

Радченко О. К.
Гогаєв К. О.
Аскеров М. Г.
Воропаєв В. С.

КУТОВІ ПАРАМЕТРИ ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС ПРОКАТУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ (ОГЛЯД)

Зважаючи на складність процесу прокатування порошків, а також те, що існує потреба прогнозування режимів прокатування нових порошків та складних порошкових систем, встановлення кутових параметрів осередку деформації є актуальною задачею. Особливо важливим є знання кутових параметрів при оптимізації режимів прокатування у випадках коли ця операція є останньою при одержанні готового продукту. В огляді розглянуто кутові параметри, що характеризують симетричний осередок деформації при прокатуванні металевих порошків у валках з гладкою поверхнею. Показано, що прокатування металевих порошків є складним процесом, для опису якого в різний час були запропоновані різні кутові параметри. Розглянуто 11 кутів, їх назви, опис, методи визначення та розрахунку. Більшість з них мали кілька назв з яких обрані найбільш вдалі. Для трьох з них запропоновані нові назви, що повніше характеризують їх фізичну сутність. Проаналізовано величини кутів для різних порошків та різних методик їх вимірювання. Встановлені параметри від яких залежать кути, що розглядаються. Найбільш повно досліджено кут захвату порошку. Для кута захвату, за наявними літературними даними, параметри від яких він залежить ранжовані за їхньою значимістю. У порядку зменшення ступеня впливу досліджених параметрів кут захвату залежить від коефіцієнта тертя валок-порошок, коефіцієнта бічного тиску; відносної насипної щільності порошку; ширини бункера та зовнішнього зусилля, що прикладають до порошку. Залишився недослідженим вплив на кут захвату фізико-механічних властивостей матеріалу частинок. До існуючих кутів доданий кут випередження, який у парі з кутом відставання охоплює увесь осередок деформації. Показано, що співвідношення кутів відставання та випередження може бути використане для характеристики таких ознак осередку деформації як симетричність та наявність переднього натягу, а також може характеризувати пластичні властивості матеріалу частинок.

Ключові слова: прокатка металевих порошків, осередок деформації, симетричність, кутові параметри, ранжування за значимістю.

Основні закономірності прокатки порошків були досліджені у другій половині минулого століття, але завдяки своїй складності вона продовжує привертати увагу багатьох дослідників. Прокатування Ті [1], Al [2], керамічних [3, 4] та інших порошків, а також їх сумішей [5, 6, 7] є високопродуктивним методом одержання напівфабрикатів [1–4] або готових виробів [5–7]. Також прокатування використовують для обробки порошків, з метою надання їм певних властивостей [8]. Для вибору оптимальних режимів, а також прогнозування режимів прокатування [9, 10] потрібні параметри осередку деформації, зокрема кутові параметри. Враховуючи те, що процес прокатування порошків є доволі складним, та те, що існує потреба у прогнозуванні режимів прокатування нових порошків, які з'являються на ринку, та складних порошкових систем, встановлення кутових параметрів осередку деформації є задачею актуальною.

Величини кутів прокатки визначають параметри осередку деформації. Питання про кути прокатки багато в чому розділяло різні школи та окремих дослідників процесу прокатки металевих порошків. Існують різні підходи до їх назви, опису та вимірювання. Г.І. Аксьонов та О.М. Ніколаєв [11, 12], за аналогією з прокаткою компактних матеріалів, виділяли кут захоплення. Г.А. Виноградов та В.П. Каташинський [13, 14] відзначали, що для аналізу процесу прокатування знання одного кута захоплення недостатньо і запропонували такі центральні кути: граничний кут подачі (початковий кут [13]), кут прокатки, кут спресовування, нейтральний кут і кут пружного стиснення валків. Пізніше Г.І. Аксьоновим та В.П. Ревякіним [15] був запропонований кут, що характеризує прикладання рівнодіючої сили в осередку деформації при прокатуванні. Детальний аналіз осередку деформації дозволив Т. Тойберту [16] ввести ще кут зустрічі захоплених валками шарів порошку. У зарубіжній літературі, за аналогією з прокаткою компактних матеріалів, замість кутів подачі та прокатки, розглядають лише кут захоплення (gripping або nip angle), що відповідає перерізу, в якому починає формуватися жорстке тіло (тобто відповідає куту спресовування) [13, 14] та нейтральний кут (neutral angle) [17–22].

З розвитком методик вимірювання кутів уточнювали і їх величину. Існували також різні погляди на те, до якої точки вимірювати деякі з вищеописаних кутів. До того як була запропонована методика визначення кута пружного стиснення валків, кут прокатки і нейтральний кут вимірювали до точки виходу прокату з валків, тобто без урахування кута пружної післядії [23]. Останній у деяких випадках перевищував сам нейтральний кут. Це відбивалося і в визначеннях які давали кутам.

Метою роботи є огляд джерел у яких були запропоновані, названі, описані, розраховані або виміряні кути прокатки, уточнення назв цих кутів, встановлення параметрів від яких вони залежать, ранжування їх за значимістю та аналіз величин для різних порошкових матеріалів та умов прокатування, а також встановлення взаємозалежностей між ними.

Автори запропонованої статті намагалися, наскільки це було можливим, зберегти назви кутів дані вченими, що їх запропонували, а у разі існування кількох назв вибрати найкращу, і тільки у разі повної невідповідності назви кута його суті змушені були запропонувати нову назву, обґрунтувавши існуючу невідповідність.

Розглянемо існуючі а також нові назви та словесні визначення кутів прокатки сформульовані авторами, що їх запропонували:

1. *Кутом захоплення α_z* (саме ця назва, спочатку запропонована Г.І. Аксьоновим [1], відповідає суті цього кута [24]) називається максимальний кут подачі порошку, при якому змінюється товщина і щільність прокату і на дузі якого щільність зростає від насипної щільності порошку до щільності стрічки [25] (рис.1). Деякі автори помилково ототожнювали його з граничним кутом подачі порошку [13] чи початковим кутом [26].

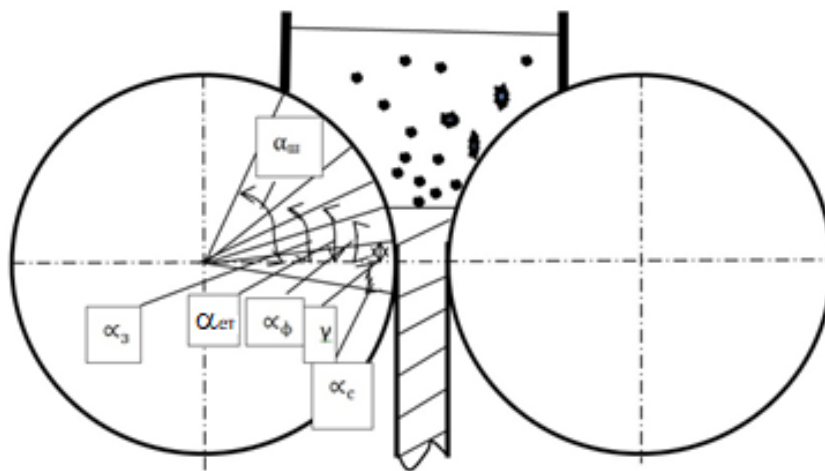


Рис. 1. Кути прокатки при прокатуванні порошків

2. *Приведений кут захоплення $\alpha_{пр}$* вперше було запропоновано О.М. Ніколаєвим [27]. Цей кут є віртуальним параметром осередку деформації, а його величина є умовною. Його розраховують за основним рівнянням прокатки без урахування ефектів відставання (відтиснення), випередження та розширення, тобто прийнявши що відповідні коефіцієнти дорівнюють 1. У роботі [28] цей кут також був названий *розрахунковим кутом прокатки*, а в роботі [29] – просто *кутом прокатки*. Р. І. Йоффе [30] називав його *кутом подачі* і позначав α_n .

3. *Кут подачі порошку $\alpha_{ш}$* це центральний кут, що визначає переріз, який відсікає дозуючий пристрій на дузі контакту валок-порошок [14] (рис.1). Одне із значень кута подачі відповідає куту захоплення. Ще цей кут називали *початковим кутом* [26] та *кутом контакту порошку* [31].

4. *Кутом прокатки α_p* називають центральний кут, довжина дуги якого служить основою епюри тиску на валок матеріалу, що прокатують, без урахування пружного стиснення валків [26, с. 29], а щільність змінюється від щільності утруски до щільності неспеченої стрічки [13]. До цього визначення пізніше [14] було додано «з урахуванням пружного стиснення валків».

Спочатку Г.В. Виноградов та В.П. Каташинський [32] назвали цей кут *кутом контакту* та позначили його α_k , а Г.І. Аксьонов та В.П. Ревякін [15] – *кутом початку ущільнення*. Існуюча назва «кут прокатки» невдала, тому що кутами прокатки називаються всі центральні кути, які характеризують осередок деформації. Найкраща назва – це *кут початку епюри тиску* $\alpha_{ет}$ (для цієї та наступних змінених назв кутів, а також їх позначень, далі застосовуються лише запропоновані в цій статті назви та позначення, виділені жирним курсивом при першій згадці).

5. *Кутом спресовування* α_n називають центральний кут, що відповідає перерізу, який відділяє сипкий порошковий матеріал від сформованого у зоні деформації тіла [13, 14, 33], тобто кут, на дузі якого з порошку починає формуватися жорстке тіло. І. Є. Кулешов [34, с.75] називав цей кут то *кутом прокатки* (с. 74), то *кутом спресовування*. Говорячи про аналітичний вираз цього кута він посилався на роботи присвячені *куту захоплення*. Цей кут точніше називати *кутом початку формування при прокатуванні порошків* або просто *кутом початку формування* α_f (рис.1).

6. *Нейтральний кут* γ . При прокатуванні сипких матеріалів, як і при прокатуванні литих металів, епюра питомих сил тертя (дотичних контактних напружень) змінює знак у перерізі, що називають нейтральним. Цьому перерізу відповідає *нейтральний кут* [13, 14, 26] (рис. 1). Це кут, у якому швидкості валка і смуги рівні (як і у випадку з компактними матеріалами). Нормальне контактне напруження (НКН), що відповідає цьому куту, проходить через максимум, а сила тертя змінює знак і врівноважується. Цей кут, за аналогією з прокаткою компактних матеріалів, також називали *критичним кутом* [32].

7. *Кут пружного стиснення валків* α_c характеризує збільшення довжини зони деформації внаслідок пружного стиснення валків під час прокатування [13, 14, 26]. М.В. Мальцев запропонував називати цей кут просто *кутом пружного стиснення* α_c [24]. Остання назва краща, оскільки величина цього кута визначається спільною пружною взаємодією валків та стрічки.

8. *Кут прикладання рівнодіючої* β , введений Г. І. Аксеновим та В. П. Ревякіним [15], відміряють від перерізу, що проходить через осі валків до точки перетину рівнодіючої нормального тиску з поверхнею валка (рис. 2).

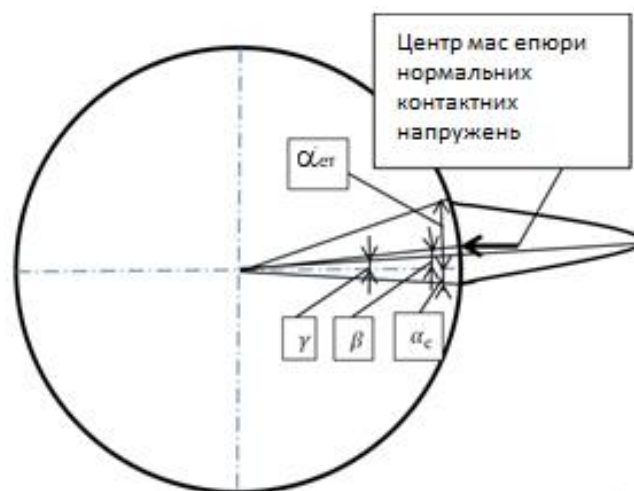


Рис. 2. Кут прикладення рівнодіючої β

9. *Кут зустрічі захоплених валками шарів порошку* [16]. Т. Тойберт, який запропонував цей кут, зазначав, що він визначає переріз початку ущільнення порошку.

10. *Кут при якому встановлюється процес* прокатки порошку ϕ був запропонований Г. А. Виноградовим [35] та пізніше названий В. П. Каташинським *кутом стабілізації процесу* $\phi_{ст}$. [26]. Це кут початкового повороту валків, після якого процес прокатки порошків переходить із нестационарного у стаціонарний [26, 33].

11. Кут відставання запропонував Р. І. Йоффе [30], не давши визначення цього кута, проте з тексту статті стає ясно, що це центральний кут, який обмежує зону відставання, починаючи від перерізу захоплення порошку до перерізу врівноважування (нейтрального перерізу).

Методи визначення та розрахунку кута захоплення. Величина кута захоплення порошку валками (α_3) визначає процес прокатки порошків: від неї залежать товщина та щільність стрічки, допустимі швидкості та інші параметри прокатки. Г. І. Аксьонов та О.М. Ніколаєв зазначали, що, не знаючи величини α_3 свідомо керувати процесом прокатки неможливо [25, 36]. О. М. Ніколаєв зазначав, що α_3 залежить від насипної щільності порошку, що більше щільність, то більше α_3 [12]. Від яких ще параметрів залежить α_3 можна встановити, розглянувши аналітичні залежності для його розрахунку.

Вже у першій роботі з прокатки порошків Г. І. Аксьонов [11] зазначав, «спочатку було прийнято, що, за аналогією з прокаткою компактних матеріалів, α_3 пов'язаний з коефіцієнтом тертя валок-порошок (μ) залежністю:

$$\alpha \leq \mu, \quad (1)$$

тобто максимальна величина α_3 (правильніше говорити $\text{tg } \alpha_3$) дорівнювала μ . Пізніше Г. І. Аксьонов зазначав «Наступне вивчення процесу показало, що прирівнювання α_3 до коефіцієнта тертя валок-порошок при прокатуванні порошків є дуже грубим і необхідно врахувати ще коефіцієнт бічного тиску ξ , тобто:

$$\alpha_3 \leq \mu + \xi. \quad (2)$$

Як слушно зазначив М.В. Мальцев [14], недоліком цієї формули є те, що відповідно до неї прокатку можна проводити при нульовому коефіцієнті тертя, а це суперечить практиці.

У подальшій роботі Г.І. Аксьонова та О.М. Ніколаєва [25] формула (2) була уточнена і записана як

$$\alpha_3 = \mu + \frac{\nu}{1-\nu} \rho_{\text{с.відн.}}, \quad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; $\rho_{\text{с.відн.}}$ – відносна щільність стрічки (ВЩС).

Тут треба зазначити, що ν також залежить від ВЩС. Приймаючи ν незмінним і рівним 0,36 за формулою (3) були розраховані величини α_3 для залізних порошків. Причому меншій відносній насипній щільності (ВНЩ) порошку, що дорівнювала 0,084, відповідав кут $19^\circ 30'$, а більшій (0,364) – $25^\circ 30'$. Так само були розраховані α_3 для мідного електролітичного порошку (0,201) і порошку сталі марки 40Х (0,145) які дорівнювали 20° і $21^\circ 30'$ відповідно.

Складаючи рівняння рівноваги у точці захоплення порошку, Г.І.Аксьонов отримав таку залежність для процесу прокатування [37]:

$$\text{tg } \alpha_3 \leq \frac{\mu P + Q}{P - \mu Q}, \quad (4)$$

де P – сила, що ущільнює порошок і діє у горизонтальному напрямку, Q – вага стовпа порошку.

Для прокатки порошків формула (4) не знайшла застосування, оскільки щільність прокату визначається максимальним нормальним контактним напруженням (МНКН), а не середнім тиском (або зусиллям прокатки P). Однак, якщо прийняти, що вага стовпа порошку зневажливо мала ($Q \approx 0$) у порівнянні з зусиллям прокатування, або прокатування проводиться у горизонтальному напрямку, коли стовп порошку спирається на стінку дозуючого пристрою, нерівність (4) перетворюється на нерівність (1).

Спроектуювавши сили, що діють на виділений об'єм порошку на напрямок прокатки і здійснивши деякі перетворення, М. В. Мальцев також отримав вираз для розрахунку α_3 [24]:

$$\alpha_3 = \frac{\mu}{1 - \frac{\xi \cos(\alpha_3 - \varphi)}{\cos \alpha_3 \cdot \cos \varphi}}, \quad (5)$$

де φ – кут тертя валок-порошок.

Застосовувати цю формулу для розрахунку α_3 незручно, тому що визначити величину α_3 можна або методом підбору, або використовуючи діаграму, наведену в роботі [38].

Кут захвату також входить в основне рівняння прокатки порошків [27]:

$$Z\eta = 1 + \frac{D}{h_c} \cdot \frac{\alpha_3^2}{2}, \quad (6)$$

де Z – ступінь (коефіцієнт) ущільнення порошку при прокатці, $Z = \frac{\rho_c}{\rho_n}$ (ρ_c та ρ_n – щільності стрічки та порошку відповідно), η – коефіцієнт витяжки $\eta = \frac{v_c}{v_n}$ (v_c та v_n – швидкості стрічки на виході з валків та порошку на вході у валки), D – діаметр валків, h_c – товщина стрічки.

Це рівняння пов'язує параметри процесу прокатки (Z і η) з геометричними параметрами осередку деформації (D , α_3 та h_c), однак розрахувати α_3 за формулою (6) неможливо, оскільки невідома величина η . Крім того в цьому рівнянні замість h_c правильніше писати δ (зазор між валками при виході стрічки), так як $h_c = \delta + \Delta h$, де Δh – величина пружного розширення стрічки після виходу з прокатного стану.

В. С. Смирнов та ін. [39], розглядаючи процес прокатки як впресовування порошку з однієї зони в іншу, і вважаючи, що щільність змінюється від насипної щільності до щільності стрічки, запропонували аналітичний метод визначення α_3 і отримали наступну залежність:

$$\alpha_3 = \frac{B - \sin \alpha_3}{A} \quad (7)$$

де A та B – безрозмірні коефіцієнти, які розраховують за формулами:

$$A = \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_n - \rho_c}{\rho_n} - \frac{D}{h_c} \right) \frac{h_c}{D}; \quad (8)$$

$$B = \frac{h_c}{D} \ln \frac{\rho_c}{\rho_n}. \quad (9)$$

Розрахунок α_3 за формулами (7), (8) та (9) для порошків залізного марки ПЖ-2М (ВНЩ = 0,229) і нікелевого карбонільного (ВНЩ = 0,201) при різних товщинах і щільності стрічок дав величину від 18 до 20,5 і від 17 до 18 градусів відповідно. Відповідно до твердження авторів, величина розрахованих значень відрізнялася від експериментально визначених за епюрами тисків (тобто α_{em}) не більше ніж на 13 %. Тобто автори вважали, що α_3 і α_{em} це те саме.

Проводилися й інші спроби теоретичного виведення α_3 [31, 40], проте розрахувати α_3 за отриманими формулами було неможливо.

Для експериментального визначення α_3 було запропоновано 3 основні методики [13]:

О.М. Ніколаєвим [12] запропоновано визначення α_3 за моментом початку падіння тиску прокатки при зменшенні товщини шару порошку, що подавали (H) при процесі прокатки, що встановився. Розрахунок проводився за формулою:

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{H - h_c}{R}} \quad (10)$$

де R – радіус валків.

Визначення α_3 відбувалося наступним чином, при процесі прокатки, що встановився (тиск прокатування незмінний), порошок у бункер не додавали і при зменшенні шару порошку до початку падіння тиску стан зупиняли і заміряли H у найвужчому місці (тобто H мало мінімальне, а не середнє значення). Кожен порошок прокатували 3 рази і брали середнє α_3 . Для залізних порошоків α_3 становило від 20 до 30 градусів, тобто $\text{tg } \alpha_3$ становив від 0,36 до 0,58, що було більше коефіцієнта тертя (від 0,24 до 0,31), визначеного в роботі [36]. Г.А. Виноградов [35] вважав, що в такий спосіб О.М. Ніколаєв визначав кут стабілізації процесу φ_{cm} , але, як буде показано нижче, φ_{cm} має значно більшу величину. Враховуючи інерційність та різну чутливість месдоз, точно визначити H досить складно. Формула очевидно наближена і дає величину кута в радіанах, хоча автор у статті цього не обговорює і наводить розраховані кути в градусах. При зменшенні рівня порошку в бункері зменшується величина Q , що входить до формули (4), тоді α_3 також повинно зменшуватися. Враховуючи останнє, а також те, що для розрахунку використовували мінімальне значення H , отримана таким чином величина α_3 буде занижена.

В. Г. Хромов [41] визначав α_3 при зменшенні товщини шару порошку, що подавався (H) за рахунок використання пересувних шибєрів, запропонованих Ю. М. Семеновим [42]. За отриманими результатами для титанового порошку марки ИМП-1А він будував графік залежності товщини стрічки від положення шибєра (в кутових координатах). Кут, що відповідав положенню шибєра, у якому товщина переставала змінюватися і приймався рівним α_3 . У роботі не вказували чи проводили багаторазову прокатку при різних положеннях шибєрів, чи шибєр переміщали під час прокатування. У першому випадку треба враховувати початкову і кінцеву нестационарні ділянки стрічки, а у другому – точно зв'язати положення шибєрів та ділянки стрічки, на якому проводили вимірювання товщини. Крім того, точність вимірювання товщини прокату впливала на величину α_3 . Раніше Г.А. Виноградовим та Ю.М. Семеновим [33] було показано, що при розсуванні бункера до ширини відповідної куту $47^\circ 55'$ товщина та щільність прокату із залізного порошку змінювалися. Отримання настільки точної величини α_3 є проблематичним, а авторами не була описана методика його вимірювання.

М. В. Мальцев та співробітники [36, 43] використовували ту ж методику, що і В.Г. Хромов, лише замість шибєрів застосовували язички Г. Франсена [44]. За даними М.В. Мальцева α_3 змінювався від 35° (залізний порошок) до $43,5^\circ$ (титановий порошок). М.В. Мальцев [38] порівнював дослідні дані прокатки порошоків залізних, нержавіючих сталей 1X18H15T, 1X18H15, 1X17H2 та титану з результатами розрахунку за формулами (3) і (4), різниця між експериментальною величиною і величиною розрахованою за формулою (2) складала 16 %, а за формулою (4) – від 0 до 8,1 %.

Аналіз результатів отриманих за методиками 2 та 3, а також аналіз відповідних схем напруженого стану порошку при затягуванні його у валки вимагає окремого розгляду, що виходить за рамки цієї статті.

В.Г. Хромов [41], збільшуючи ширину бункера, що подає порошок у валки, встановив, що для порошку титану α_3 збільшувалося від 28 до 30 градусів, що було істотно нижче величини наведеної М.В. Мальцевим [45].

Прикладення зовнішнього зусилля зверху до порошку (контактне напруження від 0,025 до 0,2 МПа) при прокатуванні порошку нержавіючої сталі X18H15 призвело до збільшення величини α_3 від 37 до 39 градусів [46].

Методика розрахунку приведенного кута захоплення. Приведений кут захоплення ($\alpha_{пр}$) розраховують за основним рівнянням прокатки (6) записаним відносно α_3 при припущенні, що явища відставання та випередження відсутні ($\eta = 1$) і справедлива гіпотеза плоских перерізів:

$$\alpha_{пр} = \sqrt{(Z - 1) \frac{h_c}{R}} \quad (11)$$

Усі параметри, які входять у праву частину рівняння легко визначаються. О.М. Ніколаєвим були розраховані значення α_{np} для залізних (від 7 до 9°), мідного (10°50'), нікелевого карбонільного (12°40') та титанового (12°20') порошоків. О.А. Катрусом [28] було показано, що α_{np} має тенденцію до зменшення зі зростанням ВНЩ порошку. Так зі збільшенням ВНЩ від 0,06 до 0,42 кут зменшувався від 0,21 до 0,14 радіан (від 12 до 8 градусів). Підвищення шорсткості валків (R_z від 5 до 7,5 мкм), при прокатці залізних, мідних і нікелевих порошоків призводило до збільшення α_{np} від 6 до 7 градусів лише для порошоків з великою ВНЩ (0,3-0,35), а саме збільшення ВНЩ від 0,05 до 0,36 призводило до зменшення α_{np} від 13 до 6 градусів [29]. Величина α_{np} виявилася меншою за α_z для одних і тих же порошоків заліза в 3,19 - 3,41 рази, мідного в 1,9 рази, титанового в 4,63 рази. Це напевне пов'язане з суттєвою величиною відтиснення порошку. Зі зменшенням твердості матеріалу частинок ця різниця зменшувалася.

Методика визначення кута подачі порошку. Куту подачі порошку ($\alpha_{ш}$) [13, 14] відповідає певна товщина шару порошку, що подається у валки, та відсікається дозуючим пристроєм на дузі контакту валок-порошок. Зміна $\alpha_{ш}$ впливає на властивості порошкового прокату лише у обмеженому інтервалі значень [46]. Після досягнення певної для кожного порошку величини α_z товщина і щільність прокату залишаються незмінними, і подальше збільшення $\alpha_{ш}$ не впливає на властивості прокату. І α_z , і $\alpha_{ш}$ порошку є параметрами умов прокатки, але лише α_z є константою для пари валок-порошок за незмінних умов прокатування (у тому числі і висоти стовпа порошку в бункері).

Методика визначення кута початку епюри тиску. Із застосуванням точкових месдоз вбудованих у валки з'явилася можливість вимірювати кут початку епюри тиску (α_{em}). Насправді ж месдоз фіксує нормальну компоненту (що діє у напрямку штифта месдоз) напруження яке виникає між порошком, а потім неспеченою стрічкою та поверхнею валка. Його визначають по епюрі записаній на діаграмний папір. Величина α_{ed} залежить від чутливості месдоз, якими вимірюють НКН [48]. Тому, деякими авторами запропоновано починати відлік кута при напрузі на месдозах вище за поріг їх чутливості, наприклад більше 2 МПа [15]. Однак таке напруження може відповідати великому коефіцієнту ущільнення (Z), особливо для легких порошоків [49]. Ще одна проблема виникає при визначенні α_{em} : визначати його з урахуванням пружного стиснення валків і стрічки (тобто від величини кута отриманого з епюри віднімають величину кута пружного стиснення) або без урахування останнього. Складність визначення кута пружного стиснення призводила до того, що спочатку його не враховували [23].

Параметри, що впливають на величину α_{em} при прокатуванні з гравітаційною подачею порошку, згідно Г.А. Виноградову та В.П. Каташинському [48] можна розділити на 2 групи:

а. До геометричних параметрів осередку деформації порошку відносяться: діаметр валків, розчин валків, ширина прокату, кут подачі порошку, форма та розміри частинок порошку.

б. До фізико-механічних параметрів відносяться: щільність насипки та утруски порошку, коефіцієнт зовнішнього тертя валок-порошок, кут внутрішнього тертя порошку, коефіцієнт зчеплення порошку, матеріал порошку, сипкість порошку, температура частинок порошку, швидкість прокатування, стан робочої поверхні валків, напрямок прокатування (вертикальний, горизонтальний, похилий), жорсткість робочої кліти стану, в'язкість газового середовища, в якому проводиться прокатування та інші параметри. На жаль, автори не ранжували перелічені параметри за їхньою значимістю, тоб-то ступеню впливу на величину α_{em} .

За епюрами НКН і були експериментально визначені перші α_{em} без урахування пружного стиснення валків і стрічки (тобто α_{em} плюс α_c) [23]. Вже в цій першій роботі було вивчено вплив розчину валків, розміру частинок порошоків заліза (марок АПЖМ та АПЖК) та ширини стрічки на величину дуги контакту, що визначалась авторами в радіанах. Було встановлено, що зі зростанням розміру частинок порошку дуга трохи зменшується від 0,133 до 0,132 радіана (від 7,64 до 7,59 градусів). При збільшенні товщини стрічки від 0,7 до 1,25 мм сума кутів зменшувалася від 0,139 до 0,120 радіан (від 7,99 до 6,90 градусів). Однак ці значення, що включають кут пружного стиснення щонайменше в 2,5 рази менше отриманих у роботі [39].

Для алюмінієвих порошків та гранул α_{em} змінювався від 13 до 18 градусів [47]. Таке велике значення α_{em} пов'язане з тим, що прокатка алюмінієвих порошків і гранул без мастила є специфічним процесом: після руйнування оксидної плівки через високу адгезію алюмінію до сталі відбувається «алюмінізація» валка і величина α_{ed} різко зростає.

Твердження, що порошок, який знаходиться в перерізі, що відповідає початку α_{em} , знаходиться в стані утруски, піддавалося критиці [50], але воно дало можливість використовувати основне рівняння прокатки (6) для розрахунку коефіцієнта витяжки (η') в осередку деформації, що відповідав дузі епюри тиску, замінивши в ньому α_z на α_{em} , а щільність насипки порошку на щільність його утруски. При відомих щільностях стрічки та утруски порошку, товщині прокату, діаметрі валків та величині α_{em} розрахувати η' можна за формулою:

$$\eta' = \frac{\rho_{утр}}{\rho_c} \left(1 + \frac{\alpha_{erR}}{h_c}\right) \quad (12)$$

У роботі [15] була проведена спроба оцінити наскільки сильно може відрізнятись тиск пресування необхідний для досягнення нікелевим карбонільним і різними залізними порошками щільності утруски. Було встановлено, що для Ni карбонільного (ВНЩ = 0,16) тиск який відповідає щільності утруски дорівнює 2 МПа, тоді як для залізного відпаленого порошку з ВНЩ = 0,21 такий тиск становить 2,4 МПа, а для невідпаленого порошку з ВНЩ = 0,24 він дорівнює 6 МПа. Не вдаючись у деталі про відповідність НКН та тиску пресування при отриманні стрічок та пресовок однакової щільності, можна сказати, що розрахунки за формулою (12) будуть точнішими для легких та відпалених порошків.

Методики визначення та розрахунку кута формування (α_ϕ). Його визначають після зупинки валків під час стаціонарного процесу прокатки порошку, видалення порошку із зівів валків та вимірювання найбільшої товщини сформованої частини стрічки h_c або правильніше – h_ϕ . Потім сам кут розраховують за такою формулою:

$$\alpha_\phi = \arccos\left(1 - \frac{h_\phi - h_c}{D}\right) \quad (13)$$

П. Еванс та Г. Сміт [17] визначали кут формування (помилково називаючи його кутом захоплення «gripping angle») по задньому кінці недокату. Вони зупиняли стан і обережно здували порошок, що залишився неспресованим, а потім заміряли ширину сформованого порошку. Для мідних порошків електролітичного, розпиленого водою та розпиленого повітрям цей кут дорівнював 6°, 3,5° та 1,5° відповідно. У подальшому таку методику застосовували й інші дослідники.

Г.А. Виноградов [35] зазначає, що α_ϕ залежить від кута подачі порошку. Так для залізного порошку марки АПЖМ із зростанням кута подачі від 6°10' до 22°20' α_ϕ збільшувався від 1°45' до 6°20', а також він збільшувався зі зростанням ширини стрічки. Збільшення ширини від 30 до 215 мм призводило до зростання α_ϕ від 7°48' до 10°. Є.Б. Ложечников [51] наводить значення кута формування для залізних порошків від 8° до 10°. Наведені значення перевищують величину кута епюри тиску (від 6,90° до 7,99° при отриманні стрічок шириною 50 мм із порошків заліза марок АПЖМ та АПЖК [23]).

Приймаючи гіпотезу плоских перерізів та використовуючи положення механіки суцільного середовища І.Є. Кулешов виводить рівняння для розрахунку малих значень кутів формування [34]:

$$\alpha_\phi = \frac{1 - K^2 + 4\mu^2}{4\mu(1 + K^2)}, \quad (14)$$

де K – коефіцієнт внутрішнього тертя порошку.

Очевидно, α_{ϕ} залежить від тих же властивостей порошків, що і їх формованість [52].

Методика визначення нейтрального кута (γ). Нейтральний кут (γ) відміряється від площини, що проходить через осі валків [13, 14, 18], проте як буде показано нижче, на практиці це не завжди виконується. Кут γ визначають за кривою епюри НКН і розраховують з урахуванням і без урахування ефекту пружної післядії [26]. Кут γ має невеликі значення, у кілька разів менші, ніж кут пружного стиснення валків α_c . Він залежить від матеріалу порошку, щільності прокату або МНКН, товщини та ширини прокату [14, с. 21]. Так, при прокатуванні порошків заліза, нікелю та свинцю було встановлено [15], що для порошку свинцю γ становив приблизно 3° , для мідного електролітичного від 0,2 до $0,3^\circ$ (для ВЩС 0,82 та 0,64 відповідно), для нікелевого розпиленого - $0,45-0,55^\circ$, для залізного - від 0,2 до $0,5^\circ$. Зі зростанням ВЩС чи МНКН γ зменшується. При розширенні діапазону МНКН було показано [15], що γ спочатку зменшувався, проходячи через мінімум приблизно при 1 ГПа, а потім знову зростав. Цей результат отримано для ширини стрічки 30 мм. Зі зростанням ширини до 60 мм γ трохи зменшувався. Для залізних порошків марок АПЖМ та АПЖК [23] сума кутів γ і α_c (яку правильніше назвати кутом випередження) змінювалася від 1,17 до 1,40 градусів.

Методика визначення кута пружного стиснення α_c . Методика визначення кута пружного стиснення була запропонована В.П.Каташинським та Г.А. Виноградовим [26, 53]. Для позначки на осцилограмі контактної напруги на лінії центрів використовували колекторний пристрій. Але точність позначки залежала від точності встановлення контактів. Тоді авторами було запропоновано проводити прокатку одного і того ж порошку в прямому та зворотному напрямках і потім точно розраховувати α_c . Його вимірюють від лінії центрів до перерізу виходу стрічки із валків. Дослідження α_c проводилися при прокатуванні залізного, мідного та нікелевого порошків [53]. Було встановлено, що при прокатці металевих порошків відбувається значне збільшення дуги контакту валок-метал за рахунок пружного стискування валків. Залежність α_c від МНКН, для досліджених порошків і різної ширини стрічок, мала лінійний характер. В інтервалі МНКН від 150 до 1100 МПа α_c змінювалося для залізного, мідного і нікелевого порошків від 0,013 до 0,031 (від $0,75$ до $1,78^\circ$) від 0,014 до 0,028 (від $0,80$ до $1,60^\circ$) і від 0,01 до 0,029 (від $0,57$ до $1,66^\circ$) радіан відповідно. Г.А. Аксьонов та В.П. Ревякін [15] встановили зміну кута α_c від 0,8 до 1,4 градуса. Значення α_c збільшувалося зі зростанням НКН або щільності стрічок, а при одній і тій же ВЩС α_c збільшувалося в ряді мідь, залізо, нікель, тобто зі зростанням границі плинності матеріалу частинок та його схильності до зміцнення при деформації.

За дослідженнями А.А. Корольова [54] при холодній прокатці тонких листів та стрічок (V схема прокатки за класифікацією Чекмарьова), найближче до якої стоїть прокатка металевих порошків, величина пружного стиснення валків на 25-30% збільшує довжину зони деформації. Реальна величина α_c у 2-3 рази більша за розраховану за формулою Хічкока [55], виведеною із задачі Герца про пружне стиснення двох циліндрів. А.А. Корольов вважав, що на вихідній гілці епюри НКН можливо має місце запізнення («затискання») вимірювального штифта месдози, крім того, відхилення показань геометричної осі валків давали відмітники лінії центрів.

Методика розрахунку кута прикладення рівнодіючої β . Кут β визначають за епюрою НКН, замінюючи висхідну та низхідну гілки епюри прямими лініями, що є досить грубим наближенням. Отримують трикутник однією із сторін якого є основа епюри. Величина β дорівнює величині дуги від лінії центрів до точки проекції рівнодіючої нормальних сил на основу епюри НКН (точки центру мас трикутника).

Розраховують β за формулою [14]:

$$\beta = 1/3(\alpha_{em} + \gamma - \alpha_c) \quad (15)$$

Під час проведення розрахунків припускають, що β становить близько 1/3 від α_{em} [14]. Залежність β від параметрів прокатки порошків вивчали у роботі [15]. Було досліджено 15 видів порошків і встановлено, що величина кута змінювалася від 0,067 до 0,020 радіан (від

3,84 до 1,15 градуса) залежно від властивостей порошку. Для низки залізних та нікелевих порошків (ПЖЗК, ПЖ5М, ПНЕ та ін.) значення кута було близьким до 0,035 (2 градуси). Свинцевий порошок з найбільшою ВНЩ (0,528) мав найбільше значення кута 0,067 радіан (3,84 градуси), а легкі порошки (за ВНЩ) мідний та залізний мали кут 0,022 та 0,025 радіан (1,26 та 1,43 градуса) відповідно.

Більш точне визначення кута прикладення рівнодіючої можливе при комп'ютерній обробці масиву даних НКН.

Методика визначення кута зустрічі захоплених валками шарів порошку. Згідно з Т.Тойбертом [16] кут зустрічі захоплених валками шарів порошку визначає переріз початку ущільнення порошку. Він пояснює формування цього кута. «У центрі осередку деформації існує зона порошку, що не зазнала впливу валків. Дослідження розподілу швидкості частинок показало, що в центрі осередку деформації існує зона вільного руху порошку подібно до вільного руху у бункері. Після того, як відбувається захоплення порошку валками, зона вільного руху звужується. Захоплений порошок починає випереджати центральні шари та відбувається зустріч захоплених валками шарів. Кут зустрічі для залізного порошку марки ПЖВ4М2 становив приблизно 20 градусів. У перерізі зустрічі захоплених валками шарів щільність порошку не сильно відрізняється від насипної. На підставі проведеного аналізу фізичний осередок деформації при прокатуванні порошку можна розділити на дві зони – зону подачі або живлення та зону ущільнення, в якій відбувається ущільнення від щільності утруски до щільності стрічки». У роботі [16] відсутня методика визначення цього кута та пояснення його формування є дискусійним.

Метод визначення та розрахунку кута стабілізації процесу. Кут стабілізації процесу ($\varphi_{ст}$) визначає умови прокатки. При прокатуванні порошків розрізняють три періоди процесу: початковий нестационарний, середній стаціонарний та кінцевий нестационарний [33]. Початковий та кінцевий періоди характеризуються змінними товщинами та щільністю стрічки, яка виходить з валків. Кут повороту валків, після якого процес встановлюється, і є кутом $\varphi_{ст}$. В.П. Каташинським [26, с.142, с.157] наведено формулу для розрахунку $\varphi_{ст}$:

$$\varphi_{ст} = \frac{\alpha_{ст} + \gamma}{2} \quad (16)$$

Кут $\varphi_{ст}$ залежить від: жорсткості стану, властивостей порошку, способу подачі порошку, ширини прокату і може змінюватися від 0,5 – 0,7 радіан (30-40°) до суттєво більших величин [30]. Ці величини на багато більші за ті які можна одержати при розрахунку за формулою (16). На жаль вивчення залежностей $\varphi_{ст}$ від перерахованих вище параметрів та їх ранжування автор не проводив. Слід зазначити, що за відсутності відтиснення і розширення (коефіцієнти витяжки і розширення рівні 1) $\varphi_{ст}$ повинно дорівнювати куту захоплення α_z , а за наявності всіх перелічених явищ він збільшується на їх сумарну величину.

Ранжування параметрів від яких залежить кут захоплення. Розмір кута захоплення змінюється від 28 до 46 градусів. Можливо кут захоплення може мати і більші значення (для схеми прокатки з вертикальною подачею порошку), але методи його визначення, які були застосовані, не дозволяли це встановити.

За своєю значимістю параметри, що впливають на кут захоплення, розташовуються наступним чином:

– коефіцієнт тертя валок-порошок, при його збільшенні від 0,2 до 0,45 (в 2,5 рази) α_z збільшується від 16 до 38° (майже в 2,5 рази) [37];

– коефіцієнт бічного тиску, при його збільшенні від 0,3 до 0,4 (в 1,3 рази) α_z збільшується від 37 до 48° (в 1,3 рази) [37], при малих значеннях коефіцієнта тертя вплив коефіцієнта бічного тиску істотно менший;

– відносна насипна щільність порошку, при збільшенні ВНЩ залізного порошку від 0,084 до 0,364 (у 4,33 рази) α_z збільшується від 19,5 до 25,0 градусів (у 1,28 разів) [25], а при зростанні ВНЩ від 0,21 до 0,306 (в 1,5 рази) α_z збільшується від 25 до 30 градусів (в 1,2 рази) [12];

ширина подачі потоку порошку, збільшення ширини бункера від 28 до 30 мм збільшило α_3 на 8 %.

зовнішнє зусилля прикладене до порошку, при збільшенні від 0,025 до 0,2 МПа (у 8 разів) α_3 збільшився від 28 до 30 градусів (на 5,5 %)

Згідно з розглянутими параметрами осередку деформації, його конфігурація виглядає наступним чином:

Перша зона від перерізу який відповідає куту захоплення до перерізу який відповідає початку появи тиску (кут епюри тиску). Порошок, що залучається в осередок деформації, піддається головним чином структурній деформації. Для цієї зони (цього об'єму порошку) характерне значне відтиснення (відставання), при цьому відбувається суттєва витяжка порошку. Деформація порошку відбувається по механізму зсуву, а наявність відкритої зони у верхній частині бункера може призводити навіть до розпушування порошку.

Друга зона від перерізу який відповідає куту епюри тиску до перерізу врівноважування, який відповідає нейтральному куту. У цій зоні порошок починає пластично деформуватися та ущільнюватися (при незначному відтисненні), У цій зоні сили тертя валок-порошок забезпечують деформацію порошку та неспеченої стрічки.

Перші дві зони поверхні валка відповідають куту відставання.

Третя зона від перерізу врівноважування (нейтральний кут) до перерізу виходу сформованої стрічки з валків (кут пружного стиснення). Товщина осередку деформації у цій зоні продовжує зменшуватися і можна припустити, що в цьому просторі сформована стрічка або продовжує ущільнюватися, або видавлюється вперед в отвір, що звужується, або проходять обидва процеси одночасно. Величина НКН на дузі валка, яка відповідає куту випередження, катастрофічно зменшується, тому ущільнення, швидше за все, не відбувається, або відбувається за рахунок зсувних напружень, що виникають в цій частині осередку деформації. На ділянці кута випередження сформована стрічка максимально ущільнена і зміцнена і при зниженні тиску пружно розширюється, подовжуючи осередок деформації.

У відповідності з вище наведеним розглядом осередку деформації виникає кілька важливих запитань. Чому така велика зона осередку деформації? Як у ній змінюється щільність порошку та стрічки? Чому така велика величина відтиснення (коефіцієнта витяжки) розрахована для 1-ї зони (вона дорівнює 3÷4)? Чому при зміні товщини на початку першої зони (в якій відбувається головним чином структурна деформація) все ж таки змінюється товщина стрічки? Чи прямолінійний перетин в якому врівноважуються сили при прокатуванні порошків?

ВИСНОВКИ

Розглянуто 11 кутових параметрів, запропонованих різними авторами для опису симетричного осередку деформації при прокатуванні порошків. Це кут захоплення, приведений кут захоплення, кут подачі порошку, кут початку епюри тиску, кут початку формування, нейтральний кут, кут пружного стиснення, кут прикладення рівнодіючої сил, кут зустрічі захоплених валками шарів порошку, кут стабілізації процесу і та кут відставання.

Кут відставання розраховується за формулою $\alpha_{від} = \alpha_3 - \gamma$ (причому γ береться з урахуванням пружного стиснення валків).

Для повнішої характеристики осередку деформації запропоновано новий **кут випередження**, який розраховується за формулою $\alpha_{вип.} = \gamma + \alpha_c$, який практично дорівнює нейтральному куту без урахування пружного стиснення валків.

Співвідношення кута відставання до кута випередження характеризує стан осередку деформації: симетричність, наявність переднього натягу та ін.

Для визначення кута захоплення описано 3 експериментальні методики:

по припиненню зміни зусилля прокатки при зміні товщини шару порошку, що подається (цей метод залежить від чутливості вимірювача тиску);

по припиненню зміни товщини стрічки при зміні товщини шару порошку, що подається за допомогою шибера Семенова;

по припиненню зміни товщини стрічки при зміні товщини шару порошку, що подається за допомогою язичків Франсена. Лише ця методика усуває більшість негативних факторів, що впливають на величину кута захоплення.

За рангом зменшення впливу досліджених параметрів кут захоплення залежить від коефіцієнта тертя валок-порошок, коефіцієнта бічного тиску; відносної насипної щільності (ВНЩ) порошку; ширини бункера та зовнішнього зусилля, що додається до порошку. Залишається не дослідженим вплив густини порошку (вона впливає на вагу стовпа порошку), пористості вільно насипаного порошку (непрямо вона пов'язана з коефіцієнтом внутрішнього тертя) та властивостей самого матеріалу частинок.

Проведений аналіз кутових параметрів осередку деформації, встановлені параметрів від яких вони залежать, ранжування їх за значимістю та аналіз величин для різних порошкових матеріалів та умов прокатування, а також встановленні взаємозалежності між ними, дозволять більш точно і науково керувати процесом прокатування порошків, а також допоможе у прогнозуванні режимів прокатування не проводячи експерименту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Steytler M., Knutsen R. Identifying challenges to the commercial viability of direct powder rolled titanium: a systematic review and market analysis. *Materials*. 2020. 13(9), p. 2124. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13092124>.
2. Kunene K., Bemont C.P., Cornish L.A., Dittes A., et al. The influence of direct powder rolling parameters on the properties of aluminium strip. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. 1147(1):012017, pp.1–12. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1147/1/012017/pdf> (дата звернення 01.09.2023)
3. Orlovskaya N., Lugovy M., Subbotin V., Radchenko O., et al. Robust design and manufacturing of ceramic laminates with controlled thermal residual stresses for enhanced toughness. *Journal of Material Science*. 2005. 40, pp. 5483–5490. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1923-x>.
4. Радченко О.К. Фізико-хімічні основи процесу одержання прокатуванням тонких стрічок з тонкодисперсних керамічних порошоків. *Ceramics, Polish Ceramic Bull.* 2005. 89, pp.153–161.
5. Gogaev, K.A., Voloshchenko, S.M., Podrezov, Y.N. et al. Process approaches for producing complex composite inoculants by rolling of powder mixtures. III. Production and properties of multi-component compacts and rolled strips of powder inoculants with different compositions. *Powder Metall Met Ceram.* 2017. 55. 9–10, pp. 505–510. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9833-4>.
6. Пат. 88530 Україна. Спосіб виготовлення модифікатора. Волощенко С.М., Гогаєв К.О., Радченко О.К., Шейко О.І., Аскеров М.Г. № а200714239; заявл. 18.12.07; опубл. 16.07.09. Бюл. 20.
7. Voloshchenko, S.M., Gogaev, K.A. & Radchenko, A.K. Complex modifiers produced by rolling of powder mixtures for iron-carbon steels. *Powder Metall Met Ceram.* 2009. 48. 1–2, pp. 100–104. <https://doi.org/10.1007/s11106-009-9090-2>.
8. Волклгон В.М., Аврамчук С.К., Кравчук А.В., Радченко А.К., Каташинский В.П. Оптимизация параметров процесса прокатки порошков нитрида бора. *Сверхтвердые материалы*. 2007. 2. С. 73–80.
9. Chen Zhang, Lei Jia, Hui Xie, Ruifeng Niu et al. Simulation on the Direct Powder Rolling Process of Cu Powder by Drucker-Prager/Cap Model and Its Experimental Verification. *Metals*. 2022. 12(7), pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071145>
10. Приходько І.Ю., Дедик М.А., Гогаєв К.А., Иценко А.И., Воропаев В.С. Комплексное конечно-элементное исследование процессов производства титановых полос несимметричной холодной прокаткой порошка с последующим спеканием. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2019. 33. С. 173–192. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-173-192>.
11. Аксёнов Г.И. Прокатка металлического порошка в ленту. *Сб. Порошковая металлургия*, Москва: ВСНТО. 1954. С. 15.
12. Николаев А.Н. Давление на валки и угол захвата при прокатке железного порошка. *Труды ГПИ. Горький*. 1958. Т. XIV. 2. С. 30–36.
13. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Об угловых параметрах процесса прокатки металлических порошков. *Порошковая металлургия*. 1965. 9. С. 34–39.
14. Виноградов Г.А., Семенов Ю.Н., Катрус О.А., Каташинский В.П. Прокатка металлических порошков. Москва: Металлургия, 1969. 382 с.
15. Аксёнов Г.И., Ревякин В.П. Исследование основных углов и силовых параметров. *Порошковая металлургия*. 1969. 4. С. 18–25.
16. Тойберт Т. Исследование уплотнения металлических порошков в процес се прокатки и формирование механических свойств неспеченных заготовок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург. 1996. 12 с.
17. Evans P., Smith G. Investigation of Metal Powder Pressing Process via Rolling. *Powder Metallurgy*. 1959. 3, pp.1–16.
18. Johanson J. R. A rolling theory for granular solids, ASME, *Journal of Applied Mechanics. Series E*. 1965. 32(4), pp. 842–848.
19. Francey V.A. The roll-compaction of metal Powders. *Powder metallurgy*. 1969. 12. 24, pp. 598-612.

20. Nayar H.S. Powder metallurgy. Review 4. Strip Products via Particle Metallurgy. *Powder metallurgy International*. 1972. 4. 1, pp. 30 – 36.
21. Dube R.K. Particle Technology Methods for Making Metal Strip. Part 2. *Powder Metallurgy International*. 14. 1. 1982, pp. 45–48.
22. Shima S., Yamada M. Compaction of metal powder by rolling. *Powder metallurgy*. 1984. 27. 1, pp. 39 – 44.
23. Чекмарёв А.П., Клименко П.А., Виноградов Г.А. Давление и коэффициент трения при прокатке металлических порошков. Тр. ЛПИ, № 222. Обработка металлов давлением. Москва–Ленинград: Машгиз. 1963. С. 53 –57.
24. Мальцев М.В. Угол захвата и давление при прокатке металлических порошков. Тр. ЛПИ, № 296. Порошковая металлургия. Москва: Металлургия. 1969. С. 42–45.
25. Аксёнов Г.И., Николаев А.Н. Угол захвата порошка валками при прокатке. Тр. ГПИ. Горький. 1956. XI. 5. С. 23–26.
26. Каташинский В.П. Исследование силовых параметров прокатки металлических порошков: дис. канд. техн. наук: Киев. 1965. 177с.
27. Николаев А.Н. Прокатка металлических порошков. Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия. 1958. 2. С. 113–121.
28. Катрус О.А. Расчёт технологических параметров процесса прокатки лент из порошков по их насыпной плотности. Порошковая металлургия. 1981. 2. С. 9–15 .
29. Катрус О.А., Радченко А.К. Влияние шероховатости валков и относительной плотности порошка на толщину и плотность проката. Порошковая металлургия. 1983. 12. С. 14–17.
30. Йоффе Р.С. Анализ напряжений и граничный угол подачи при прокатке порошков. Порошковая металлургия 1969. 2. С.3–6.
31. Шведков Е.Л., Денисенко Э.Т., Ковенский И.И.. Словарь-справочник по порошковой металлургии. Киев: Наукова думка. 1982. 270 с.
32. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Исследование удельного давления при прокатке металлических порошков. Порошковая металлургия. 1963. 3. С. 30–36.
33. Виноградов Г.А., Семенов Ю.Н. Прокатка металлических порошков. Москва: Металлургиздат, 1960. 88 с.
34. Кулешов И.Е. Геометрические параметры зоны отставания при прокатке металлических порошков. Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия. 1982. 9. С. 74–77.
35. Виноградов Г.А., Радомысельский И.Д. Прессование и прокатка металлокерамических порошков. Москва–Киев: Машгиз. 1963. 200с.
36. Мальцев М.В., Николаев А.Н., Тихонов Г.Ф., Хромов В.Г. Угол захвата порошка при прокатке. Порошковая металлургия: материалы IX всесоюзн. конф. по порошковой металлургии. Май 1968. Рига. 1968. С. 24–36.
37. Аксёнов Г.И. Основы порошковой металлургии. Куйбышев: Куйбыш. кн. из-во. 1962. 190 с.
38. Мальцев М.В. Расчет граничного угла подачи при вертикальной прокатке порошков. Порошковая металлургия. 1967. 3. С. 7–10.
39. Смирнов В.С., Павлов Н.Н., Целесин Н.Н. Аналитический метод определения угла прокатки. Порошковая металлургия. 1968. 3. С. 6–10.
40. Спинов В.А. Отыскание верхней границы области уплотнения очага деформации при прокатке порошков. Порошковая металлургия. 1973. 5. С.27–29.
41. Хромов В.Г. Определение угла захвата при прокатке металлических порошков. Тр. ЛПИ, № 222. Обработка металлов давлением. Москва–Ленинград: Машгиз. 1963. С.73–74.
42. А. с.127124 СССР. Устройство для подачи порошка в прокатные валки. Семёнов Ю.Н.. № 639016/22; заявл. 16.09.59; опубл. 05.10.60. Бюл. № 6.
43. Мальцев М.В., Николаев А.Н., Хромов В.Г. Определение граничного угла подачи при прокатке металлических порошков. Порошковая металлургия. 1965. 5. С.17–19.
44. Pat. 939241 BRD. F 5867 I b / 49 I. Walzwerk zum Verdichten von Pulvern zu endlosen Bandern. Franßen H. 1956.
45. Мальцев М.В., Николаев А.Н. Исследование внешнего трения металлических порошков в области низких давлений. Порошковая металлургия. 1969. 7. С. 73–77.
46. Мальцев М.В., Пырялов Л.А. Влияние принудительной подачи порошка в валки на величину граничного угла. Тр. ГПИ. Горький. XXIII. 3. 1967. С. 45–48.
47. Николаев А.Н. Стальная лента полученная методом прокатки порошка. Тр. ГПИ. Горький. XI. 2. 1958. С. 16–29.
48. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. Москва: Металлургия. 1979. 224 с.
49. Каташинский В.П. О протяжённости зоны уплотнения при прокатке металлических порошков. Порошковая металлургия. 1968. 7. С. 19–21.
50. Катрус О.А., Очеретянский В.М. Уплотнение порошков на начальном этапе. Порошковая металлургия. 1981. 3. С. 25–31.

51. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. Москва: Металлургия. 1987. 184 с.
52. Гогаев К.А., Радченко А.К. Формование многокомпонентных порошковых систем. Донецк: из-во Ноулидж. 2009. 477 с.
53. Каташинский В.П., Виноградов Г.А. Упругое сжатие валков при прокатке металлических порошков. *Порошковая металлургия*. 1967. 7. С. 37–41.
54. Королёв А.А. Новые исследования деформации металла при прокатке. Москва: Машгиз. 1953.
55. Тринк В. Механика холодной прокатки. *Реф. «Новости иностранной литературы»*. 1937. №8.

REFERENCES

1. Steytler M., Knutsen R. Identifying challenges to the commercial viability of direct powder rolled titanium: a systematic review and market analysis. *Materials*. 2020. 13, p. 2124. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13092124>
2. Kunene K., Bemont C.P., Cornish L.A., Dittes A., et al. The influence of direct powder rolling parameters on the properties of aluminium strip. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. 1147(1):012017, pp. 1–12. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1147/1/012017/pdf> (дата звернення 01.09.2023)
3. Orlovskaya N., Lugovy M., Subbotin V., Radchenko O., et al. Robust design and manufacturing of ceramic laminates with controlled thermal residual stresses for enhanced toughness. *Journal of Material Science*. 2005. 40, pp. 5483–5490. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1923-x>.
4. Radchenko O.K. Physical and chemical basis for the process of rolling thin lines from finely dispersed ceramic powders. *Ceramics, Polish Ceramic Bull.* 2005. 89, pp.153–161. (in Ukrainian).
5. Gogaev, K.A., Voloshchenko, S.M., Podrezov, Y.N. et al. Process approaches for producing complex composite inoculants by rolling of powder mixtures. III. Production and properties of multi-component compacts and rolled strips of powder inoculants with different compositions. *Powder Metall Met Ceram*. 2017. 55. 9-10, pp. 505–510. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9833-4>.
6. Pat. 88530 Ukraine. How to make a modifier. Voloshchenko S.M., Gogaev K.O., Radchenko O.K., Sheiko O.I., Askerov M.G. 2009. Bul. 20. (in Ukrainian).
7. Voloshchenko, S.M., Gogaev, K.A. & Radchenko, A.K. Complex modifiers produced by rolling of powder mixtures for iron–carbon steels. *Powder Metall Met Ceram*. 2009. 48. 1-2, pp. 100–104. <https://doi.org/10.1007/s11106-009-9090-2>.
8. Volkogon, V.M., Avramchuk, S.K., Kravchuk, A.V. et al. Optimization of rolling process parameters for wurtzite boron nitride powders. *J. Superhard Mater.* 2007. 29. 2, pp. 73–8. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457607020086>.
9. Chen Zhang, Lei Jia, Hui Xie, Ruifeng Niu et al. Simulation on the Direct Powder Rolling Process of Cu Powder by Drucker–Prager/Cap Model and Its Experimental Verification. *Metals*. 2022. 12(7), pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071145>.
10. Prikhodko I.Yu., Dedic M.A., Gogaev K.A., Itsenko A.I., Voropaev V.S. Comprehensive finite-element study of processes for the production of titanium strips by asymmetric cold rolling of a powder followed by sintering. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 2019. 33, pp. 173–192. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2019-33-173-192>
11. Aksënov G.Y. Rolling metal powder into a strip. *Sb. Powder Metallurgy*. Moscow: VSNYTO. 1954, p. 15. (in Russian).
12. Nykolaev A.N. Pressure on the rolls and the angle of grip when rolling iron powder. *Bul. GPI. Gorkiy*. 1958. T. XIV. 2, pp. 30–36. (in Russian).
13. Vynohradov G.A., Katashynskiy V.P. On the angular parameters of the process of rolling metal powders. *Powder Metallurgy*. 1965. 9, pp.34–39. (in Russian).
14. Vynohradov G.A., Semenov Yu.N., Katrus O.A., Katashynskiy V.P. Rolling metal powders. Moscow: Metallurhiya. 1969. 382 p. (in Russian).
15. Aksënov G.Y., Reviakyn V.P. Study of basic angles and power parameters. *Powder Metallurgy*. 1969. 4, pp. 18–25. (in Russian).
16. Toibert T. Investigation of the compaction of metal powders during rolling and the formation of mechanical properties of green billets. Abstract of PhD Dissertation. Sankt-Peterburh, 1996. 12 p. (in Russian).
17. Evans P., Smith G. Investigation of metal powder pressing process via rolling. *Powder Metallurgy*. 1959. 3, pp. 1–16.
18. Johanson J. R. A rolling theory for granular solids, *ASME, Journal of Applied Mechanics. Series E*. 1965. 32(4), pp. 842–848.
19. Francey V.A. The roll-compaction of metal Powders. *Powder metallurgy*. 1969. 12. 24, pp. 598– 612.
20. Nayar H.S. Powder metallurgy. Review 4. Strip Products via Particle Metallurgy. *Powder metallurgy International*. 1972. 4. 1, pp. 30 – 36.
21. Dube R.K. Particle technology methods for making metal strip, part 2. *Powder Metallurgy International*. 1982. 14. 1, pp. 45-48.
22. Shima S., Yamada M. Compaction of metal powder by rolling. *Powder metallurgy*, 1984. 27. 1, pp. 39–44.
23. Chekmarev A.P., Klymenko P.A., Vynohradov H.A. Pressure and coefficient of friction during rolling of metal powders. *Bul. LPI, № 222. Metal forming*. Moscow–Leningrad: Mashhyz. 1963, pp. 53–57. (in Russian).

24. Maltsev M.V. Capture angle and pressure during rolling of metal powders. *Bul. LPI, № 296. Powder metallurgy*. Moscow: Metallurhyia. 1969, pp. 42–45. (in Russian).
25. Aksënov H.Y., Nykolaev A.N. The angle of capture of the powder by the rolls during rolling. *Bul. GPI. Gorkiy*. 1956. XI. 5, pp. 23–26. (in Russian).
26. Katashynskiy V.P. Investigation of power parameters of metal powder rolling. Ph.D Dissertation. Kyiv. 1965. 177 p. (in Russian).
27. Nykolaev A.N. Rolling of metal powders. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1958. 2, pp. 113–121. (in Russian).
28. Katrus O.A. Calculation of technological parameters of the process of rolling strips from powders according to their bulk density. *Powder metallurgy*. 1981. 2, pp. 9–15. (in Russian).
29. Katrus O.A., Radchenko A.K. Influence of the roughness of the rolls and the relative density of the powder on the thickness and density of rolled products. *Powder Metallurgy*. 1983. 12, pp. 14–17. (in Russian).
30. Yoffe R.S. Stress analysis and boundary feed angle during powder rolling. *Powder Metallurgy*. 1969. 2, pp. 3–6. (in Russian).
31. Shvedkov E.L., Denysenko E.T., Kovenskiy Y.Y. Dictionary-reference book on powder metallurgy. Kyiv: Scientific Thought. 1982. 270 p. (in Russian).
32. Vynohradov G.A., Katashynskiy V.P. Study of the specific pressure during the rolling of metal powders. *Powder Metallurgy*. 1963. 3, pp. 30–36. (in Russian).
33. Vynohradov G.A., Semenov Yu.N. Rolling metal powders. Moscow: Metallurhyzdat. 1960. 88 p. (in Russian).
34. Kuleshov Y.E. Geometric parameters of the lagging zone during the rolling of metal powders. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982. 9, pp. 74–77. (in Russian).
35. Vynohradov G.A., Radomuselskiy Y.D. Pressing and rolling of cermet powders. Moscow–Kyiv: Mashhyz. 1963. 200 p. (in Russian).
36. Maltsev M.V., Nykolaev A.N., Tykhonov H.F., Khromov V.H. Powder capture angle during rolling. *Powder metallurgy: Proceedings of IX conferences*. Mai 1968. Ryha. 1968, pp. 24–36. (in Russian).
37. Aksenov G.Y. Fundamentals of powder metallurgy. Kuibushev. 1962. 190 p.
38. Maltsev M.V. Calculation of the boundary feed angle for vertical rolling of powders. *Powder Metallurgy*. 1967. 3, pp. 7–10. (in Russian).
39. Smyrnov V.S., Pavlov N.N., Tselesyn N.N. Analytical method for determining the rolling angle. *Powder Metallurgy*. 1968. 3, pp. 6–10. (in Russian).
40. Spynov V.A. Finding the upper boundary of the region of compaction of the deformation zone during rolling of powders. *Powder Metallurgy*. 1973. 5. pp. 27–29. (in Russian).
41. Khromov V.H. Determination of the capture angle during rolling of metal powders. *Bul. LPI, № 222. Metal forming*. Moscow–Leningrad: Mashhyz. 1963, pp. 73–74. (in Russian).
42. Pat. 127124 SSSR. Semënov Yu.N. Device for supplying powder to rolling rolls. 1960. Bul. 6. (in Russian).
43. Maltsev M.V., Nykolaev A.N., Khromov V.H. Determination of the boundary feed angle during the rolling of metal powders. *Powder Metallurgy*. 1965. 5, pp. 17–19. (in Russian).
44. Pat. 939241 BRD. F 5867 I b / 49 I. Walzwerk zum Verdichten von Pulvern zu endlosen Bandern. Franßen H. 1956.
45. Maltsev M.V., Nykolaev A.N. Study of external friction of metal powders in the low pressure region. *Powder Metallurgy*. 1969. 7, pp. 73–77. (in Russian).
46. Maltsev M.V., Pirialov L.A. Influence of forced feeding of powder into rolls on the value of the boundary angle. *Bul. GPI. Gorkiy*. 1967. XXIII. 3, pp. 45–48. (in Russian).
47. Nykolaev A.N. Steel strip obtained by powder rolling. *Bul. GPI. Gorkiy*. 1958. XI. 2, pp. 16–29. (in Russian).
48. Vynohradov G.A., Katashynskiy V.P. Theory of sheet rolling of metal powders and granules. Moscow: Metallurhyia. 1979. 224 p. (in Russian).
49. Katashynskiy V.P. On the length of the compaction zone during the rolling of metal powders. *Powder Metallurgy*. 1968. 7, pp. 19–21. (in Russian).
50. Katrus O.A., Ocheretianskiy V.M. Compaction of powders at the initial stage. *Powder Metallurgy*. 1981. 3, pp. 25–31. (in Russian).
51. Lozhechnykov E.B. Rolling in powder metallurgy. Moscow: Metallurhyia. 1987. 184 p.
52. Gogaev K.A., Radchenko A.K. Formation of multicomponent powder systems. Donetsk: Noulydzh. 2009. 477 p. (in Russian).
53. Katashynskiy V.P., Vynohradov G.A. Elastic compression of rolls during rolling of metal powders. *Powder Metallurgy*. 1967. 7, pp. 37–41. (in Russian).
54. Korolëv A.A. New studies of metal deformation during rolling. Moscow: Mashhyz. 1953. (in Russian).
55. Trynks V. Mechanics of cold rolling. *Ref. «News of foreign literature»*. 1937. №8. (in Russian).

Radchenko O., Gogaev K., Askerov M., Voropaev V. Angular parameters of the center of deformation during the rolling of metal powder (review).

Considering the complexity of the powder rolling process, and the fact that there is a need to predict the rolling modes of new powders and complex powder systems, establishing the angular parameters of the deformation center is an urgent task. It is especially important to know the angular parameters when optimizing the rolling modes in cases where this operation is the last when obtaining the finished product. The review examines the angular parameters characterizing the symmetrical center of deformation during the rolling of metal powders in rolls with a smooth surface. It is shown that the rolling of metal powders is a complex process, for the description of which various angular parameters have been proposed at different times. 11 angles, their names, description, methods of definition and calculation are considered. Most of them had several names from which the most successful were chosen. New names have been proposed for three of them, which more fully characterize their physical essence. Angle values for different powders and different methods of their measurement were analyzed. The set parameters depend on the considered angles. The angle of capture of the powder was most fully investigated. For the angle of capture, according to the available literature, the parameters on which it depends are ranked according to their importance. In decreasing order of influence of the studied parameters, the grip angle depends on the roller-powder friction coefficient, the lateral pressure coefficient; relative bulk density of the powder; the width of the hopper and the external force applied to the powder. The influence of the physico-mechanical properties of the particle material on the capture angle remains unexplored. An advance angle is added to the existing angles, which together with the lag angle covers the entire deformation cell. It is shown that the ratio of lag and lead angles can be used to characterize such features of the deformation center as symmetry and the presence of forward tension, and can also characterize the plastic properties of the particle material.

Key words: rolling of metal powders, deformation centers, symmetry, angular parameters.

Радченко Олександр Кузьмич – д-р техн. наук, ст. наук. співроб. ІПМ НАН України
Radchenko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher IPMS NAS of Ukraine
E-mail: arradch@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2802-0874>

Гогаєв Казбек Олександрович – д-р техн. наук, проф. ІПМ НАН України, чл.-кор. НАН України
Gogaev Kazbek – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Head of Department IPMS
E-mail: gogaevukraine@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-1759>

Аскеров Мукафат Гейбат огли. – канд. техн. наук, ст. наук. співроб. ІПМ НАН України
Askerov Mukafat, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, IPMS NAS of Ukraine
E-mail: mukafat_ask@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6611-2732>

Воропаєв Віталій Семенович – канд. техн. наук, пров. наук. співр. ІПМ НАН України
Voropaiev Vitalii – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher IPMS
E-mail: vyvuma@ukr.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-5957>

Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України
(ІПМ ім. І. М. Францевича НАНУ), м. Київ
Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Стаття надійшла до редакції 10.09.23 р.