

УДК 631.363.7

І. Гевко

Доцент, канд. техн. наук

В. Левенець

Інженер

Тернопільський державний
технічний університет
імені Івана Пулюя,
м. Тернопіль

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ГВИНТОВИМ ЗМІШУВАЧЕМ

Наведені конструкція гвинтового змішувача для отримання сумішей порошкових матеріалів і методика оптимізації конструктивних параметрів змішувача й параметрів технологічного процесу змішування, якою передбачено почерговий перебір розрахункових схем і функцій обмеження з подальшим переходом до розрахункової моделі, для якої обмеження, що не задовольняються, будуть лімітуючими. На основі аналізу всіх можливих варіантів функцій обмеження виведені аналітичні залежності для визначення конструктивних і технологічних параметрів змішувача для забезпечення заданої якості суміші при високій ефективності процесу змішування.

гвинтовий змішувач, функція мети, обмеження

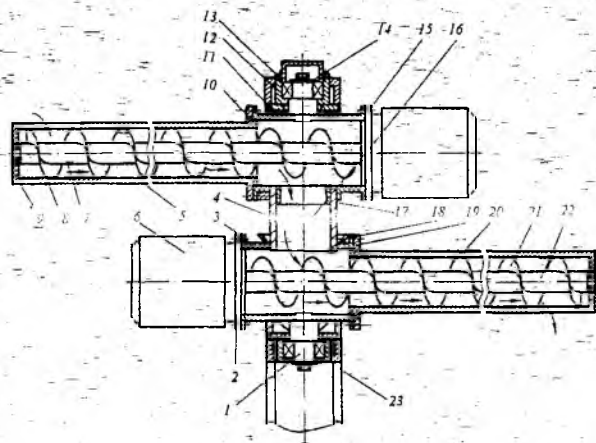
У сучасному машинобудуванні широкого застосування набуває отримання деталей машин методами порошкової металургії. При цьому можна отримати заготовки деталей із заданими фізико-механічними властивостями, форма і розміри яких практично відповідають готовим деталям. При цьому істотно зменшується обсяг механічного оброблення деталі, відходи в стружку, час і трудомісткість оброблення. За допомогою порошкової металургії отримують деталі, які важко отримати іншими методами, наприклад, твёрдосплавні пластини для різального інструменту.

При підготовці порошкових матеріалів для подальшого спікання або пресування постає проблема приготування однорідної механічної суміші з одного або декількох порошків різного хімічного чи гранулометричного складу, а також їхньої суміші з неметалічними порошками [4].

Основна задача змішування — перетворення сукупності частинок твердих компонентів при їхньому початковому довільному розподілі між собою в макроодно-

рідну суміш. Ефективність змішування та його інтенсивність значною мірою залежить від конструкції змішувача. Для забезпечення цього процесу використовують різні типи змішувачів, серед яких можна виділити кульові млини, барабанні, лопатеві, відцентрові, планетарні, конусні тощо. Усі змішувачі, що випускаються серійно, відрізняються значними габаритами, розраховані на великі об'єми суміші, що робить недоцільним їхнє застосування на невеликих підприємствах. Перелічені недоліки відсутні у гвинтового змішувача, конструкцію якого подано на рисунку.

Змішувач складається з вертикальної труби — колони 4, яка з'єднана за допомогою поворотного механізму 14 з рамою змішувача. До колони з можливістю повертання відносно вертикальної осі труби за допомогою фланців 10 прикріплено завантажувальну вітку змішувача, яка складається з кожуха 5, в якому розміщено центральний вал 7, що кріпиться до вала електродвигуна 15 та підшипника, встановленого в торцевому фланці 9. До центрального вала прикріплено гвинтову спіраль 8. У кожусі 5



Гвинтовий змішувач порошкових матеріалів

виготовлено отвір для подавання компонентів суміші порошкових матеріалів. До нижньої частини колони за допомогою механізму повертання 1 прикріплено розвантажувальну вітку змішувача, яка аналогічно до завантажувальної вітки складається з кожуха 20, центрального вала 22 та жорстко прикріпленої до нього гвинтової спіралі 21. У нижній частині кожуха виготовлено отвір для вивантаження готової суміші. Гвинтові спіралі через центральний вал приводяться в рух електродвигунами 15 та 6.

Робота гвинтового змішувача здійснюється наступним чином. Компоненти суміші порошкових матеріалів завантажуються із дозаторів через отвір у кожуху 5 в завантажувальну вітку, звідки гвинтовою спіраллю 8 переміщуються і подаються в зону пересипання 4, звідки з подальшим перемішуванням вони подаються до отвору в кожуху 18 у вивантажувальній вітці. При цьому за допомогою обертового руху віток можна проводити завантаження компонентів з дозаторів, розміщених на віддалі один від одного, і вивантаження порцій змішаної суміші в тару.

При виготовленні деталей методом порошкової металургії гостро стоїть питання забезпечення потрібної однорідності порошкових сумішей зі збереженням їхніх фізико-хімічних властивостей у максимально короткі терміни. Одним із шляхів розв'язання сформульованої задачі є підбір оптимальних параметрів як змішувального агрегату, так і процесу змішування в цілому.

Для забезпечення потрібної якості суміші при максимальній ефективності процесу змішування доцільно провести оптимізацію конструктивних параметрів гвинтового змішувача і технологічних параметрів процесу змішування.

Розроблення теоретичних основ оптимізації процесу змішування порошкових матеріалів є важливим завданням при проектуванні нових конструкцій змішувальних агрегатів і дає змогу отримати найвищу якість та ефективність технологічного процесу при мінімальних затратах.

За критерії якості при оптимізації параметрів змішувача виберемо комплексну величину, що має такі складові:

$$F_0 = \alpha_1 \rho (V_1 + V_2 + V_3) + \alpha_2 L + \alpha_3 P_T, \quad (1)$$

де V_1, V_2, V_3 — відповідно об'єми кожуха змішувача, гвинтової спіралі та центрального вала; ρ — густина матеріалу, з якого виготовлені кожух, гвинтова спіраль та центральний вал; L — довжина вітки змішувача; P_T — сила тиску порошкового матеріалу на поверхню стрічки; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коефіцієнти вагомості кожної зі складових.

Об'єм кожуха вітки змішувача визначається за формулою [1]

$$V_1 = 2\pi S_K (D_C + 2Z + S_K), \quad (2)$$

де S_K — товщина стінки кожуха; D — зовнішній діаметр спіралі; Z — величина зазору між гвинтовою спіраллю та кожухом.

Об'єм гвинтової спіралі визначаємо за залежністю

$$V_2 = \frac{H(D_C - d_c)}{2\beta T} \sqrt{(\pi D_0)^2 + T^2}, \quad (3)$$

де H — товщина спіралі; d_c — внутрішній діаметр спіралі; β — коефіцієнт усадки стрічки при формотворенні спіралі; T — крок гвинтової спіралі; D_0 — діаметр нейтрального перерізу розтягнутої спіралі.

Об'єм центрального вала

$$V_3 = 2\pi S_B (d - S_B), \quad (4)$$

де S_B — товщина стінки пустотілого вала; d — діаметр центрального вала.

Потрібна довжина змішувача визначається за формулою [3]

$$L = \frac{N}{0,34d^3 \rho_H \Phi K}, \quad (5)$$

де N — потужність електродвигуна приводу гвинтового змішувача; d — внутрішній діаметр спіралі; ρ_H — насипна густина матеріалу; Φ — коефіцієнт заповнення; K — коефіцієнт, що враховує характеристики гвинтової спіралі.

Сила тиску на полицку гвинтової спіралі

$$P_T = \frac{4M_{KP}}{k(D_C - d_c)tg(\alpha_p + \varphi_t)}, \quad (6)$$

де M_{KP} — крутний момент на валу змішувача; k — коефіцієнт тертя; α_p — кут підйому гвинтової лінії; φ_t — кут тиску.

Отже, функція мети матиме такий вигляд:

$$F_0 = \alpha_1 \left[2\pi S_K (D_C + 2Z + S_K) + 2\pi S_B (d - S_B) + \frac{H(D_C - d_c)}{2\beta T} \sqrt{(\pi D_0)^2 + T^2} \right] + \alpha_2 \frac{N}{0,34d^3 \rho_H \Phi \cdot K} + \alpha_3 \frac{4M_{KP}}{k \cdot (D_C - d_c)tg(\alpha_p + \varphi_t)}. \quad (7)$$

За незалежні змінні при оптимізації конструктивних і технологічних параметрів змішувача приймемо такі

параметри: $x_1 = D$ — зовнішній діаметр кожуха; $x_2 = T$ — крок гвинтової спіралі; $x_3 = \omega$ — кутова швидкість обертання гвинтової спіралі; $x_4 = H$ — товщина гвинтової спіралі; $x_5 = d$ — внутрішній діаметр гвинтової спіралі.

На визначення оптимальних параметрів змішувача та технологічного процесу змішування порошкових матеріалів накладаються такі технологічні, конструктивні та експлуатаційні обмеження:

1. Умова забезпечення потрібної продуктивності

$$f_1 = -D^3 + Dd^2 + \frac{8Q}{k_T \varphi_{\text{ПР}} \omega} \leq 0, \quad (8)$$

де Q — продуктивність змішувача; k_T — коефіцієнт кроку витка; $\varphi_{\text{ПР}}$ — коефіцієнт продуктивності, для тихохідних змішувачів $\varphi_{\text{ПР}} = 1$.

2. Умова забезпечення стійкості смуги при формотворенні:

$$f_2 = D - d - 2 \frac{H}{\delta} \leq 0, \quad (9)$$

де δ — допустима питома товщина заготовки гвинтової спіралі, отриманої прокатуванням $\delta = 0,02 \dots 0,03$, отриманої навиванням $\delta = 0,05 \dots 0,7$.

3. Умова відсутності згинання витка під навантаженням

$$f_3 = -H + H_{\text{min}} \leq 0, \quad (10)$$

де H_{min} — мінімальна допустима товщина заготовки гвинтової спіралі, встановлюється експериментально.

4. Умова забезпечення міцності пустотілого вала при крученні

$$f_4 = -d^2 S + 3dS^2 - 4S^3 + 2 \frac{S^4}{d} + \frac{2M_{\text{КР}}}{\pi[\tau_{\text{КР}}]} \leq 0, \quad (11)$$

де $[\tau_{\text{КР}}]$ — допустиме напруження кручення матеріалу вала.

5. Умова забезпечення міцності на згин витка від нерівномірності навантаження між витками

$$f_5 = \frac{\Delta M G}{B^2 H} - [\sigma] \leq 0, \quad (12)$$

де ΔM — максимальна зміна крутного моменту; G — лінійний модуль пружності гвинтової спіралі.

6. Умова обмеження кутової швидкості обертання гвинтової спіралі

$$f_6 = \omega - \frac{k_3 (4\pi^2 \rho_H + T^2) \sqrt{\frac{2g}{D}}}{T(T + 2\pi\mu_1 \rho_H)} \leq 0, \quad (13)$$

де k_3 — коефіцієнт заповнення міжвиткового простору змішувача (при $\varphi = 0,3$; $k_3 = 1$, при $0 \leq \varphi \leq 0,7$; $k_3 = 0,5 \dots 0,8$); g — пришвидшення вільного падіння; μ_1 — коефіцієнт тертя частинки по поверхні спіралі.

7. Умова забезпечення стійкості гвинтової спіралі в процесі роботи

$$f_7 = \frac{K_{\text{СТ}} B H^3 E}{\sqrt{\pi^2 D_C^2 + T^2}} - M_2 \leq 0, \quad (14)$$

де $K_{\text{СТ}}$ — експериментальний коефіцієнт; E — модуль Юнга; M_2 — крутний момент на гвинтовій спіралі.

8. Умова обмеження по довжині змішування:

$$f_8 = \frac{367N}{QK_0} - LT \leq 0, \quad (15)$$

де K_0 — коефіцієнт опору змішуванню, $K_0 = (100 \dots 150) \rho_H / 1,35$.

З урахуванням наведеного вище функцію мети запишемо в такому вигляді:

$$F_0 = \alpha_1 \rho \left[\frac{2\pi S_K (x_1 + 2Z + S_K) + 2\pi S_B (x_5 - S_B) + \frac{x_4 (x_1 - x_5)}{2\beta x_2} \sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2}}{2\beta x_2} \right] + \alpha_2 \frac{N}{0,34(x_1 - 2B)\rho_H \varphi K} + \alpha_3 \frac{4M_{\text{КР}}}{k(x_1 - x_5) \text{tg}(\alpha_P + \varphi)}. \quad (16)$$

Функції обмеження матимуть вигляд:

$$f_1 = -x_1^3 + x_1 x_5^2 + \frac{C_1}{x_3} \leq 0, \quad C_1 = \frac{8Q}{k_T \varphi_{\text{ПР}}};$$

$$f_2 = x_1 - x_5 - C_2 x_4 \leq 0, \quad C_2 = \frac{2}{\delta};$$

$$f_3 = -x_4 + H_{\text{min}} \leq 0;$$

$$f_4 = -x_5^2 S + 3x_5 S^2 - 4S^3 + 2 \frac{S^4}{x_5} + C_4 \leq 0, \quad C_4 = \frac{2M_{\text{КР}}}{\pi[\tau_{\text{КР}}]};$$

$$f_5 = \frac{C_5}{x_4} - [\sigma] \leq 0, \quad C_5 = \frac{\Delta M G}{\beta^2};$$

$$f_6 = x_3 - \frac{k(C_6^2 + x_2^2) \sqrt{\frac{2g}{x_1}}}{x_2(x_2 + C_6 \mu_1)}, \quad C_6 = 2\pi \rho_H;$$

$$f_7 = \frac{C_7 x_4^3}{\sqrt{\pi^2 x_1^2 + x_2^2}} - M \leq 0, \quad C_7 = K_{\text{СТ}} B E.$$

$$f_8 = C_8 - L x_2 \leq 0, \quad C_8 = \frac{367N}{QK_0}.$$

Використовуючи умову Куна-Такера [2], бачимо, що існують множники $u_i \geq 0$, $i = 1, \dots, 8$, при яких $u_i f_i = 0$ і $d\varphi(x, u)dx = 0$, де функція Лагранжа:

$$\varphi = f_0 + \sum_{i=1}^8 u_i f_i. \quad (17)$$

Визначаємо часткові похідні функції мети:

$$\frac{dF_0}{dx_1} = \alpha_1 \rho \left(2\pi S + \frac{x_4 \sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2}}{2\beta x_2} \right) + \alpha_3 \frac{4M_{KP}}{ktg(\alpha_P + \varphi)}$$

$$\frac{dF_0}{dx_2} = \alpha_1 \rho \left[\frac{x_4 (x_1 \dots x_5) \left(\frac{2x_7}{2\sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2}} + 2\beta \sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2} \right)}{4\beta^2 x_2^2} \right]$$

$$\frac{dF_0}{dx_3} = 0; \quad \frac{dF_0}{dx_4} = \alpha_1 \rho \frac{(x_1 - x_5) \sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2}}{2\beta x_2}$$

$$\frac{dF_0}{dx_5} = \alpha_1 \rho \left(2\pi S + \frac{x_4 \sqrt{(\pi D_0)^2 + x_2^2}}{2\beta x_2} \right) - \alpha_3 \frac{4M_{KP}}{kx_5^2 t g(\alpha_P + \varphi)} - \alpha_2 \frac{3N}{0,34\rho_H d^4 \varphi k} \quad (18)$$

Часткові похідні функцій обмеження будуть такими:

$$\frac{d\varphi}{dx_1} = \frac{df_0}{dx_1} + 3x_1^2 + x_5^2 + 1 - \frac{K(C_6^2 + x_2^2) \sqrt{\frac{2g}{x_1^3}}}{2x_2(x_2 + C_6\mu_1)} - \frac{C_7 x_4^3}{\sqrt{(\pi^2 x_1^2 + x_2^2)^3}} = 0;$$

$$\frac{d\varphi}{dx_2} = \frac{df_0}{dx_2} - \frac{2Kx_2 \sqrt{\frac{2g}{x_1}} \left(x_2(x_2 + C_6\mu_1) - (2x_2 + C_6\mu_1) K(C_6^2 + x_2^2) \sqrt{\frac{2g}{x_1}} \right)}{x_2^2 (x_2 + C_6\mu_1)^2}$$

$$- \frac{C_7 x_4^3}{2x_2 \sqrt{(\pi^2 x_1^2 + x_2^2)^3}} - L = 0;$$

$$\frac{d\varphi}{dx_3} = \frac{df_0}{dx_3} - \frac{C_1}{x_3^2} + 1 = 0;$$

$$\frac{d\varphi}{dx_4} = \frac{df_0}{dx_4} - C_2 - 1 - \frac{C_5}{x_4^2} + \frac{3C_7 x_4^2}{\sqrt{(\pi^2 x_1^2 + x_2^2)}} = 0;$$

$$\frac{d\varphi}{dx_5} = \frac{df_0}{dx_5} + 2x_1 x_5 - 1 - 2Sx_5 + 3S^2 - \frac{2S^4}{x_5^2} = 0. \quad (19)$$

Аналізуючи часткові похідні функції мети, бачимо, що в межах зміни параметрів x_1, \dots, x_5 виконується:

$$\frac{dF}{dD} = \frac{dF}{dx_1} > 0; \quad \frac{dF}{dT} = \frac{dF}{dx_2} > 0; \quad \frac{dF}{d\omega} = \frac{dF}{dx_3} = 0;$$

$$\frac{dF}{dH} = \frac{dF}{dx_4} > 0; \quad \frac{dF}{dd} = \frac{dF}{dx_5} < 0.$$

Можливі розв'язки, які задовольняють умови Куна-Такера, і відповідно, системи рівнянь зводимо до наступних розрахункових схем.

У першу чергу знаходимо параметри: $x_1 = D$; $x_2 = T$; $x_5 = d$. У цьому випадку визначальними будуть обмеження за міцністю вала, стійкістю стрічки при формотворенні та стійкості витка гвинтової спіралі на згин:

$$f_4 = 0; \quad -x_5^2 S + 3x_5 S^2 - 4S^3 + 2 \frac{S^4}{x_5} + C_4 = 0;$$

$$f_2 = 0; \quad x_1 - x_5 - C_2 x_4 = 0;$$

$$f_5 = 0; \quad \frac{C_5}{x_4} - [\sigma] = 0. \quad (20)$$

Розв'язавши ці рівняння, отримаємо:

$$x_1 = D = \frac{3S^2 + 2S^4}{S + 4S^3 - \frac{2M_{KP}}{\pi[\tau_{KP}]}} + \frac{2\Delta MG}{\delta B^2 [\sigma]}$$

$$x_4 = H = \frac{\Delta MG}{B^2 [\sigma]}; \quad x_5 = d = \frac{3S^2 + 2S^4}{S + 4S^3 - \frac{2M_{KP}}{\pi[\tau_{KP}]}} \quad (21)$$

При фіксованому мінімальному значенні H використовуємо обмеження за товщиною смуги

$$f_3 = 0, \quad x_4 = H = H_{min} \quad (22)$$

Значення величини кроку $x_2 = T$ і частоти обертання вала гвинтової спіралі $x_3 = \omega$ знаходимо з таких обмежень:

$$x_2 = T = \frac{367N}{QK_0 L}; \quad (23)$$

$$x_3 = \omega = \frac{\Psi}{\frac{367N}{QK_0 L} \left(\frac{367N}{QK_0 L} + 2\pi\rho_H \mu_1 \right)} \quad (24)$$

де

$$\Psi = k \left[6\pi^2 \rho_H^2 + \left(\frac{367N}{QK_0 L} \right)^2 \sqrt{\frac{2g}{\frac{3S^2 + 2S^4}{S + 4S^3 - \frac{2M_{KP}}{\pi[\sigma]} + \frac{2\Delta MG}{2B^2[\sigma]}}} \right)} \right]$$

Для визначення оптимальних параметрів змішувача потрібно почергово перебирати розрахункові схеми та перевіряти обмеження з подальшим переходом до такої розрахункової схеми, для якої обмеження, що не виконуються, будуть лімітуючими.

Отримані співвідношення дозволяють з високою точністю обчислити оптимальні конструктивні та технологічні параметри змішувача, при яких забезпечується потрібна якість суміші порошкових матеріалів при високій ефективності процесу змішування.

Література

1. Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. — Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те. 1989. — 176 с.
2. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. — Л.: Машиностроение, 1989. — 145 с.
3. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.

4. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под. ред. Б.С. Митина. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.

Отримана 14.02.03

I. Hevko, V. Levenets

Optimization of process of mixing of powder materials by the screw amalgamator

Ternopil State Ivan Puluj Technical University, Ternopil

The design of the screw amalgamator for reception of mixes of powder materials is submitted, the technique of optimization of constructional parameters of the amalgamator and technological parameters of process of mixing is given. On the basis of the analysis of all existing variants of settlement circuits analytical dependences for definition of optimum parameters of the amalgamator for maintenance of the given quality of a mix and high efficiency of process of mixing are deduced.

Інформація

FIFTH ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIBODY SYSTEMS, NONLINEAR DYNAMICS AND CONTROL

at the

ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences
Long Beach, California, September 24-28, 2005

**Main areas covered by the conference and the related symposia
are listed below**

Biomechanics

- Biomechanical Applications
- Flexible Mechanics for Modeling, Analysis and Visualization in Medical Applications

Computational Mechanics

- Algorithms and Integration Methods
- Finite Element Formulations
- Symposium on Flexible Multibody Dynamics
- Multiscale Modeling and Analysis
- Symposium on Applications of Automatic Differentiation for Nonlinear Multibody Dynamics, Control, and Optimization

Control and Design Methodologies

- Design and Optimization
- Differential-Geometric Methods in Multibody Dynamics, Non-Linear Dynamics and Control
- Dynamics and Optimization of Parallel Mechanisms and Robots
- Smart Sensor Technology, Control, Diagnosis, and Distributed Networking (SMART-SENS)

Nonlinear and Analytical Dynamics

- Second Symposium on Fractional Derivatives and Their Applications
- Symposium on Dynamics and Control of Time-Varying and Time-Delay Systems and Structures

- Aerospace Applications
- Contact Dynamics
- Symposium on Non-Smooth Dynamics, Micro-Scale Systems and Nonlinear Resonance
- Experiments with Nonlinear Dynamic Systems

Software, Education and Applications

- First Symposium on Multibody System Software, Education, and Applications
- Symposium on Robot Systems
- Mechanical Systems with Tracks, Belts, Chains, and Cables

Vehicle Dynamics

- Vehicle Systems and Tire Dynamics: Formulations and Applications
- First Symposium on Railroad Vehicle System Dynamics

Conference Chair:

Prof. Ahmed A. Shabana

Department of Mechanical Engineering University of
Illinois at Chicago
842 W. Taylor Street
Chicago, Illinois 60607-7022, U.S.A.
Phone: (312) 996-3600; Fax: (312) 413-0447;
E-mail: shabana@uic.edu