

Д. В. Савелов¹
С. А. Кулинич¹
Р. Г. Пузир¹

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗБУРЮВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ МЕТАЛЕВОГО ПОРОШКУ

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Використовувана наразі серійна технологія вібраційного ущільнення металевих порошків довела, що створене на її основі технологічне обладнання зовсім не враховує певні специфічні особливості та властивості дисперсної порошкової суміші, яка знаходиться під дією вібрувального пуансона. Це, у свою чергу, не дозволяє врахувати вплив металевих порошків на поведінку робочого органа, визначити раціональні параметри вібраційного обладнання і не надає можливості отримувати з металевих порошків якісні та надійні вироби. З аналізу поведінки сипких матеріалів та наявних реологічних моделей середовищ, які піддаються вібраційній дії, визначено, що для опису властивостей дисперсної суміші з металевих порошків, яка піддається вібраційній дії, запропонована узагальнена реологічна модель, яка одночасно враховує пружні властивості та внутрішнє тертя між металевими частинками, яке пов'язує дотичні напруження (в'язкість) та зміну швидкості порошкового середовища. Аналіз літературних джерел довів, що у наявних аналітичних дослідженнях ця реологічна модель не застосовувалась для опису поведінки металевих порошків, як суцільного середовища, а їх коливання під дією вібраційного навантаження, не описувались хвильовим рівнянням коливань. Отже, для запропонованої реологічної моделі ущільнювального порошкового середовища, яка враховує його пружні, в'язкі та пластичні властивості, отримано хвильове рівняння коливань та записані відповідні граничні умови. Для теоретичного аналізу хвильового рівняння коливань застосовано метод розв'язання у комплексних функціях. У результаті проведених теоретичних досліджень визначено фазову швидкість поширення збурення у порошковому середовищі, знайдено розв'язок хвильового рівняння коливань та виведено нові аналітичні вирази для визначення закономірностей руху металевих порошків, амплітудного напруження, яке виникає на поверхні та в основі ущільнюваного шару металевих порошків залежно від координати та поточного часу. За умови, яка описує ущільнюваність середовища, отримано новий аналітичний вираз для визначення амплітуди збурення поверхні металевих порошків, необхідної для досягнення його повного ущільнення. За величиною амплітуди збурення визначається амплітудне значення збурювальної сили вібраційних збудників коливань для оснащення ними привода вібраційного робочого органа.

Ключові слова: реологічна модель, металевий порошок, напруження, деформація, амплітуда коливань

Вступ

Технологія вібраційного ущільнення металевих порошків реалізується шляхом взаємодії вібрувального пуансона з порошковим середовищем, яке знаходиться у товстостінній прес-формі. Отже, ефективність ущільнення порошкової суміші суттєво залежить від технологічних режимів вібраційної дії — амплітуди та частоти коливань пуансона вібраційного робочого органа, а також тривалості вібраційної дії.

Для виробництва виробів з металевих порошків використовують певні вібраційні методи, у яких для робочих органів формувального обладнання застосовується амплітуда коливань робочого органа 0,4 мм і частоти коливань в діапазоні від 10000 до 20000 кол/хв [1]. Аналіз літературних джерел довів, що усі ці дані різняться щодо металевих порошків, їх можливих композицій з різними фізико-механічними характеристиками та структурним складом і не мають науково обґрунтованих рекомендацій, щодо вибору режимів вібраційної дії для ефективного вібраційного ущільнення. При цьому, копіювання відомих технологічних режимів вібраційної дії та операцій без належного обліку специфічних особливостей та властивостей порошкових матеріалів і композицій не дозволяє

проявитися належним чином позитивним якостям виробів з металевих порошків [1]. Усе це дозволяє підсумувати, що можливості теоретичного аналізу процесів вібраційного ущільнення металевих порошків і точність отримуваних результатів значною мірою залежать від взятої реологічної моделі ущільнюваного середовища, а дослідження таких процесів і сьогодні є актуальними.

Аналіз відомих досліджень і публікацій

На сьогодні теоретичні дослідження процесів взаємодії вібрувальних робочих органів з середовищем представлені досить широко. У цих дослідженнях ущільнюване вібрацією дисперсне середовище моделюється реологічними моделями, які є певним поєднанням пружного і пластичного елемента, а також елементом, який моделює тертя. Поведінка деформованих середовищ моделювалася пружною моделлю Гука [1], в'язкого (моделі Ньютона) [2] чи в'язкопружного (моделі Кельвіна–Фогта) тіла [3], моделлю Бінгама [4], моделлю Зінера [5], яка разом зі зворотною і незворотною деформацією описує оборотну високоеластичну деформацію, що найнаочніше проявляється у полімерів, та іншими. Процес релаксації напружень у деформованих середовищах в елементарному поданні описувався моделлю Максвелла з послідовним поєднанням пружного та в'язкого елементів, а також багатоелементними моделями Куна [6] та Шкловського де Жена [7]. У деяких випадках деформувальне середовище уявляли математичними кривими [8], [9].

На сьогодні встановлено, що найточніше ущільнюваний вібрацією металевий порошок можна уявити реологічною моделлю, яка одночасно враховує пружні властивості та внутрішнє тертя між металевими частинками, пов'язуючи дотичні напруження (в'язкість) та зміну швидкості порошкового середовища [1]

$$\sigma(x,t) = E \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \eta \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

де u і x — ейлерова та лагранжева координати; σ — напруження, яке виникає в ущільнюваному об'ємі металевих порошків; E — динамічний модуль пружної деформації металевих порошків; η — коефіцієнт динамічної в'язкості, який враховує внутрішнє тертя в металевому порошку.

На погляд авторів, саме ця модель є цікавою в контексті аналізу згасання амплітуди збудження, яке виникає внаслідок внутрішнього тертя (в'язкості) [15], для неї аналітично визначені та експериментально доведені чисельні значення та характер зміни динамічного модуля пружної деформації E та коефіцієнта динамічної в'язкості η залежно від відносної щільності металевих порошків [16].

У наявних дослідженнях ця реологічна модель не застосовувалась для опису поведінки порошкового середовища, а його коливання, під дією вібрації, не описувалися хвильовим рівнянням коливань.

Тому проведення теоретичних досліджень, спрямованих на науково-обґрунтоване визначення збурювального вібраційного навантаження, необхідного для ефективного ущільнення порошкового середовища, є досить актуальним завданням.

Мета роботи полягає у аналітичному визначенні амплітуди коливань робочого органу та відповідного їй збурювального вібраційного навантаження, необхідних для ефективного ущільнення металевих порошків вібраційним методом.

Отже, відповідно до заявленої мети, можна виділити такі *задачі досліджень*:

1. Для запропонованої реологічної моделі ущільнюваного середовища отримати хвильове рівняння коливань, яке буде враховувати реологічні характеристики металевих порошків, який піддається зовнішній вібраційній дії.
2. Аналітично дослідити процес вібраційного навантаження металевих порошків з метою визначення амплітуди ущільнення.
3. Порівняти аналітично визначені та експериментально отримані чисельні значення ефективних амплітуд коливань вібрувального робочого органу.

Матеріал і результати досліджень

У цій роботі для теоретичного визначення амплітуди коливань та відповідного вібраційного навантаження, необхідних для ущільнення металевих порошків, застосовано метод розв'язання у комплексних функціях [15], [17].

Для розв'язання поставленої задачі металевий порошок розглядається як суцільне порошкове середовище, на яке діє збудження $u(t)$ від пуансону 5 вібраційного робочого органу 2, яке з достатньою точністю описується виразом [15], [17]:

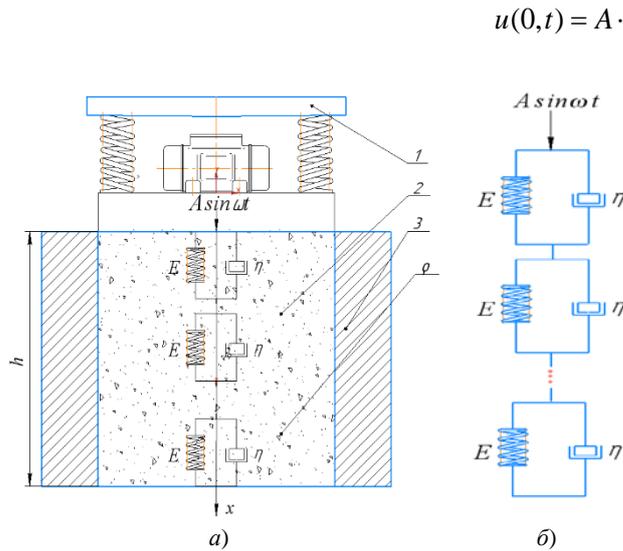


Рис. 1. Розрахункова схема деформування шару металевго порошку: *a* — та реологічна модель ущільнюваного порошку *б* — гармонічною силою $A \sin(\omega t)$; 1 — вібраційний робочий орган; 2 — металевий порошок; 3 — прес-форма

$$u(0, t) = A \cdot \sin(\omega t), \tag{2}$$

де A — амплітуда коливань; ω — кутова частота вимушених коливань; t — час.

Для виявлення закону поширення хвиль напружень порошкове середовище, яке знаходиться під поверхнею пуансона 5 вібраційного робочого органу 2, умовно розділимо на низку елементарних об'ємів (рис. 1а). Властивості ущільнюваного порошку змодельємо реологічною моделлю, показаною на рис. 1б.

Опишемо процес деформування порошкового шару (рис. 1).

Для цього будемо вважати, що щільність ρ металевго порошку в елементарному об'ємі є постійною, а її зміни відбуваються стрибкоподібно у разі переходу від одного елементарного об'єму до іншого. Рух ущільнюваного порошку розглядатимемо лише у напрямку елементарного об'єму та в часі [15].

Отже, для цього одновимірною випадку диференціальне рівняння руху порошкового середовища матиме вигляд [17]

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \tag{3}$$

або з урахуванням (1)

$$E \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \eta \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \tag{4}$$

Розв'язання хвильового рівняння (4) відшукуватимемо за таких граничних умов [17]:

– за $x = 0$ $u(0, t) = A \cdot \sin(\omega t)$; (5)

– за $x = h$ $u(h, t) = 0$, (6)

де h – висота ущільнюваного шару металевго порошку.

Розв'язання рівняння (4) представимо як уявну частину комплексного числа [15], [17]:

$$u(x, t) = \text{Im} \cdot [u(x) \cdot e^{i\omega t}]. \tag{7}$$

Відповідно до викладок [17], знак Im при співмножнику (7) надалі для зручності відкидаємо. Підставивши залежність (7) до виразу (4), отримаємо рівняння для визначення комплексної амплітуди коливань

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \frac{i\eta\omega}{E} \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial x} + \frac{\rho\omega^2}{E} u(x) = 0. \tag{8}$$

Розв'язання характеристичного рівняння, складеного для рівняння (8), дозволило визначити його корені

$$k_{1,2} = \frac{i\omega}{2E} \left(-\eta \pm \sqrt{4E\rho + \eta^2} \right). \tag{9}$$

Отже, з урахуванням рівняння (9), розв'язок рівняння набуде вигляду

$$u(x) = D_1 \cdot \cos(k_1 x) + D_2 \cdot \sin(k_2 x), \tag{10}$$

де D_1 і D_2 — постійні інтегрування (комплексні амплітуди), які визначаються граничними умовами (5) і (6); k_1 і k_2 — хвильові числа [17].

Відомо, що хвильове число k можна записати виразом [17]

$$k = \omega/c, \quad (11)$$

де c — фазова швидкість поширення вібраційного збурення у металевому порошку.

Для теоретичного визначення c прирівняємо праві частини виразів (10) і (11), зведемо ліву та праву частини у квадрат [17], та отримаємо вираз для визначення швидкостей c розповсюдження збурення у металевому порошку у вигляді

$$c_{1,2} = \frac{2E\omega}{\sqrt{\eta^2(\omega^2 + 1) + 4E\rho \mp 2\omega\eta\sqrt{4E\rho + \eta^2}}}. \quad (12)$$

На підставі розв'язання (10) перетворимо вираз (7)

$$u(x,t) = (D_1 \cdot \cos(k_1x) + D_2 \cdot \sin(k_2x)) \cdot e^{i\omega t}. \quad (13)$$

Підставляючи (13) у формулу (6), знайдемо співвідношення між постійними інтегруваннями D_1 і D_2

$$D_2 = -D_1 \cdot \frac{\cos(k_1h)}{\sin(k_2h)}. \quad (14)$$

З урахуванням (14) вираз (13) набуде вигляду

$$u(x,t) = D_1 \left[\frac{\cos(k_1x)\sin(k_2h) - \cos(k_1h)\sin(k_2x)}{\sin(k_2h)} \right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (15)$$

Шляхом підстановки виразу (15) до граничної умови (4), знайдемо постійну інтегрування D_1 у вигляді

$$D_1 = A. \quad (16)$$

Підставляючи знайдене значення постійної інтегрування D_1 з (16) у вираз (15), знайдемо розв'язок рівняння (3), яке задовольняє граничним умовам (5) і (6) у комплексній формі

$$u(x,t) = A \left[\frac{\cos(k_1x) \cdot \sin(k_2h) - \cos(k_1h) \cdot \sin(k_2x)}{\sin(k_2h)} \right] \cdot e^{i\omega t}. \quad (17)$$

Враховуючи, що $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \cdot \sin(\omega t)$ знайдемо розв'язок рівняння (4), який задовольняє граничним умовам (5) і (6):

$$u(x,t) = \frac{A}{\sin(k_2h)} \left[\cos(k_1x) \cdot \sin(k_2h) + \cos(k_1h) \cdot \sin(k_2x) \right] \cdot \sin(\omega t). \quad (18)$$

Підставляючи (18) у рівняння (1), визначимо напруження, яке виникає в ущільнюваному шарі, залежно від координати x :

$$\sigma(x,t) = \frac{A}{\sin(k_2h)} \left[E(-k_1 \sin(k_1x) \cdot \sin(k_2h) + k_2 \cos(k_2x) \cdot \cos(k_1h)) \cdot \sin(\omega t) + 2\eta\omega \cdot \cos(k_1h) \cdot \sin(k_2x) \cdot \cos(\omega t) \right]. \quad (19)$$

Підставляючи у вираз (19) значення координати $x=0$ і $x=h$, визначимо зміну напружень, які виникають на поверхні

$$\sigma(0,t) = \frac{A \cdot \sqrt{(Ek_2 \cos(k_1h))^2 + (\eta\omega \sin(k_2h))^2}}{\sin(k_2h)} \cdot \sin(\omega t - \phi_1), \quad (20)$$

$$\text{де} \quad \phi_1 = \arctg \left(\frac{\eta\omega \cdot \sin(k_2h)}{Ek_2 \cdot \cos(k_1h)} \right) \quad (21)$$

та в основі шару металевого порошку

$$\sigma(h,t) = \frac{A}{\sin(k_2 h)} E \left[(-k_1 \sin(k_1 h) \cdot \sin(k_2 h) + k_2 \cos(k_2 h) \cdot \cos(k_1 h)) \cdot \sin(\omega t) + 2\eta\omega \cdot \cos(k_1 h) \cdot \sin(k_2 h) \cdot \cos(\omega t) \right] \quad (22)$$

З виразу (19) випливає, що напруження, які виникають в ущільнюваному шарі металевому порошку, залежать від динамічного модуля пружної деформації E та коефіцієнта динамічної в'язкості η металевому порошку, його щільності ρ , товщини шару h , хвильових чисел k_1 і k_2 , амплітуди A і кутової частоти вимушених коливань ω .

Амплітудне напруження прямо пропорційне амплітуді збурення A . Отже, для того, щоб отримати потрібну щільність порошкового виробу по всій товщині ущільнюваного шару, необхідно визначити величину A з умови ущільнюваності [17]

$$\sigma(h,t) \geq \sigma_{0i}, \quad (24)$$

де σ_{0i} — мінімальне напруження, яке забезпечує граничне руйнування структури порошкової суміші та найефективніше ущільнення [17].

Отже,
$$A = \frac{\sigma_{0i} \cdot \sin(k_2 h)}{EZ_1 \cdot \sin(\omega t) + \eta\omega Z_2 \cdot \cos(\omega t)}, \quad (25)$$

де $Z_1 = -k_1 \sin(k_1 h) \cdot \sin(k_2 h) + k_2 \cos(k_2 h) \cdot \cos(k_1 h)$; $Z_2 = 2 \cos(k_1 h) \cdot \sin(k_2 h)$.

Теоретичні положення перевірялися на лабораторному вібраційному столі з такими основними параметрами: амплітуди коливань рухливої частини в режимі холостого ходу $A_{x,x}$ становили 0,4; 0,5; 0,8 і 1 мм; кутова частота вимушених коливань $\omega = 1674$ рад/с. Як матеріал для експериментальних досліджень використовувався тонкодисперсний порошок вольфраму марки ВЧ з насипною щільністю $\rho_0 = 4300$ кг/м³ з середнім розміром частинок 3,35 мкм [1]. Цей порошок отримано змішуванням 70 % дрібнозернистого і 30 % крупнозернистого порошку та поверхнево-активної речовини з гліцерину та спирту у співвідношенні 1:1, яку додавали до суміші металевому порошку.

В результаті досліджень визначено необхідні оптимальні амплітуди напружень на поверхні $\sigma(0)$ та в основі $\sigma(h)$ порошкового шару за значень амплітуди коливань рухливої рами в режимі холостого ходу $A_{x,x} = 0,8 \dots 1$ мм під час ущільнення порошкових шарів товщиною від 10 до 40 мм.

На рис. 2 і 3 показано зміну амплітуди напружень на поверхні $\sigma(0)$ і в основі $\sigma(h)$ шару, що ущільнюється, залежно від відносної щільності ϵ металевому порошку, якщо $A_{x,x} = 1$ мм.

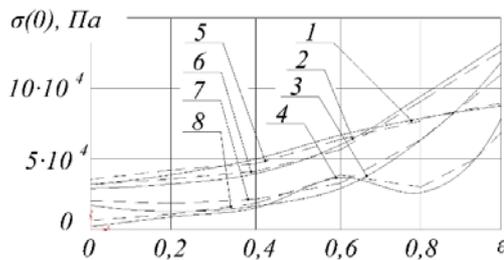


Рис. 2. Зміна напружень на поверхні $\sigma(0)$ шару металевому порошку залежно від відносної щільності ϵ і висоти h шару, що ущільнюється: 1 — за $h = 10$ мм; 2 — за $h = 20$ мм; 3 — за $h = 30$ мм; 4 — за $h = 40$ мм; 1—4 — теоретичні криві; 5—8 — експериментальні криві

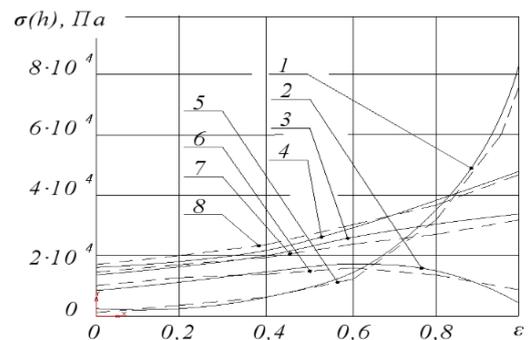


Рис. 3. Зміна напружень в основі $\sigma(h)$ шару металевому порошку залежно від відносної щільності ϵ і висоти h шару, що ущільнюється: 1 — за $h = 10$ мм; 2 — за $h = 20$ мм; 3 — за $h = 30$ мм; 4 — за $h = 40$ мм; 1—4 — теоретичні криві; 5—8 — експериментальні криві

Встановлено, що напруження залежать від типу металевому порошку та висоти ущільнюваного шару h . За менших висот порошкового шару потрібні підвищені напруження. Це пояснюється тим, що у разі малих висот ущільнюваність металевому порошку гірше ніж для більших висот порошкового шару, оскільки переміщення та переорієнтація металевих частинок є більш ускладненою.

Графічні результати (рис. 2 і 3) показують, що для вибраного вібраційного режиму з ущільненням шарів висотою h , що дорівнює 10, 30 і 40 мм зі збільшенням відносної щільності ϵ , амплітуда

напружень збільшується як на поверхні $\sigma(0)$, так і в основі $\sigma(h)$ шару металевго порошку.

Коли висота шару $h = 20$ мм, на кінцевій стадії процесу ущільнення відбувається зменшення амплітуди напружень з 16000 Па до 3500 Па в основі шару, що ущільнюється (рис. 3). Отже, тривалість процесу вібраційного ущільнення буде збільшуватися.

Висновки

1. Для запропонованої реологічної моделі металевго порошку отримано хвильове рівняння коливань, в результаті розв'язання якого виведено нові аналітичні вирази для визначення амплітудного напруження, яке виникає на поверхні та в основі ущільнюваного шару металевго порошку залежно від координати.

2. Для порошку вольфраму марки ВЧ встановленої консистенції аналітично визначені та експериментально доведені чисельні значення ефективних амплітуд коливань пуансону вібраційного робочого органу, які становлять $0,8 \dots 1$ мм з кутовою частотою вимушених коливань $\omega = 1674$ рад/с.

3. На підставі знайденої величини амплітуди коливань пуансону вібраційного робочого органу, необхідної для його повного ущільнення, для розробки вібраційного збудника робочого органу ущільнювальної установки отримано амплітудне значення збудувальної сили збудників вібрації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ya. V. Ivanchuk, and R. D. Iskovych-Lotozkyi, *Methods and Means of Mathematical Modeling of Hydraulic Vibrational and Vibro-impact Machines*. Vinnytsia: VNTU, 2023, 466 p.
- [2] R. D. Iskovych-Lotozkyi, O. V. Zelinska, and Ya. V. Ivanchuk, *Technology of Modeling and Evaluation of Shaping Parameters of Powder Material Blanks on Vibro-pressing Equipment with Hydro-impulse Drive*. Vinnytsia: VNTU, 2018, 152 p., ISBN 978-966-641-723-0.
- [3] R. D. Iskovych-Lotozkyi, R. R. Obertiukh, and O. V. Polishchuk, *Use of Hydro-impulse Drive in Processing Equipment*. Vinnytsia: VNTU, 2013, 110 p., ISBN 978-966-641-523-6.
- [4] S. F. Kyryliuk, "Powder Metallurgy," Kyiv, I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, no. 09/10, pp. 3-16, 2024.
- [5] H. A. Bahliuk, M. V. Marych, M. P. Brodnikovskiy, T. L. Kuznietsova, O. A. Rokytska, and S. A. Kulakov, "Powder Metallurgy," Kyiv, I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, no. 07/08, pp. 28-40, 2024.
- [6] H. A. Bahliuk, and S. F. Kyryliuk, "Powder Metallurgy," Kyiv, I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, no. 07/08, pp. 3-15, 2024.
- [7] X. Chen, S. Wu, and J. Zhou, "Experimental study and analytical formulation of mechanical behavior of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 662-670, 2013.
- [8] G. H. Tattersall, "Effect of vibration on the rheological properties of fresh cement pastes and concretes," in *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of the International Conference*, P. F. G. Banfill, Ed. London, U.K.: Chapman and Hall, Mar. 16-29, 1990, pp. 323-338.
- [9] S. Kakuta, and T. Kojima, "Rheology of fresh concrete under vibration," in *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of the International Conference*, P. F. G. Banfill, Ed. London, U.K.: Chapman and Hall, Mar. 16-29, 1990, pp. 339-342.
- [10] P. F. G. Banfill, et al., "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941, 2011.
- [11] C. Hu, and F. Larrard, "The rheology of fresh high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 2, pp. 283-294, 1996.
- [12] J. Szwabowski, "Influence of three-phase structure on the yield stress of fresh concrete," in *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of the International Conference*, P. F. G. Banfill, Ed. London, U.K.: Chapman and Hall, Mar. 16-29, 1990, pp. 241-248.
- [13] J. Kłosiński, and A. Trąbka, "Frequency analysis of vibratory device model," *Pneumatyka*, vol. 1, pp. 46-49.
- [14] B. Żółtowski, *Research of Machine Dynamics*. Bydgoszcz, Poland: Wyd. MARKAR, 2002.
- [15] Д. В. Савелов, О. Б. Кобильська, і М. Соколов, «Аналітичне визначення амплітуди коливань, необхідної для ущільнення металевго порошку при його моделюванні реологічною моделлю», *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, вип. 2, с. 86-91, 2024. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.2.12>.
- [16] Д. В. Савелов, і С. А. Кулинич, «Обґрунтування реологічної моделі металевго порошку, який ущільнюється вібраційним навантаженням», *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, № 3 (152), с. 175-181, 2025. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.3.20>.
- [17] О. Г. Маслов, і Д. В. Савелов, «Визначення збуджуючого навантаження, необхідного для ущільнення полімерного бетону», *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*, № 2 (115), с. 141-145, 2019. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.2.140-145>.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних наук ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025

Савелов Дмитро Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування, e-mail: dvsavelov@gmail.com ;

Кулинич Сергій Анатолійович — аспірант кафедри машинобудування, e-mail: xlstrn@gmail.com ;

Пузир Руслан Григорович — д-р. техн. наук, професор, професор кафедри машинобудування, e-mail: puzyruslan@gmail.com .

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук

D. V. Savielov¹
S. A. Kulynych¹
R. H. Puzyr¹

Analytical Determination of Disturbing Load for Vibratory Compaction of Metal Powder

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

The serial technology of vibratory compaction of metal powders, which is currently in use, has proven that the technological equipment created on its basis does not take into account certain specific features and properties of the dispersed powder mixture, which is under the action of a vibrating punch. This, in turn, does not allow taking into consideration the impact of metal powder on the behavior of the working body, to determine the rational parameters of the vibration equipment and does not provide an opportunity to obtain high-quality and reliable products from metal powder. Based on the analysis of the behavior of bulk materials and existing rheological models of media subjected to vibration, it was determined that to describe the properties of a dispersed mixture of metal powder, which is subjected to vibration, a generalized rheological model is proposed, which simultaneously takes into account elastic properties and internal friction between metal particles, which connects tangential stresses (viscosity) and changes in the velocity of the powder medium. The analysis of literary sources proved that in existing analytical studies this rheological model was not used to describe the behavior of metal powders as a continuous medium, and their oscillations under the action of vibration loading were not described by the wave equation of oscillations. Therefore, for the proposed rheological model of the compacting powder medium, which takes into account its elastic, viscous and plastic properties, the wave equation of oscillations was compiled and the corresponding boundary conditions were recorded. For the theoretical analysis of the wave equation of oscillations, the method of solution in complex functions was applied. As a result of the theoretical studies, the phase velocity of the propagation of the disturbance in the powder medium was determined, the solution of the wave equation of oscillations was found and new analytical expressions were derived to determine the regularities of the motion of the metal powder, the amplitude stress that arises on the surface and in the base of the compacted layer of metal powder depending on the coordinate and the current time. Based on the condition describing the compactability of the medium, a new analytical expression has been obtained to determine the amplitude of the disturbance of the surface of the metal powder, which is necessary to achieve its complete compaction. The determined value of the disturbance amplitude determines the amplitude value of the disturbing force of the vibration excitors for equipping the drive of the vibrating working body with them.

Keywords: rheological model, metal powder, stress, deformation, amplitude of oscillations.

Savielov Dmytro V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: dvsavelov@gmail.com ;

Kulynych Serhii A. — Post-Graduate Student of the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: xlstrn@gmail.com;

Puzyr Ruslan H. — Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor at the Chair of Mechanical Engineering, e-mail: puzyruslan@gmail.com