одержати відносно прості вирішення рівняння (7). При цьому вплив стінок прес-форми на перенесення енергії до заданої просторової області із заданою формою та розмірами враховують у ефективних значеннях коефіцієнта потенціалопровідності (a_p), величину якого визначають експериментально-розрахунковим шляхом за відповідних крайових умов. Під час симетричного двостороннього надавання тиску вісь z розміщують уздовж осі симетрії ущільнюваного напівфабрикату, а розрахункову товщину «пластини» визначають як величину δ .

За різних варіантів початкових і граничних умов прогнозування розвитку технологічного процесу ущільнення вогнетривкої порошкової системи одержує відповідну аналітичну інтерпретацію. Розглянемо деякі з них.

I. Пресування за граничних умов першого роду, коли тиск на поверхні «пластини» миттєво підвищують до $P_{нов} = P_{max}$ із подальшою витримкою ($P_{нов} = \text{const}$) протягом часу τ . На початку процесу ($\tau = 0$) розподіл тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату має рівномірний характер, тобто $P(z, 0) = P_0$.

Вирішення рівняння енергопровідності (7) за наведеними початковими та граничними умовами можна подати як

$$\theta_p = \sum_{\ell=1}^{\infty} A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot \exp \left(-K_{\ell}^2 \cdot Fo_p \right), \quad (9)$$

де θ_p – відносний тиск у точках з координатами $z = 0 \dots \delta$ щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату; $\theta_p = \frac{P_z - P_{нов}}{P_0 - P_{нов}}$; P_z – тиск у точках з координатами $z = 0 \dots \delta$ щодо перерізу

ущільнюваного напівфабрикату; $A_{\ell} = \frac{2(-1)^{\ell+1}}{K_{\ell}} = \text{const}$; K_{ℓ} – порядковий номер члена ряду:

$K_{\ell} = \frac{(2\ell-1) \cdot \pi}{2}$, $U_{\ell} = \cos \left(\frac{K_{\ell} \cdot z}{\delta} \right)$; Fo_p – критерій гомохронності Фур'є за бародифузійним

перенесенням енергії, $Fo_p = \frac{a_p \cdot \tau}{\delta^2}$.

Використовуючи термінологію Г.М. Кондратьєва з області теорії теплопровідності [7] та позначивши $\frac{K_{\ell}^2 \cdot a_p}{\delta^2} = m_{\ell}$, можна визначити величину m_{ℓ} як «темпересування» (аналог «темпу нагрівання»).

При $Fo \geq 0,3$ другий і наступні члени ряду правої частини рівняння (9) стають зневажливо малими та рівняння приймає більш простий вигляд:

$$\theta_p = A_1 \cdot U_1 \cdot \exp \left(-m_1 \cdot \tau \right). \quad (10)$$

Рівняння (10) описує «регулярний» період процесу ущільнення, коли тиск у всіх точках ущільнюваного напівфабрикату змінюється за одним і тим же законом. Такий період (τ_p) починається із залученням до даного процесу елементарних шарів вогнетривкої порошкової системи, що розташовані поблизу нерухомого пуансона, коли здійснюють одностороннє надавання тиску до поверхні ущільнюваного напівфабрикату або елементарних шарів порошку центральної частини ущільнюваного напівфабрикату, коли реалізують симетричне двостороннє надавання тиску до його поверхні.

Нерегулярний («інерційний») період, який має місце на початковій стадії ущільнення, характеризується послідовним залученням до процесу перенесення енергії сусідніх шарів порошку ущільнюваного напівфабрикату. Тривалість такого періоду (τ_{in}) визначається значеннями коефіцієнтів інерції (K_{in}), потенціалопровідності (a_p) та розрахункової товщини ущільнюваного напівфабрикату (δ):

$$\tau_{in} = \frac{\delta^2}{K_{in} \cdot a_p} . \quad (11)$$

Для пластини $K_{in} = 6$ [7], тоді

$$\tau_{in} \cong \frac{0,2 \delta^2}{a_p} . \quad (12)$$

2. Пресування «пластини» за граничних умов першого роду $\partial P_{nov}/\partial \tau = \text{const}$. На початковий момент процесу розподіл тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату здійснюється за параболічним законом, тобто

$$P(z,0) = P_{u,0} + \frac{z^2}{\delta^2} \cdot \Delta P_0 . \quad (13)$$

У цьому разі розподіл тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату за часом підпорядковується рівнянню:

$$P(z,\tau) = P_{nov,0} + C_p \cdot \tau + \frac{C_p \cdot \delta^2}{2a_p} \cdot \left(\frac{z^2}{\delta^2} - 1 \right) + \\ + \frac{C_p \cdot \delta^2}{a_p} \cdot \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{\ell+1}}{K_{\ell}} \cdot \exp(K_{\ell} \cdot Fo_p) \cdot \cos\left(\frac{K_{\ell} \cdot z}{\delta}\right) , \quad (14)$$

де $P_{u,0}$ – тиск у центрі ущільнюваного напівфабрикату на початку одного зі ступенів пресування; ΔP_0 – різниця тиску між поверхнею та центром ущільнюваного напівфабрикату на початку одного зі ступенів пресування.

3. Пресування «пластини» за граничних умов другого роду $C_{q,nov} = \text{const}$, коли початковий розподіл тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату має параболічний характер

$$P(z,0) = P_{u,0} + \frac{z^2}{\delta^2} \cdot \Delta P_0 . \quad (15)$$

описується нижченаведеним рівнянням змінювання тиску за часом:

$$P(z,\tau) = P_{u,0} + \frac{\Delta P_0}{3} \cdot \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{\ell}}{K_{\ell}} \cdot \exp(-K_{\ell}^2 \cdot Fo_p) \cos\left(\frac{K_{\ell} \cdot z}{\delta}\right) + \\ + \frac{q_p \cdot \delta}{\lambda_p} \cdot \left[Fo_p - \frac{\delta^2 - 3z^2}{6\delta^2} + \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{\ell+1}}{K_{\ell}} \cdot \exp(-K_{\ell}^2 \cdot Fo_p) \cdot \cos\left(\frac{K_{\ell} \cdot z}{\delta}\right) \right] + \frac{C_q \cdot \delta^3}{\lambda_p \cdot a_p} \cdot \\ \cdot \left[\frac{z^2}{12\delta^2} + \frac{z^2}{2\delta^2} \cdot Fo_p + Fo_p^2 - \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{\ell+1}}{K_{\ell}} \cdot \exp(-K_{\ell}^2 \cdot Fo_p) \cdot \cos\left(\frac{K_{\ell} \cdot z}{\delta}\right) \right] , \quad (16)$$

де λ_e – коефіцієнт енергопровідності ущільнюваного напівфабрикату.

4. Пресування «пластини» за граничних умов третього роду $P_{\text{дж}} = \text{const}$ і початковим рівномірним розподілом тиску щодо його перерізу $P(z,0) = P_0$ характеризується змінюванням тиску за часом, яке можна описати рівнянням:

$$\theta_p = \sum_{\ell=1}^{\infty} A_{\ell} \cdot U_{\ell} \cdot \exp(-K_{\ell}^2 \cdot Fo_p), \quad (17)$$

де θ_p – відносний тиск у точках з координатами $z = 0 \dots \delta$ щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату; $\theta_p = \frac{P_z - P_{\text{дж}}}{P_0 - P_{\text{дж}}}$; $\bar{P}_0$ – середній тиск для ущільнюваного напівфабрикату за τ

$= 0$; $A_{\ell} = \frac{2 \sin \eta_{\ell}}{\eta_{\ell} + \sin \eta_{\ell} \cdot \cos \eta_{\ell}} = \text{const}$; η_{ℓ} – корінь трансцендентного рівняння: $\frac{\eta_{\ell}}{Bi_p} = \text{ctg } \eta_{\ell}$;

Bi_p – критерій масивності ущільнюваного напівфабрикату (Біо).

Теорія перенесення енергії та маси речовини під час ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском дозволяє використовувати поняття про «тонкі» та «масивні» тіла. При $Bi_p \Rightarrow 0$ ($Bi_p \leq 0,25$) перепад тиску щодо перерізу ущільнюваного напівфабрикату також прямує до нуля. Такі тіла у теорії перенесення енергії та маси речовини відносять до «тонких» тіл. Природно, що і перепад щільності ущільнюваного напівфабрикату щодо його перерізу буде мінімальним ($\Delta \rho = \rho_{\text{нов}} - \rho_{\text{вісь}} \Rightarrow 0$). До «тонких» тіл можна віднести ущільнюваний напівфабрикат при $\delta \Rightarrow 0$ коли $\alpha_e \Rightarrow 0$, або, коли $\lambda_e \Rightarrow \infty$. Першу умову реалізують за мінімізації товщини ущільнюваного напівфабрикату, другу – за малої швидкості підвищення тиску на його поверхні. Третю умову досягають у разі, якщо вогнетривка порошкова система, яку піддають пресуванню, ущільнюється до критичних значень щільності її твердих компонентів ρ_{np} із переведенням матеріалу на новий стан, для якого запропонована модель перенесення енергії та маси є непридатною.

Під час визначення залежності щільності вогнетривкої порошкової системи від тиску пресування $\rho = \psi(P)$ необхідним є проведення експериментальних досліджень на зразках при $Bi_p \Rightarrow 0$, тобто за малої швидкості підвищення тиску ($\alpha_e \Rightarrow 0$) та малої їх розрахункової товщини (δ).

При $Bi > 0,5$ тіла є «масивними». Для реальних умов продукування вогнетривкого напівфабрикату всі пресовані вироби відносять до «масивних» тіл.

Висновок. Виконано аналіз закономірностей процесів перенесення енергії та маси речовини щодо ущільнення вогнетривких порошкових систем тиском за різних варіантів початкових і граничних умов розвитку даного процесу.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Kharchenko I. G.* Phenomenological theory of energy and mass transfer for pressure shaping of disperse materials / I. G. Kharchenko // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – V. 18. – P. 953-959.
2. Производство огнеупоров полусухим способом / Под ред. А. К. Карклита. – М.: Металлургия, 1981. – 367 с.
3. Попильский Р. Я. Прессование порошковых керамических масс / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
4. Исследование процессов энерго- и массопереноса на переделе «пресс-печь» при производстве огнеупоров / [И. Г. Харченко, В. И. Иванов, Т. Н. Нестеренко, В. С. Баздырев] // Металлургия: труды ЗГИА. – Запорожье: ЗГИА, 2001. – Вып. 4. – С. 90-94.
5. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов / Под ред. А. В. Лыкова. – М.: Мир, 1967. – 544 с.
6. Некоторые вопросы динамики процесса прессования на гидравлическом прессе П 907 / И. Г. Харченко, В. И. Иванов, В. Р. Старун [и др.] // Огнеупоры. – 1983. – № 12. – С. 34-38.

7. *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с.

Стаття надійшла до редакції 17.06.2011 р.
Рецензент, проф. В.П. Грицай