

### Розділ 3 БЕЗПЕРЕРВНІ ПРОЦЕСИ В ПОРОШКОВІЙ МЕТАЛУРГІЇ

Строго говорячи, термін «безперервні процеси» застосуємо тільки для опису процесів, що відбуваються без перерв невиразно довго. Однак всі процеси перериваються через ті або інші проміжки часу. Тут цей термін використовується для опису процесів виробництва виробів або напівфабрикатів, у яких розміри в одному вимірі значно більше, ніж у двох інших. Такі вироби звичайно роблять за допомогою прокатки або видавлювання (екструзії).

Термін «пряма прокатка» або «пряма екструзія» у нашій книзі застосовується до відповідних процесів, коли металеві порошки надходять в установку безпосередньо, без попереднього ущільнення або спікання.

Ідея виробництва «протяжних» форм (прутки, листи, дріт і ін.) методами порошкової металургії не нова. Прокатку металевих порошків застосовують із 1902 р., а видавлювання для виробництва нитей розжарення електроламп - з 1900 р. Цим питанням присвячено багато різних патентів. Однак тільки тепер стало можливим промислове виробництво виробів «протяжних» форм із металевих порошків. У зв'язку із цим наші знання по цьому предметі досить незначні.

Запропонований Емлі й Дейбелем простий метод виробництва безперервної порошкової смуги складається в періодичному пресуванні й пересуванні в напрямку, перпендикулярному прикладеному тиску порошку на стрічці або в жолобі. Схематично цей метод показаний на рис. 3.1. Порошок з бункера надходить у двосторонній жолоб (канал), що періодично просувається в одному напрямку під пуансоном, що пресує, з горизонтальною ділянкою нижньої поверхні, що переходить у похилий. Залежно від профілю цієї поверхні, руху пуансона й тиску можна одержувати будь-який ступінь обтиснення. Кут нахилу пуансона не істотний, і неважко робити смуги постійної щільності із зовсім гладкою верхньою поверхнею.

Метод має ряд достоїнств:

1) Можна одержувати вироби значної товщини. Якщо прийняти, що сили пресування тут подібні виникаючої при пресуванні в прес-формах, тобто всі підстави очікувати, що цим методом можна готувати вироби з товщиною принаймні рівній ширині без занадто великої різниці в щільності верхньої й нижньої поверхонь (передбачається, звичайно, змащення стінок каналу або порошку).

2) Швидкість пресування, очевидно, обмежується тільки швидкістю переміщення пуансона й подачі порошку.

3) Можливе виробництво різних по перетині виробів.

4) Ширина смуги лімітується тільки силою преса. Практично це означає, що смугу шириною 600 мм можна виготовити з такими ж або меншими капітальними вкладеннями, як і при звичайній прокатці.

5) Метод застосуємо для виробництва виробів багат шарових або в оболонках.

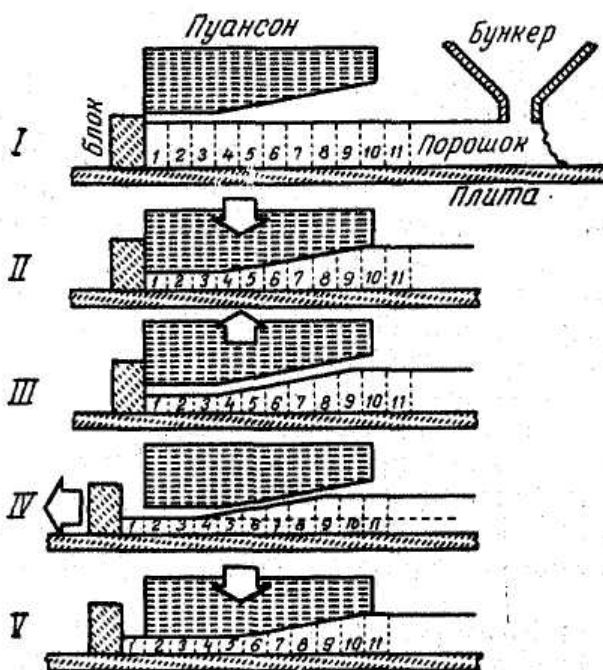


Рис. 3.1. Послідовність операцій при безперервному пресуванні по методу Емлі й Дейбеля. I - вихідне положення; II - пресування; III- підйом; IV- переміщення; V - пресування.

Автори не вказали промислових методів спікання виробів, отриманих цим способом. Приміщення напрямного жолоба усередину печі, мабуть, небажано, і, отже, холоднопресований виріб повинний бути виїнятим з жолоба до спікання. Це створює труднощі, але не нездійсненно. Як промисловий метод він дуже цікавий і заслуговує ретельного вивчення. У більше пізній роботі автори відзначили високі магнітні властивості смуг сплаву 79% Ni - 4% Mo - 17% Fe, отриманого розглянутим методом.

Засипання порошку на стрічку, що рухається, і наступне спікання без тиску використовуються протягом багатьох років у виробництві підшипникових матеріалів на основі сталі. Наприклад, в одному патенті описане безперервне засипання порошку свинцюватої бронзи на сталевий листи і наступне спікання. Листи потім прокочують і знову спікають.

Прокатка порошку на стрічці, що рухається, цілком можлива. У було запропоновано використовувати цей метод для виробництва листових матеріалів. Однак залишається проблема знімання тендітної холоднопресованої листової заготівлі з несучої смуги; більше цікаві методи готування листів без використання несучої підкладки.

Можна, звичайно, застосувати із цією метою метод Емлі й Дейбеля . Використання двох конфронтуючих пуансонів і рух спресованих заготівель вертикально долілиць дозволить звільнитися від несучих підкладок або жолобів. Запропоновано, наприклад, щоб два конфронтуючі пуансони А, А

переміщалися горизонтально уздовж плити В, а порошок металу засипався з розташованого вище бункера в V-образну порожнину (рис. 3.2, а). Нехай у положенні стиску 1 весь порошок нижче рівня 3 перетворюється в міцністю брикет володіє, що деякої механічною, у той час як вище цього рівня він залишається у вигляді порошку. При відводі пуансонів у положення 2 брикет зсковзує по їхній поверхні в положення, показане на рис. 3.2, а пунктиром; потім пуансони вертаються, спресовуючи свіжу порцію порошку. Це справедливо, якщо порошок не попадає в порожнину 3, що практично запобігти важко.

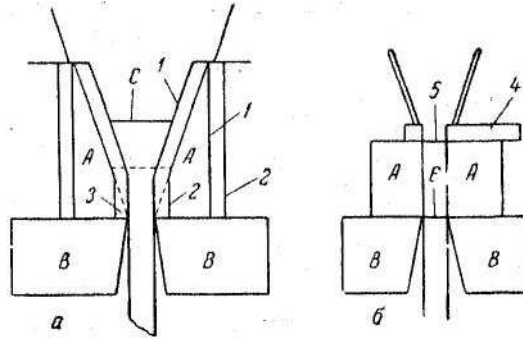


Рис. 3.2. Схема прес-форми для періодичного безперервного пресування

Змащення стінок також являє собою складне завдання; важко також запобігти влученню порошку між ковзними поверхнями.

Установку можна спростити, якщо засипати порошок у порожнину прес-форми окремими порціями (рис. 3.2, б). У цьому випадку потрібні прямі пуансони А, А; кількість порошку, що засипається, повинне контролюватися зворотно-поступальним рухом черевиків 4. В циклі пресування черевики переривають потік порошку, після чого пуансони відходять назад і дозволяють брикету (смузі) опуститися з рівня 5 точно до рівня 6. Потім весь процес повторюється. Безсумнівно, однак, що в смузі з'являться ослаблені місця, викликані недосконалістю з'єднання послідовних її частин на рівні 6. Як тут, так і в попередньому прикладі важко опускати смугу без її поломки. Перевага таких пропозицій у тім, що можна робити смуги й деталі будь-якої товщини й різноманітної форми. Проте, практичні труднощі тут настільки великі, що більшість дослідників дотепер приділяють основну увагу прокатці.

### 3.1 Прокатка

#### Процес прокатки

У певних умовах можна пропускати порошок металу між двома валками й одержувати сиру смугу з міцністю, достатньої для переносу в піч спікання.

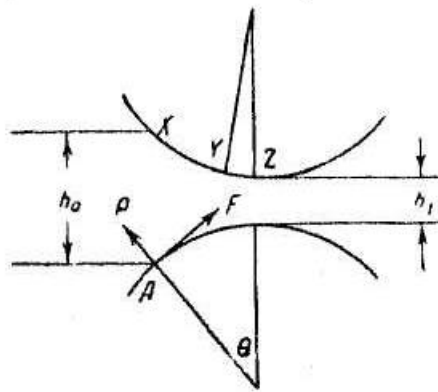


Рис. 3.3. Розподіл сил при прокатці.

При підходящій конструкції бункерів і живильників можливо так розташовувати валки, щоб смуга виходила з них горизонтально, вертикально долілиць або під деяким кутом.

Щоб краще зрозуміти процеси, що відбуваються при прокатці порошків, варто розглянути деякі положення прокатки компактних (суцільних) металів. Розглянемо рис. 3.3, на якій показана прокатка горизонтальної смуги компактного матеріалу від початкової товщини  $h_0$  до кінцевої  $h_1$  між двома валками радіусом  $R$ . На вході  $A$  радіально діє сила  $P$  - результуючого тиску між валками й смугою - і тангенціальна сила тертя  $F$ . Горизонтальні складові цих сил відповідно  $P \sin \theta$  і  $F \cos \theta$ , де  $\theta$  - кут контакту. Отже, штовхає смугу у валки горизонтальна сила  $F \cos \theta - P \sin \theta$ . Вхід смуги у валки неможливий, якщо ця результуюча дорівнює 0, тобто коли  $F \cos \theta - P \sin \theta$  або  $F/P = \tan \theta$ . Але  $F/P = \mu = \tan f$ , де  $f$  - кут тертя між смугою й валками. Із цього треба, що смуга не зможе ввійти у валки, коли контактний кут  $\theta >$  кута тертя (кута захоплення) (звичайно, за умови, що прокочується матеріал, що, не проштовхують у валки).

Якщо припустити, що вертикальний плоский перетин смуги перед прокаткою залишається плоским протягом прокатки, те, мабуть, є тільки одна крапка на дуговій поверхні контакту між валками й матеріалом, у якій окружна швидкість валків дорівнює швидкості руху смуги: це нейтральна або крапка нульового ковзання  $Y$  на рис. 3.3. Між цією крапкою й площиною входу матеріалу у валки  $X$  поверхня валків рухається швидше поверхні смуги й тертя між ними штовхає смугу у валки. Між нейтральною крапкою й крапкою  $Z$  поверхня смуги рухається швидше поверхні валка й тертя між ними перешкоджає проходженню смуги через валки. Сили тертя залежать від природи металу, що прокочується, природи металу поверхні валків, поверхневої обробки валків і наявності змащення. Всі ці фактори разом зі швидкістю валків і ступенем обтиснення визначають точне положення нейтральної крапки.

Тиск між валками й матеріалом досягає максимуму між крапками входу й виходу. На рис. 3.4 показаний розподіл тиску по довжині валка при холодному обтисненні алюмінієвого листа від 0,2 до 0,12 мм. Потрібно

відзначити асиметрію в розподілі тиску. Максимум фактично відповідає нейтральній крапці. Виникаючі тиски високі, досягають  $70 \text{ кг/мм}^2$  навіть для таких порівняно м'яких металів, як алюміній. Сумарний тиск на валки тим менше, чим менше область контакту між валками й матеріалом. Це тиск, таким чином, можна знизити, використовуючи валки меншого діаметра. У промисловій практиці, отже, повинна бути тенденція до застосування валків можливо меншого діаметра. Однак такі тонкі валки потрібно підтримувати опорними валками, щоб зменшити величину пружного прогину. У промисловій практиці холодної прокатки тонких перетинів використовують групи від 4 до 20 валків. Такі багатовалкові стани були описані в роботі Ларке. Останній відзначив, що прагнення використовувати валки всі менших і менших діаметрів досягло критичного значення на одному з американських

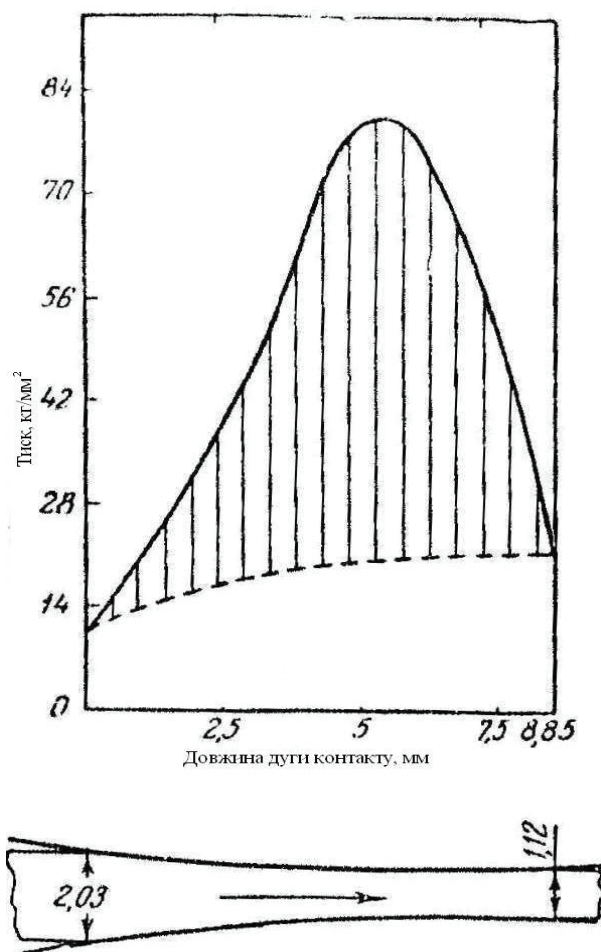


Рис. 3.4. Розподіл тиску по поверхні валка діаметром 178мм при прокатці алюмінію

станів, де валки були завтовшки «не більше в'язальних спиць». Величини навантажень при прокатці можна зменшити, використовуючи «розтягнуті» листи, але переваги стають помітними лише при значних напругах, що розтягують.

Для читача, незнайомого із промисловою прокаткою, необхідно відзначити, що сучасні заводи є часто дуже більшими й прокатка в них ведеться на досить високих швидкостях. Крім того, виробництво тонких аркушів може зажадати значного числа проходів із застосуванням проміжних відпалів, що сильно здорожує виробництво. Гарною ілюстрацією до цих зауважень є наступна витримка зі згаданої книги Ларке. Заготівлі алюмінію розміром  $2400 \times 1200 \times 230$  мм спочатку нагрівають і прокочують на двовалковому реверсивному стані. За п'ять проходів на цьому стані товщина зразка зменшується до 64 мм; максимальна швидкість прокатки може досягати 135 м/хв. Матеріал потім обжимають у двовалковому гарячому стані до товщини 9—19 мм. Смуга, що має тепер 57 м у довжину й 2,1 м завширшки, попадає потім у валки двоклетевого чотиривалкового стану тандем для остаточної гарячої обробки; за один прохід через цей стан перетин зменшується до 2,5 мм. Така смуга довжиною 180 м залишає останні валки зі швидкістю 240 м/хв. Отримані заготівлі можна потім прокочувати на холодну на триклетевому чотиривалковому стані тандем. На цьому стані з довжиною валків 1,68 м смугу можна зменшити в перетині за один прохід на 90%. Після цієї обробки смуга довжиною до 1200 м виходить із валків зі швидкістю 600 м/хв.

Таким чином, листова прокатка компактного металу характеризується наступними особливостями:

- 1) вихідні компактні матеріали мають більш-менш постійний обсяг і щільність, міцність на стиск і розтягання (при відсутності наклепу);
- 2) матеріал між валками повинен витримувати більші напруги;
- 3) сили тертя великі, і передбачається їхня достатня сталість по всій поверхні прокатки;
- 4) для даних умов існує певний максимальний кут контакту, і при більшому куті валки вже не зможуть втягти матеріал;
- 5) при прокатці виникають дуже високі напруги;
- 6) існує прагнення застосовувати валки можливо меншого діаметра, підтримувані, якщо необхідно, опорними валками;
- 7) для одержання тонкого листа необхідно велика кількість проходів через різні валки;
- 8) швидкість прокатки може доходити до 600 м/хв. Цікаво досліджувати, чим відрізняється прокатка порошків від прокатки суцільних металів. Наступні відмінності зовсім очевидні:

1) Вихідний матеріал - порошок - не витримує найменших напруг розтягання. Його, отже, не можна зтягувати у валки; він повинен текти під дією сили ваги або під тиском. Порошки витримують така ж напруга стиску, як і суцільні метали.

2) При проході через валки міняється обсяг порошків, їхня щільність і характеристики розтягання й стиску;

3)Прокатані заготівлі відрізняються малою міцністю й, отже, до них не можна додавати більших напруг. Зокрема, вони не можуть протистояти скільки-небудь помітним напругам, що розтягують.

4)Навряд чи можна прийняти сили тертя постійними, тому що: а) перед тим як порошок ущільниться до ступеня, коли він може витримувати напруги, часточки вільно рухаються разом з поверхнею валків і б) у спресованому стані обсяг і щільність порошку змінюються при проході між валками. Як було зазначено, ми не знаємо точно, як змінюються сили тертя між пористими й компактними матеріалами залежно від щільності й застосовуваного тиску.

Інші відмінності не так очевидні й стають ясні лише при експериментальному дослідженні процесу прокатки металевих порошоків.

Еванс і Сміт порівнювали кути захоплення для різних порошоків міді з кутом захоплення для компактної міді. При прокаті відпаленої міді між гладкими сталевими валками ( $R$  — 101,5 мм,  $h_0$  — 5,28 мм і  $h_1$  — 2,4 мм) максимальний кут захоплення —  $9^\circ 45'$ . Максимальний кут захоплення  $\alpha$  (кут спресування) порошку можна визначити, зупинивши валки й видувши неспресований порошок. Для мідних порошоків розміром  $<0,15$  мм для кута  $\alpha$  були отримані наступні значення:  $6^\circ$  для електролітичних порошоків,  $3,5^\circ$  для розпилених водою (у цих порошоків частки неправильної форми),  $1,5^\circ$  для порошоків, отриманих розпиленням міді повітрям (із частками правильної сферичної форми). Як видно із цих даних, кути захоплення порошоків менше кута захоплення компактної міді. Швидше за все менший кут захоплення для порошоків виходить за рахунок ковзання часток по поверхні валків або за рахунок кочення часток усередині маси порошку. Природно, що для сферичних часток кочення ймовірніше, ніж для часток неправильної форми.

Мала величина кута захоплення визначає діаметр валків. Для утворення брикету з будь-якого порошку необхідно критичне обтиснення. Кут захоплення для порошку визначається тільки силами тертя між ним і поверхнею валків і, отже, постійний для даного сорту порошку й поверхні валків. Таким чином, максимальна товщина сформованої стрічки прямо пропорційна діаметру валків. Даний, підтверджувальний цей висновок, ні, але в роботі Незер і Цирм описали одержання аркуша товщиною приблизно 0,8 мм із порошку заліза у валках діаметром 200 мм і аркуша товщиною 9 мм у валках діаметром 900 мм. В обох випадках ступінь обтиснення була однаковою. Автори попереджають, що їхні дані дуже неточні. При куті захоплення  $6^\circ$  і ступеня обтиснення 3:1 діаметр валків повинен бути 1900 мм для смуги товщиною 5 мм. Для порошоків з меншим необхідним ступенем обтиснення й більшим кутом захоплення можна істотно зменшити діаметр валків. Припускають, що діаметр валків повинен бути в 50-100 разів більше товщини стрічки.

Становить інтерес вплив зазору між валками на товщину й щільність прокатої стрічки. При будь-якому даному порошку й положенні валків робочий зазор залежить від сил, прикладених до валянь. Для кожного стана характерно своє співвідношення між силами, що стискають валки, і зазором

між ними. Подібного роду опублікованих даних для металевих порошків ні, але є дані для прокатки порошків  $\text{NaCl}$  і  $\text{NaNO}_3$ .

Допустимо, що тиск залежить безпосередньо від величини зазору між валками. Це припущення підтверджується даними роботи при прокатці порошку нержавіючої сталі. Тут тиск валків стана оцінювалося по величині тиску в прес-формі, необхідного

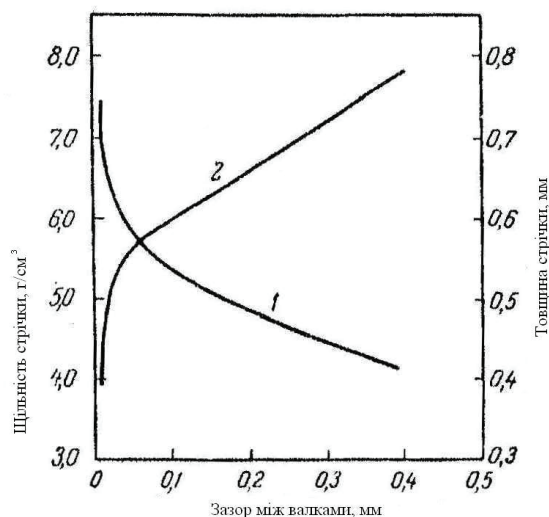


Рис. 3.5. Щільність (крива 1) і товщина (крива 2) стрічки, прокатої із залізного порошку, залежно від зазору між валками.

для одержання дисків із цього ж порошку такої ж щільності, як і прокатана стрічка. По даним Незера й Цирма, при прокатці залізного порошку щільність збільшується спочатку поступово (при зменшенні зазору), а потім, при подальшому зменшенні зазору, - різко й прагне до теоретичного, коли зазор наближається до нуля; товщина стрічки має, природно, зворотну залежність. Криві, побудовані по цих результатах, представлені на рис. 3.5.

Раніше вказувалося, що щільність брикетів у логарифмічних координатах змінюється лінійно в досить широкому інтервалі тисків. Якщо представити в логарифмічних координатах дані рис. 3.5, то виходить пряма (рис. 3.6). Для того щоб установити, чи є це загальною закономірністю, треба одержати набагато більше даних по цьому питанню з різних джерел. Необхідно врахувати два зроблених допущення: сила, діюча на валок, міняється лінійно зі зміною зазору, і величина тиску виходить порівнянням зі статичними умовами стиску в прес-формі. Останнє припущення необґрунтовано, тому що ми знаємо, що щільності, одержувані при обтисненні в прес-формах, дуже сильно залежать від відносного руху часток порошку, що виникає завдяки їхньому тертю об стінки прес-форми. При виготовленні в прес-формі досить тонких зразків рух часток відносно один одного мало, у той час як при прокатці воно грає, імовірно, значно більшу роль.



Більше того, як затверджує Бальшин, щільність брикету сильно зменшується при товщинах, менших 1 мм. У роботі не зазначена товщина брикетів, для яких визначалася щільність, але Еванс і Сміт подібні дослідження проводили на брикетах товщиною 0,7 мм і одержали не виправдано низькі щільності, набагато більше низькі, чим варто очікувати при прокатці.

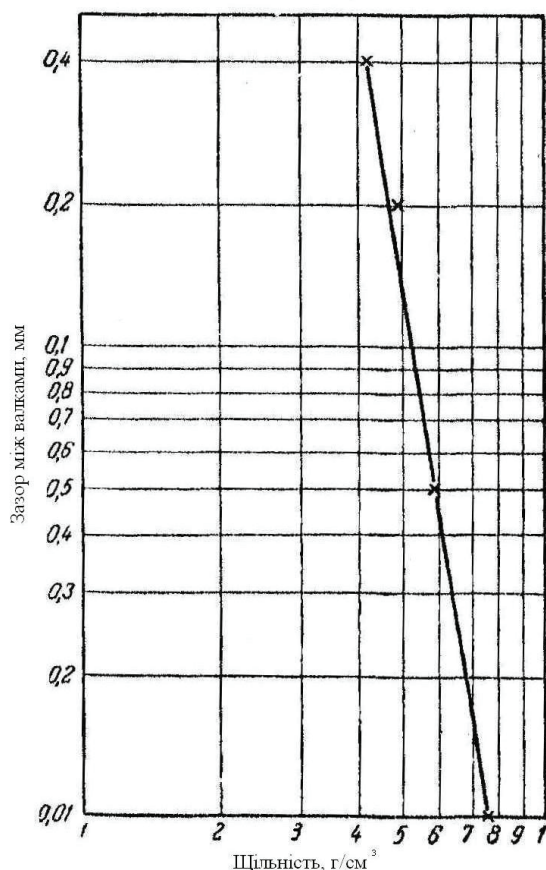


Рис. 3.6. Залежність щільності стрічки від зазору між валками при прокатці залізного порошку .

Як видно з рис. 3.4, максимальний тиск валка на дузі контакту досягається в нейтральній крапці. При прокатці порошків тиск повинне наростати значно більш рівномірно, ніж при прокатці суцільних металів, а значить максимум тиску й разом з ним нейтральна крапка повинні бути значно ближче до виходу з валків. Це, дійсно, було показано Франсеном. А. Н. Миколаїв установив, що максимальний тиск в 4-6 разів більше середнього тиску. На жаль, дотепер немає робіт, присвячених розподілу тиску по контактній дузі при прокатці порошків.

При збільшенні тиску валків до дуже високих значень із метою одержання досить тонких і досить щільних стрічок виникають двоє основних труднощів. По-перше, існує межа тисків, вище якого прогин валків і їх сплюсненні стають неприпустимими. Ця межа поки не досягнуть при прокатці

порошків, і, імовірно, пройде якийсь час, поки групові стани знайдуть застосування для операцій, де ця межа перевершується. По-друге, необхідно пам'ятати, що холоднопресовані заготівлі досить слабкі й зовсім не витримують внутрішніх напружень.

Розподіл цих напруг в листах, прокатаних з металевих порошоків, поки зовсім не досліджено. Можна все-таки припустити, що вони значні й будуть викликати розтріскування або дефекти того або іншого роду. При прокатці стрічки товщиною 0,5 мм із карбонільного нікелю у валках діаметром 19,5 див спостерігали шарувате розтріскування при щільності значно вище  $8 \text{ г/см}^3$ . Для смуги товщиною 1,5 мм максимальною досяжна щільність  $5 \text{ г/см}^3$ .

У цьому зв'язку цікаво відзначити, що при прокатці компактних металів набагато легше робити товсті сляби й листи, а для одержання тонких листів потрібне велике число проходів. При прокатці ж порошоків легше робити тонкі листи; без особливих утруднень можна за один прохід одержати стрічки тонше 0,25 мм, хоча буде потрібно одне або два спікання й наступна прокатка, щоб одержати задовільну міцність. Сутужніше всього робити товсті стрічки.

Можливість прокатки дуже тонких стрічок за один прохід є важливим економічним стимулом для більше інтенсивного використання технології прокатки металевих порошоків.

З викладеного випливають важливі практичні висновки: для даних валків і способу подачі порошку товщини вироблених стрічок лежать у досить вузькому інтервалі; для даної товщини фактично досяжна тільки одна певна щільність. Деяка зміна щільності можливо при подачі порошку у валки під тиском. Однак досягти зміни щільності, застосовуючи витягування, неможливо.

Змінюючи характеристики порошку, можна трохи змінити щільність одержуваної стрічки. При збільшенні насипної ваги порошку збільшується кількість порошку, що подається у валки, і в досить вузькому інтервалі, імовірно, варто очікувати, що щільність вихідної стрічки буде прямо пропорційна насипній вазі порошку (при постійному зазорі між валками). Це підтверджено й А. Н. Ніколаєвим. При прокатці стрічки товщиною 0,6 мм із порошку нікелю при зазорі між валками 0,25 мм і швидкості прокатки 0,75 м/хв щільність стрічки мало міняється при зміні насипної ваги порошку в межах  $0,54\text{—}1,17 \text{ г/см}^3$ , але потім вона зростає від 6,3 до  $7,5 \text{ г/см}^3$  при збільшенні насипної ваги від 1,17 до  $2,65 \text{ г/см}^3$ . Можливо, що вплив поверхні, що збільшується, і адсорбованих нею газів затемнює цей ефект при низьких насипних вагах порошку. Щільність стрічки при малих швидкостях прокатки сильно залежить навіть від невеликих змін висоти шаруючи порошку, що подається у валки. Це пояснюється, мабуть, тим, що висота зламування порошку, що живить валки, впливає на щільність стрічки, лише коли цей шар не забезпечує потрібної подачі. Якщо висота шаруючи порошку забезпечує повне живлення валків, то навряд чи її подальше збільшення може мати вплив. Однак до досягнення цієї критичної крапки можливе розтріскування стрічки через надмірну щільність (перепресування). Цілком очевидно, що прокатка з

недостатнім живленням валків найбільш вигідна, але, на жаль, дані по цьому питанню відсутні.

А. Н. Миколаєв запропонував наступну формулу:

$$\gamma_{л} = \gamma_{нв} \frac{1 + R\alpha^2}{h},$$

де  $\gamma_{л}$  — щільність стрічки;  $\gamma_{нв}$  — насипна вага;  $R$  — радіус валка;  $\alpha$  — кут захоплення;  $h$  — зазор між валками. На жаль, він не приводить експериментальна дана, підтверджувальна її справедливості. Як треба із цієї формули, чим більше знижується насипна вага порошку, тим більше треба зменшити зазор між валками для одержання щільної стрічки.

Виходячи з викладених вище міркувань, кращим для прокатки буде порошок, брикет якого має гарну міцність. Це повинне проявлятися в більших силах тертя й малому ковзанні по валяннях і забезпечується неправильною формою часток (але не настільки, щоб порошок не міг вільно текти у валки під дією власної ваги). Все-таки порошки з поганою плинністю можна використовувати, застосовуючи примусову їхню подачу

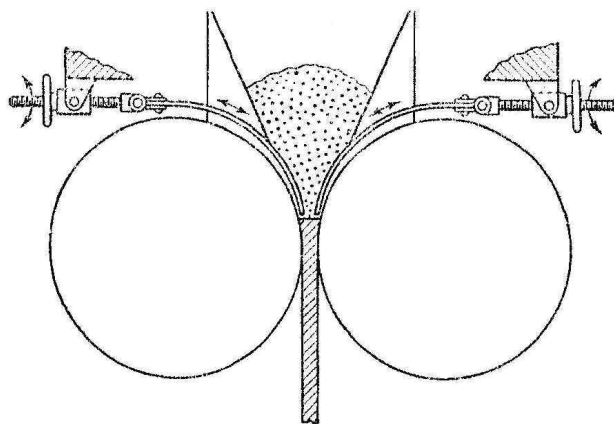
Максимальні сили тертя виникають на хімічно чистих поверхнях валків. Однак практично прийнято змазувати поверхня валків водою, парафіном, етиленгліколем і їм подібними матеріалами, щоб запобігти приварюванню порошку до хиткого. Штучне огрубіння поверхні валків спеціальною обробкою збільшує сили тертя, але подібна обробка нестійка, і в процесі роботи поверхня валків майже згладжується. Більше висока щільність стрічки виходить при змочуванні валків водою. Очевидно, варто розрізняти вимоги до поверхні валків з погляду захоплення порошку й з погляду самого процесу прокатки. При захопленні порошку валками стрічка утвориться тільки при її ковзанні по поверхні валків, а це забезпечується змащенням. Це зовсім таке ж явище, як і при пресуванні виробів у прес-формі, де застосування змащення завжди корисно.

У порівнянні із плинністю, формою часток і міцністю в сирому стані ситовий склад порошку впливає на властивості сирої стрічки (хоча не виключена можливість його впливу на властивості спеченого матеріалу). Виключенням є виробництво досить тонких стрічок; тут розмір часток порошку повинен бути малим у порівнянні з товщиною стрічки. Однак і по цьому питанню відсутні експериментальні дані.

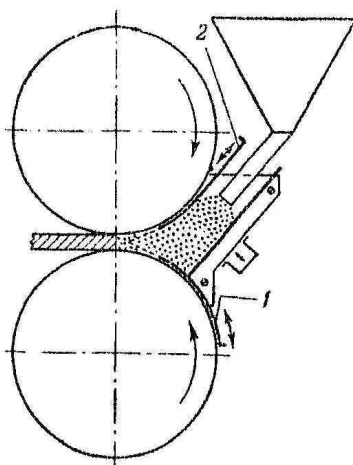
При прокатці порошоків виникають дві практично важливі проблеми, пов'язані із плином і розподілом порошку у валках і з поведінням країв стрічки. Кількість порошку, захопленого валками за один раз, сильно залежить від тертя між порошком і валками й взаємним тертям часток порошку. Сили тертя, імовірно, змінюються не тільки в часі, але й від одного валка до іншому й уздовж поверхні валків. Необхідно зменшувати, наскільки можливо, вплив цих сил тертя. Франсен запропонував гарний метод, що дозволяє здійснити це. На рис. 3.7 показана схема живлення стана; частина

поверхні валків закривається напрямними стрічками, що становлять продовження живильного бункера. Порошок попадає на поверхню валків безпосередньо в головну зону захоплення. Швидкість подачі порошку в цю зону залежить насамперед від висоти шаруючи порошку, його плинності й від тертя між порошком і поверхнею бункера; останнє легше підтримувати постійним, чим тертя між поверхнями валків і порошком. Від конструкції потрібно точно фіксоване положення напрямних стрічок. В іншому патенті Франсен описав схему, показану на рис. 3.8. Тут нижній валок закритий кришкою 1, що може рухатися уздовж поверхні валка, а подача порошку змінюється регулюванням похилої плити 2.

Досить бажано контролювати розподіл порошку по поверхні валка. Із цією метою запропоновані бункери різноманітних конструкцій. Регулюючий затвор описаний у патенті ; на рис. 3.9 показане використання декількох пригнаних друг до друга паралельних пластинок (а), кожна з яких (б) регулюється самостійно, забезпечуючи необхідний контур живильника.

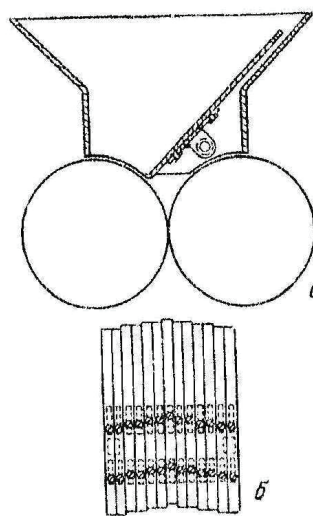


Мал.7. Схема подачі у валки за Франсеном



Мал.8. Схема подачі порошку у валки за Франсеном.

1 - кришка, 2 - плита.



Мал.9. Регульована засувка для подачі порошку у валки.

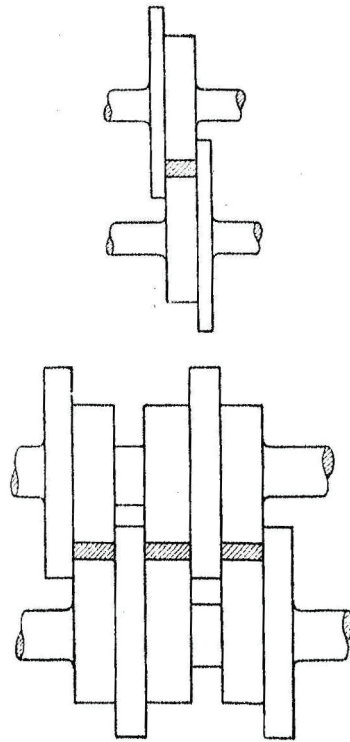


Рис. 3.10. Схема застосування валків із фланцями.

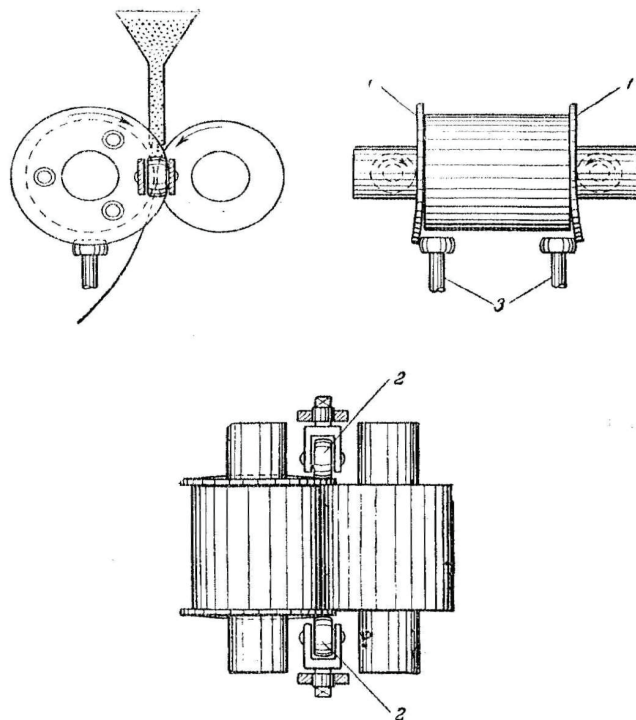


Рис. 3.11. Валки з дисками на кінцях. 1 — диски; 2 — притискні ролики; 3 — віджимні ролики.

Запропоновано подавати порошок в «киплячому шарі». Зміна кількості подаваного порошку уздовж поверхні валка викликає зміна товщини й

щільності стрічки; крім того, у таких випадках підсилюється нерівномірність внутрішніх напружень. Крім цього, тут можливе жолоблення стрічки або хвилеподібний її вигин по виходу зі стана. Це утрудняє намотування стрічки на барабан або її повторну прокатку, тому що вона занадто тендітна, щоб сприймати зусилля при проводці стрічки. Крім того, невеликі коливання щільності можуть викликати жолоблення після першого або другого спікання й повторної прокатки.

Передбачається, що при прокатці можна уникнути цих труднощів, якщо на стані встановлене встаткування, що збільшує тиск із однієї сторони валків при одночасному його зменшенні з іншої. Імовірно, цей процес можна автоматизувати. Дотепний варіант, заснований на цьому принципі, описаний у радянському авторському посвідченні, де періодична зміна тиску з обох сторін валків використовувалася для виробництва стрічки синусоїдальної форми.

Зміна тиску на кінцях валків або видалення порошку із цих областей — питання, якому також приділяється багато уваги. В одному з патентів пропонується використовувати валки із фланцями, коли фланці одного валка входять в інший валок і обертаються разом з ними (рис. 3.10). У кожній парі валків цієї конструкції можна одержувати одночасно кілька стрічок або смуг. На рис. 3.11 представлена інша конструкція; диски 1 притискаються до кінців валків притискними роликками 2 у крапках дійсної прокатки, але віджимаються роликками 3 з іншого боку, щоб забезпечити вільний вихід стрічки з дисків. Диски втримуються трьома штифтами, які дозволяють їм рухатися уздовж осі й змушують обертатися разом з валками.

### Спікання прокатаного порошку

Найпростіше подавати прокатану стрічку відразу з валків у піч для спікання. Для металевих порошоків у печі повинні бути відбудовна або захисна атмосфера, для неметалічних - повітря. Вакуумні печі для безперервного спікання мають багато переваг, але, на жаль, поки ще позначок підходящих конструкцій.

Якщо довжина таких печей не перевищує розумні межі, то або швидкість прокатки буде повільної, або спікання — неповним; повне закриття пор або навіть їх сфероїдизація при такому спіканні недосяжні. Важко очікувати повного закриття пор при будь-якому іншому процесі, крім тривалого спікання (за винятком дуже тонкого або дуже активного порошку). Таким чином, принаймні одна повторна прокатка й наступне спікання неминучі. У зв'язку із цим нема рації проводити перше спікання довше, ніж це необхідно для досягнення міцності стрічки, що допускає повторну прокатку. Для порошку заліза при 1200° достатня 10-секундна витримка. За такий короткий час фізична міцність зростає дуже швидко; деяка її стабільність починається лише при витримках більше 30 сек. На практиці витримки роблять більше 10 сек, щоб зменшити труднощі при повторній прокатці, обумовлені змінами температури або швидкості стрічки. Щоб уникнути цих труднощів при

повторній прокатці, необхідно дуже точно контролювати не тільки час спікання, але й швидкість прокатки. Тому що для заліза досягається більше висока міцність при температурах спікання трохи нижче  $\alpha$ — $\gamma$ -перетворення, чим при 1200—1300°, дуже цікаво одержати відомості про безперервне спікання саме при цих низьких температурах. Необхідно досліджувати, чи перекриє зменшення енергетичних і експлуатаційних витрат на спікання в низькотемпературних печах втрати від меншої швидкості нагрівання в них стрічки.

Процес спікання означає більше, ніж просто підвищення щільності. При спіканні стрічок можна чекати щонайменше утворення й виділення газів, а іноді й утворення сплавів. При спіканні міді, наприклад, виділяються не тільки гази, захоплені при прокатці, але й волога вихідного порошку й пари води, що виникають за рахунок відновлення окису міді воднем. Швидкість нагрівання не повинна бути настільки високої, щоб гази, що виділяються, руйнували зразок (у цьому також додатковий зміст збереження деякої пористості стрічки).

Для заліза мають значення, крім цього, реакції науглеродження й знеуглеродження. Деякі із цих реакцій дуже швидкі. Чи відбувається в основному науглеродження за рахунок твердого вуглецю або за рахунок вуглецю, що надходить із газової фази, поки не встановлено.

Утворення сплавів у процесі спікання пов'язане з особливими труднощами. Наприклад, при спіканні мідно-цинкових сумішей швидкість нагрівання повинна виключати втрату цинку шляхом випару. Неповне спікання буває корисним у спеціальних випадках. Дуже тверді або тендітні сплави, наприклад, досить важко прокочувати у вигляді сплавів, але легко - у вигляді суміші порошоків. Таким шляхом можна готувати аркуші з дуже тендітних (алніко, пермендур) або дуже твердих сплавів (наприклад, WC-3). Було запропоновано використовувати цей спосіб для готування стрічки для бритов.

При горизонтальному розташуванні стрічки необхідно підтримувати її по довжині. Це досягається застосуванням стрічкових або ланцюгових конвеєрів або печей з роликівим подом. Петлеподібне розташування стрічки в печі може виявитися не вигідним, з огляду на практичні труднощі споруджень і експлуатації таких конструкцій.

У багатьох випадках можна змотати стрічку в рулон і спекати її в такому виді. При невисокій швидкості прокатки, рівномірній підтримці стрічки по всій довжині й виключенні в ній напруг згортання стрічки в рулон не представляє складної проблеми. Однак спікання згорнутої сирої стрічки є нелегким завданням. Таке спікання вигідно, якщо кожний рулон важить кілька десятків кілограмів. Але якщо швидкість нагрівання не занадто висока, те власна вага рулону, безсумнівно, викличе деформацію стрічки навіть при наявності опор. Крім того, не зовсім просто нагріти такий рулон досить швидко. До того ж у більшості випадків при спіканні виникає усадка стрічки по довжині й окремі витки рулону можуть «склеюватися», якщо їх не прокласти прокладкою, що не приварюється.

Якщо стрічку спекати безупинно слідом за прокаткою й потім знову прокатати на холод, то досягається таким шляхом міцність дозволить згорнути стрічку в рулон і остаточно спекти її в такому виді.

Франсен запропонував цей процес у якості промислового, уважаючи найбільш підходящими для нього печі зі штовхальником. Змащення, імовірно, викликає утруднення при повторній прокатці, якщо пористість стрічки перевищує 10%.

Гаряча прокатка порошків, як і гаряча прокатка компактних металів, або гаряче пресування в прес-формі допускає високу швидкість деформації. У цьому випадку можна застосовувати або короткі печі, або короткий час для спікання. Гарячу прокатку можна застосовувати як безпосередньо для порошку, так і на наступних стадіях прокатки або ж у тім і іншому випадку. У кожному разі виникає проблема швидкої подачі тепла. Було запропоновано нагрівати сам порошок. Однак більші його обсяги важко рівномірно й швидко нагріти й, крім того, температура нагрівання строго обмежена через можливість спікання порошку. Нарешті, порошок повинен перебувати в захисній атмосфері аж до входу у валки. Проте, цей метод цікавий хоча б для просушки порошку, якщо не для деякого його розкислення. При прокатці порошку електролітичної міді, попередньо нагрітого до 300°, виходить стрічка на 25% товщі й на 3% щільніше, ніж без нагрівання. Було запропоновано також подавати тепло прямо у валки, але таким шляхом вдавалося вводити як у холодний, так і в підігрітий порошок дуже обмежена кількість тепла. Найбільш практичним методом є, очевидно, прокатка порошку на холод, нагрівши до температури спікання й потім знову прокатка гарячої заготівлі. Гаряча стрічка повинна проходити через холодні валки з високою швидкістю, щоб уникнути охолодження її валками; ця швидкість повинна значно перевищувати швидкість при звичайній прокатці порошку. Неповністю спечену стрічку треба згортати в рулон і потім повторно нагрівати або ж безупинно нагрівати перед остаточною прокаткою.

Інша можливість - гаряча прокатка стрічки безпосередньо в печі спікання зі швидкістю, не більшої, ніж швидкість її виходу з валків. Для виробництва мідної лепти у великих масштабах був запропонований «проміжний метод». Стрічку спочатку нагрівають у газовій печі з роликівим подом. Швидкість валків синхронізована зі швидкістю руху стрічки в печі. Використовується звичайний двовалковий стан, розташований за піччю, нагріта стрічка перебуває у відновній атмосфері аж до входу у валки. Відразу ж після виходу з валків стрічка попадає в камеру, де прохолоджується газом або водою, а потім намотується на барабан. Зовнішню поверхню валків нагрівають, зсередини валки прохолоджуються.

Запропоновано прокатку сталевий стрічки й у самій печі; практично дуже важка, як здається, гаряча прокатка цинку й цинкосвинцевих сплавів описана в роботі .



### Властивості стрічки, прокатої з порошку

Для виготовлення стрічки з порошку нікелю краща суміш карбонільних порошоків 50:50 з насипною вагою 2 і  $0,76 \text{ г/см}^3$  відповідно. При цьому використовується зграї з діаметром валків 19,5 див і довжиною 30 див. При швидкості прокатки 0,75 м/хв, висоті шаруючи порошку 5 див і зазорі між валками 2,5 мм отримана стрічка товщиною 0,8 мм. Потім стрічка проходить безпосередньо через піч спікання з довжиною гарячої зони 45 див і температурою  $1150^\circ$ . Застосовувалася атмосфера диссоційованого аміаку, насиченого парами води (крапка роси  $15^\circ$ ), щоб забезпечити потрібне вигорання вуглецю. Вихідну з печі стрічку намотують на барабан діаметром 75 див і знову спекають у печі зі швидкістю просування 0,3 м/хв. Вага рулонів у цьому випадку становила приблизно 90 кг. Спечена стрічка при холодній прокатці швидко наклепувалася й обтиснення вище 17% одержати не вдавалося. Після відпалу лепту можна прокатати насухо від товщини 0,75 до 0,4 мм із одним проміжним відпалом і потім можна обробляти її як звичайно, прокочуючи на змазуються валках, що. Після обтиснення до 70-75% щільність смуги стає рівної щільності компактного нікелю. Спечену стрічку обробляли в такий спосіб:

1) холодна прокатка без змащення від товщини 0,8 до 0,75 мм;

2) відпал в атмосфері диссоційованого аміаку при  $1050^\circ\text{C}$ , швидкість руху стрічки 0,3 м/хв через зону довжиною 1,2 м;

3) холодна прокатка без змащення до товщини 0,4 мм;

4) відпал при  $800^\circ$ , швидкість руху стрічки 1,2 м/хв;

5) холодна прокатка із застосуванням змащення до товщини 0,2 мм;

6) відпал при  $700^\circ$ , швидкість руху стрічки 1,2 м/хв;

7) холодна прокатка зі змащенням до товщини 0,12 мм;

8) відпал при  $700^\circ$ , швидкість руху стрічки 1,8 м/хв.

Міцнісні властивості й проба по Еріксену відпаленого матеріалу такі ж, як у компактної стрічки. Спечена стрічка мало піддана наклепу завдяки високій хімічній чистоті. Середня чистота порошкової стрічки 99,95% (компактної - 99,6%). Поверхня порошкової стрічки значно краще компактної завдяки не тільки відсутності залишкових окислів, але й дефектів, звичайно властивому литому матеріалу.

Порошок нержавіючої сталі типу 302-У прокочували в аркуш на валках  $15 \times 15$  див і потім спекали в пічах при температурі  $1200^\circ$  протягом 1 година в атмосфері водню. Після п'ятикратної прокатки й відпалу межа міцності стрічки становив 57—63  $\text{кг/мм}^2$  у напрямку прокатки й трохи менше в поперечному напрямку. Подовження збільшувалося від 1 до 30% при

збільшенні числа проходів через валки від 1 до 5 з наступним відпалом. Корозійна стійкість такої стрічки приблизно така ж, як у компактної.

Описано виробництво стрічки з мідного порошку, отриманого осадженням воднем з водяного розчину в процесі «Хеміталс» (Chemitals). Насипна вага порошку  $2,6 \text{ г/см}^3$ ; всі частки порошку мають розмір менше  $0,15 \text{ мм}$ ,  $70\%$  — менш  $0,045 \text{ мм}$ . Порошок прокочували у валках діаметром  $28 \text{ см}$ , одержуючи стрічку шириною  $15 \text{ см}$  і товщиною  $1,3 \text{ мм}$  із відносною щільністю  $70\text{—}80\%$ . Стрічку піддавали безперервному спіканню при  $980\text{—}1040^\circ$  при швидкості просування  $1,8 \text{ м/хв}$  (атмосфера не зазначена). Краща газова роликівна піч із додатковим напрямним пристроєм для подачі стрічки у звичайний двовалковий стан з валками, що обігріваються зовні й охолоджуваними зсередини.

По виходу з печі стрічку прокочували на двовалковому стані с. валками, що нагріваються зовні й охолоджуваними зсередини. Потім стрічку прохолоджували газом або водою. Після такої обробки відносна щільність стрічки зростає до  $96\text{—}100\%$ . Потім цю стрічку відпалювали при  $540^\circ$  протягом  $10 \text{ хв}$  і прокочували до товщини  $0,25 \text{ мм}$  за чотири проходи на звичайному чотиривалковому стані. Після відпалу стрічка мала межу міцності при розтяганні  $28 \text{ кг/мм}^2$  і подовження  $30\%$ .

На підставі цих експериментів були дані рекомендації для побудови заводу продуктивністю  $50 \text{ т}$  стрічки в день. На цьому заводі повинен бути встановлений комплект  $150\text{-сантиметрових}$  валків з робочою довжиною  $45 \text{ см}$ , пекти для спікання з гарячою зоною довжиною  $12 \text{ м}$  і двовалковий гарячий стан  $40 \times 60 \text{ см}$ . Крім того, було запропоновано встановити дві газові печі з роликівним подом для відпалу рулонів (стрічки) і двовалковий стан холодної прокатки  $52 \times 56 \text{ см}$ , об'єднаний з натяжним барабаном і ножицями.

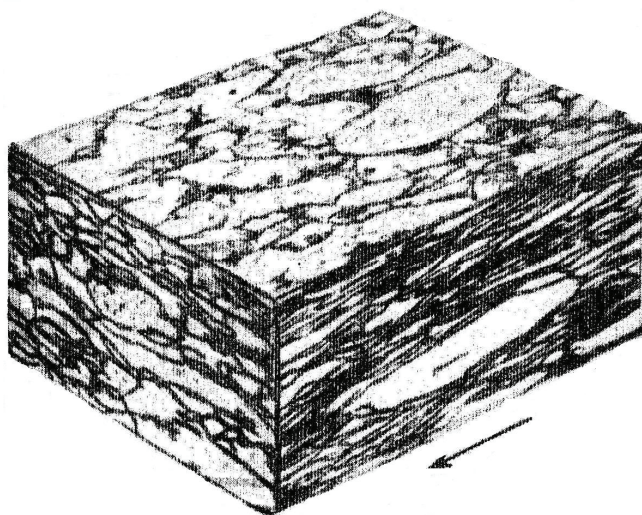


Рис. 3.12. Деформація часток в «сирій» стрічці з порошку міді. Модель зроблена по мікрофотографіях, знятим по трьох основних напрямках.  $\times 250$ . Стрілка показує напрямок прокатки.

Становить великий інтерес питання про те, чи є анізотропія фізичних властивостей прокатаних стрічок з порошків. Подібні дослідження проведені для стрічки, прокатої з мідного порошку. При дослідженні мікрофотографій сирової стрічки, як і слід було сподіватися, виявлена значна деформація часток порошку в напрямку прокатки. (Це добре ілюструє рис. 3.12, на якій представлені мікрофотографії по трьох головних напрямках.) Проте, характеристики міцності й пластичності стрічки не міняються помітним образом від напрямку, і при рентгеноструктурному дослідженні також не поміченої зміни орієнтування для прокатаного й потім спеченого матеріалу. Але якщо цю стрічку піддати сильній прокатці на холоді й потім відпалювати, то спостерігається помітна зміна орієнтування, не перевищуюче, однак, подібної зміни для компактного металу, обробленого в такий же спосіб.

Електроопір стрічки в подовжньому напрямку на 60% вище, ніж у поперечному, і, як встановлено, цей ефект не пов'язаний зі зміною щільності. Можна сказати, що залежність електроопору від напрямку визначається характером деформації часток при прокатці. Передбачається, що відносний рух часток у напрямку прокатки прагне зруйнувати поверхневі плівки окислів у подовжньому напрямку в більшій мірі, чим у поперечному, і що це й обумовлює меншу величину електроопору в поперечному напрямку.

### Максимальна швидкість прокатки порошків

Прокатка порошків і прокатка компактних металів мають і загальні й відмітні риси. Головне розходження полягає у швидкості прокатки. Швидкість прокатки суцільних металів може досягати 600 м/хв; для порошків вона не перевищує 3 м/хв. Такі низькі швидкості сильно впливають на економічність процесу. Економічність прокатки порошків заснована на можливості меншого числа проходів і проміжних відпалів, чим при прокатці литого металу. Це особливо справедливо для легко наклепуваних металів. Однак можливість зниження за цей рахунок кількості одиниць устаткування (і витрат) представляється малоімовірним, якщо врахувати, що швидкості прокатки в 100 разів менше.

Тому важливо досліджувати фактори, що обмежують швидкість прокатки. У властиво процесі прокатки таким фактором є швидкість подачі порошку у валки. Для валків діаметром 20 см Еванс і Сміт не змогли домогтися швидкості стрічки більше 15 м/хв (подача порошку під дією власної ваги). При більше високих швидкостях порошок проходить через валки, не спресовуючись. Швидкість прокатки можна підвищити, використовуючи порошки з дуже гарною плинністю. Швидкість прокатки обмежена також швидкістю видалення повітря з порошку. Як показали результати кінозйомки, порошок над валками постійно вирує. Підраховано, що при прокатці 900 г/хв нікелевого порошку з насипною вагою 1 г/см<sup>3</sup> при швидкості 2,4 м/хв повинне виділятися не менш 1000 мол повітря в 1 хв. Цікаві результати отримані при заміні повітря аргоном, азотом, двоокисом вуглецю або воднем. При постійній

висоті шаруючи порошку й швидкості прокатки 2,4 м/хв отримані стрічки товщиною 0,31, 0,43, 0,48 і 0,61 мм відповідно. Приблизно можна прийняти ці значення обернено пропорційної в'язкості цих газів. Заміняючи повітря на водень, домагаються збільшення товщини стрічки у два рази через легкість виділення водню.

Однак навіть для порошоків з дуже гарною плинністю й при використанні водню максимально досяжні швидкості все-таки дуже низькі. Прокатка у вакуумі, при якій вплив виділення газів повністю знищується, являє собою важку, але все-таки технічно розв'язну проблему. Попереднє брикетування порошку також усуває труднощі, викликувані виділенням повітря й подачею порошку у валки. Однак не ясно, який метод дозволить попередньо брикетувати порошок швидше й дешевше, ніж прокатка. Примусова подача порошку, наприклад, за допомогою нескінченного гвинта не розв'язує проблему виділення повітря. Можливе застосування пропелерів, що подають порошок з великою швидкістю у валки. Але повний вигреш і в цьому випадку можливий тільки при застосуванні вакууму.

Швидкість спікання прокатої стрічки також визначається багатьма факторами. Насамперед це необхідність підтримки стрічки при проході через піч. Для електричних печей з роликівим подом температура обмежується 1150°. Якщо припустити, що нагрівання стрічки, що рухається, здійснюється за рахунок радіації при швидкості 1000° в 1 сек, то й у цьому випадку мало ймовірно, що швидкість просування стрічок товщиною більше 2,5 мм буде вище 3 мм/хв при довжині гарячої зони печі в 12 м. Можливо, звичайно, застосування більше швидкого індукційного нагрівання або пряме пропущення струму через стрічку між двома парами валків, що прокочують. Однак широка тонка стрічка - не краща форма для індукційного нагрівання, а матеріал зі змінною й, можливо, нерівномірною пористістю - не найкращий для прямого нагрівання струмом. Крім того, необхідно зважати на можливість розриву стрічки або раптової зупинки валків. При такому способі нагрівання дуже важко уникнути оплавлення стрічки.

Імовірно, найвищі швидкості можна одержати при гарячій прокатці стрічки, використовуючи дуже довгі печі для спікання, що працюють нижче температури плавлення металу. У всіх наведених міркуваннях нічого не сказано про процеси дифузії й сплавоутворення. Для одержання максимального виходу готової продукції при даних капіталовкладеннях необхідно, щоб процеси, що вимагають відпалу протягом декількох годин або мінут, проводилися зі стрічкою в рулонах. Тут теж є ряд труднощів.

З огляду на обмеження, що виникають при прокатці й спіканні, можливість досягнення швидкостей прокатки вище 30 м/хв здається мало ймовірною, якщо тільки не будуть запропоновані зовсім нові способи прокатки й спікання. Через велику різницю у швидкостях прокатки значно звужується область, де прокатка порошоків економічно вигідніше прокатки компактних металів. Економічна вигода від застосування прокатки порошоків обумовлена числом операцій, які можна при цьому усунути. Типовий

приклад — виробництво мідно-нікелевої стрічки товщиною 3,75 мм (для карбування монет). Звичайна (непорошкова) технологія включає: 1) нарізку заготівель, зважування, плавлення, легування й лиття; 2) обрубання й очищення заготівель (видалення окалини); 3) холодну й гарячу прокатку з декількома проміжними відпалами; травлення, промивання й сушіння. Для виробництва такої стрічки потрібно 15 проходів через валки. Прокатка цієї стрічки з порошків дозволяє уникнути операції 1) і 2), а також травлення, промивання й сушіння. Можна чекати, що економічний ефект буде значним. Він залежить від: а) розходження у вартості мідних і нікелевих заготівель і вартості розпилення мідно-нікелевих сплавів; б) співвідношення відходів у цих двох процесах.

Звичайно, відходи при порошковій технології будуть багато менше. Можливість застосування такої технології для звичайних металів сильно залежить від вартості порошків. Для дуже чистих або рідких і дорогих металів і для багатьох сплавів, особливо для тих, які швидко наклепуються, виробництво тонких стрічок порошковим методом більш економічно, навіть при дуже низьких швидкостях прокатки й при високій вартості порошків. Отже, у майбутньому можна чекати значного розширення області застосування прокатки порошків, особливо для стрічок з дисперсійно, що твердіють сплавів. Можна думати, що прокатка порошків не обмежиться виробництвом стрічок; є можливість робити вироби різної форми, включаючи дріт, а за допомогою безперервного зварювання смуги по виходу її з гарячого стана можна робити труби.

Технологія прокатки порошків повинна знайти широке застосування в спеціальних випадках, зокрема коли використання будь-якої іншої технології вкрай утруднено. Приведемо кілька таких прикладів:

А. Нанесення порошку на несучий лист і спікання із застосуванням прокатки або без її. Така технологія використовувалася в минулому для виготовлення підшипникових матеріалів на основі сталі.

Наприклад, згадується готування безпористих Cu - Pb- або Cu - Sn - Pb-підшипникових стрічок, спечених з легуваних порошків на сталевій підкладці з наступною повторною прокаткою й спіканням.

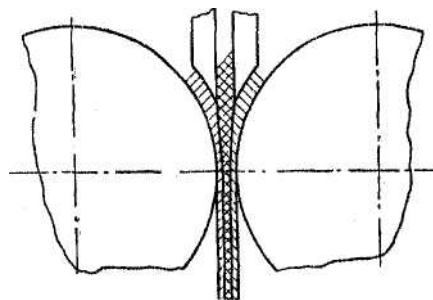


Рис. 3.13. Схема прокатки триметалічних стрічок.

Описаний також метод одержання підшипникових матеріалів напилюванням суміші порошків міді й нікелю на сталевій стрічці з наступним спіканням. Після декількох проходів через валки, коли досягалася потрібна пористість, стрічку просочували у вакуумі розплавленими підшипниковими сплавами на основі свинцю. Цьому питанню присвячено багато патентної літератури.

Застосовуються пороутворюючі речовини для виробництва дуже пористої нікелевої стрічки або стрічки з кадмієвих сплавів як електроди в акумуляторах. Очевидно, подібна технологія можлива для виробництва фрикційних матеріалів, нанесених на підкладку. Виробництво пористої стрічки прямою прокаткою без підкладки описано в патенті.

Б. Готування стрічок без підкладки. Наприклад, бронзово-графітові й на мідній основі фрикційні композиції, а також матеріали для поглинання нейтронів. Ці матеріали складаються з речовин з більшим перетином захоплення теплових нейтронів (карбід бору, окис гадолінію, окис європію або фторид кадмію) і металу, що володіє гарними механічними властивостями. З таких матеріалів виготовляють захисні екрани.

В. Виробництво багатошарових порошкових стрічок різними методами. Наприклад спільна прокатка двох раніше прокатаних стрічок або прокатка порошку по поверхні раніше прокатаної стрічки з іншого порошку. Можливо також прокочувати порошки із двох сторін підкладки. Франсен описав виробництво бі- і триметалічних стрічок шляхом подачі порошку двома або трьома роздільними потоками (рис. 3.13).

Г. Хімічно активні метали можна прокочувати в оболонках. Деякі такі випадки описані в роботі. Інтерес представляє прокатка титану в оболонці. Описано відновлення окису заліза й наступна прокатка отриманого продукту в сталевих контейнерах [491].

### **3.2 Видавлювання**

Розрізняють два види видавлювання (екструзії): а) порошок змішують зі зв'язуванням або пластифікатором і видавлюють при кімнатній температурі; б) порошок видавлюють в основному без добавок при підвищених температурах.

Така класифікація впливає з наступних міркувань: при видавлюванні металевого порошку з контейнера через очко потрібні дуже більші тиски, щоб одержати зовсім щільну заготовку. Виробу, спресовані з порошків, дуже неміцні, якщо температура процесу істотно нижче температури спікання. Отже, виробу, приготвлені екструзією порошків при кімнатній температурі, будуть також неміцними (за винятком свинцю й інших подібних матеріалів, у яких температура спікання не набагато вище кімнатної). Фактично ці матеріали настільки тендітні, що можуть зруйнуватися, проходячи через очко, оскільки вони зовсім не здатні витримувати ні внутрішніх, ні зовнішніх напруг. Якщо навіть матеріали й не зруйнуються, вони однаково настільки

неміцні, що процес, стає практично невідгідним. А. С. Фіалков і Я.С.Уманський досліджували холодну екструзію мідного порошку; вони вважають за доцільне застосування змашення й попереднього підпресування.

Однак із цього не треба, що холодне видавлювання зовсім не представляє інтересу; іноді воно досить корисно. Виникаючі при цьому процесі труднощі можна перебороти, застосовуючи наступні міри:

1. Тиск при екструзію значно знижується, якщо додавати більші кількості змашення. У цьому випадку частки порошку не випробовують значних напруг; крім того, для одержання достатньої міцності в сирому стані додають пластифікатор.

2. Екструзію проводять без застосування зв'язувань, але при температурах вище температури спікання металу або принаймні при температурах, що забезпечують швидке зниження внутрішніх напружень відпалом.

Розглянемо спочатку видавлювання із застосуванням сполучні.

### Видавлювання із застосуванням сполучного

Видавлювання осмію й вольфраму із застосуванням сполучних використовувалося на ранніх стадіях виробництва ниток ламп накалювання. У якості сполучних уживали органічні речовини: цукор, сироп, палений цукор, декстрин, камедь або крохмаль. Пасту видавлювали через алмазне очко. Отриманий продукт висушували, а органічне зв'язування перед спіканням випалювали. Спечений продукт звичайно був дуже пористим. У якості тимчасових сполучних застосовувалися й ртутні амальгами.

У патентній літературі вказується багато гарних сполучних і змашень, наприклад: алкілірована гума, колодій, нітроцелюлоза, шелак, парафін, порошкові пасти, рідке скло, нафталін і т.д. За такою технологією готують із карбиду вольфраму труби, фасонні вироби, свердли й т.п. великої довжини й діаметром від 0,25 мм до декількох десятків міліметрів. Тим же способом часто роблять невеликі деталі з мірним різанням екструдированої заготовлі. При виробництві виробів з карбиду варто враховувати утворення пор внаслідок випару зв'язування й вигорання вуглецю.

Описано метод збільшення кількості металу в суміші, що робить процес більш зручним. Це досягається попереднім пресуванням суміші порошку металу із сухим крохмалем. Спресовані бруски придатні для складського зберігання. Перед використанням бруски просочують водно-гліцеринним розчином і нагрівають для зварювання крохмалю.

У роботі наведена фотографія виробу з карбиду після екструзії. Описано одержання дроту діаметром менше 0,2 мм із твердого сплаву з використанням 3%-вого розчину камеді (1,2 вага% у перерахуванні на тверду камедь). Суміш

ретельно перемішують і видавлюють через алмазне очко, змазане нафтою. Екструзію можна проводити й у вакуумі.

Технологію видавлювання, імовірно, можна використовувати для багатьох металів, особливо при наявності гарних сполучних, пластифікаторів і змачень. Однак дотепер цей метод не одержав належної оцінки й розвитку. Таку ж технологію, мабуть, можна використовувати й для виробництва виробів у великих масштабах (зрозуміло, при поліпшених складах зв'язувань і досить низкою вартості порошків). Готування більших гарне сформованих заготівель у цей час не викликає труднощів і може бути здійснене з малими витратами. Однак тут виникають проблеми, пов'язані з видаленням зв'язування й усадкою при спіканні. Незважаючи на це, операція холодної екструзії часто треба за попередньою обробкою, і немає підстав припускати, що цим методом не можна одержати достатню точність розмірів.

Для просушки або випару зв'язування потрібен час, і це є головними економічними труднощами процесу. Спікання екструдированих заготівель не викличе утруднень. Важливою перевагою такого процесу є низький тиск пресування й відповідно менше зношування прес-форм і циліндрів. Прокатка подібних композицій зовсім не розглядалася, хоча представляється підбадьорюючою.

### Видавлювання без сполучних

Можливості цього процесу описані в ряді робіт. Видавлювання широко застосовують для виробництва виробів з різних металів і сплавів. Нижче зазначені температурні інтервали обробок деяких із цих сплавів (табл. 3.1). При екструзії температура металу може зрости на кілька сотень градусів за рахунок теплоти тертя, що не встигає розсіюватися. Видавлювати можна будь-який метал або сплав, якщо тільки необхідні температура й тиск не обмежуються матеріалом прес-форми.

Для видавлювання заготівель діаметром 75—125 мм і довжиною до 350 мм застосовують 500-тонні преси, а для заготівель діаметром 500—1000 мм і довжиною до 2300 мм потрібен прес в 20 000 т. Довжина виробів коливається від 3 до 30 м; їхня форма може бути найрізноманітнішою й дуже складною (рис. 3.14). Можуть бути зроблені й труби із фланцями, стабілізаторами або ребрами.

Сучасні преси для екструзії — автоматичні або напівавтоматичні високошвидкісні. Час екструзії виміряється, як правило, секундами. Тиск екструзії звичайно міняється в межах 56—280 кг/мм<sup>2</sup>. Струмопровідні матеріали дуже швидко нагріваються індукційними струмами. Наприклад, алюмінієва болванка вагою 140 кг може бути нагріта до 450° за 30 хв.



Таблиця 3.1 - Температура екструзії деяких металів і сплавів

Матеріал	Температура екструзії
Алюміній та його сплави	400 - 500
Магній та його сплави	300 - 400
Мідь	800 - 880
Латунь	650 - 850
Нікелева латунь	750 - 900
Сплави мідь-нікель	900 - 1000
Нікель	1100 - 1160
Монель метал	1100 - 1130
Інконель	1170 - 1200
Сталь	1050 - 1250

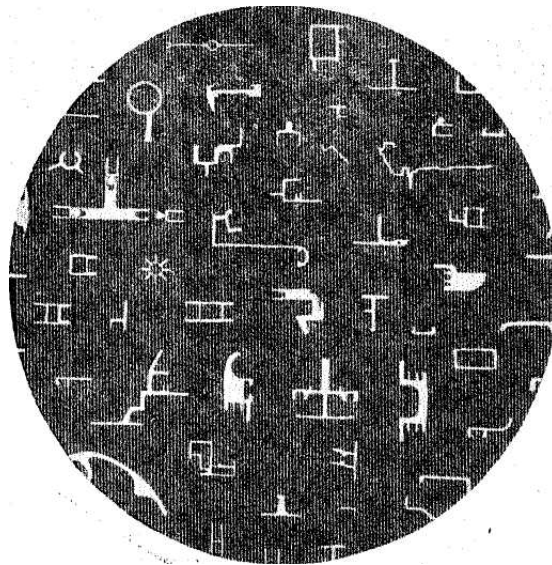


Рис. 3.14. Деякі форми перетинів виробів невеликого розміру, що видавлюються з легких сплавів.

При рішенні питання про застосування технології видавлювання до більших мас порошків необхідно з'ясувати, по-перше, є чи для цього достатні підстави й, по-друге, які виникають при цьому труднощі. При видавлюванні порошку чистого металу або сплаву ми не можемо, очевидно, передбачати переваг або недоліків цього методу в області конструкції або габаритів виробів. Немає підстав думати, що екструзія з неокислених порошків металів буде істотно відрізнятися по поводженню, за вартістю або по фізичних властивостях виробів від видавлювання суцільних металів. Тому нема рації видавлювати

чисті порошки металів, якщо тільки їхня вартість не нижче вартості компактного металу. Це повинне бути принциповою основою розвитку методу екструзії порошків.

Однак існують, імовірно, металургійні фактори, що визначають такий розвиток. Велике майбутнє мають дисперсійно, що твердіють сплави. Екструзія виявилася чудовою технологією для готування таких сплавів (хоча метод прокатки тут, імовірно, теж застосуємо). Багато виробів з таких сплавів виготовлені методом екструзії, таким же, як при одержанні виробів із Сапа. Можливість запобігання деяких небажаних реакцій легування привела до розвитку виробництва виробів, екструдированих з порошків магнієвих сплавів, Сполучення застосування металевих порошків, що коштують менше литих заготівель, з можливістю одержання незвичайних фізичних властивостей за рахунок зміцнення дисперсними частками може привести до успішної заміни екструзії (або прокатки) литих металів екструзією порошків. На користь останньої, крім того, говорить велика розмаїтість можливих форм і розмірів виробів (див. рис. 3.14).

Допустимо для зручності, що температура видавлювання повинна бути такий же, як при гарячому пресуванні металевих порошків (завдяки більше високому ступеню деформації при екструзії температура може бути трохи нижче, ніж при гарячому пресуванні). При засипанні порошку в контейнер для екструзії виникають наступні проблеми:

1. Рівномірний розподіл порошку усередині контейнера сильно ускладнюється при невертикальному розташуванні преса. Більшість же сучасних пресів розташовано горизонтально.

2. Порошок не можна нагріти до температури спікання, зберігаючи його плинність. Подачу порошку в цьому випадку потрібно проводити в інертній атмосфері. Нагрівання порошку в самому контейнері неможливий без серйозного ускладнення конструкції й збільшення вартості преса.

3. Ступінь обтиснення порошків звичайно (2-4): 1, це істотно збільшує довжину ходу й вартість преса.

4. Сильно ускладнюють устаткування пристосування, що дозволяють видалити гази з порошку.

5. Для екструзійного преса, що сконструйований на оптимальні умови плинності металу через очко, не обов'язкові інші умови рівномірного розподілу щільності в брикеті (такі, як добре змазані стінки прес-форм або двостороннє пресування).

Очевидно, таким чином, що екструзія порошків, засипаних у контейнер, важке й не дуже практичне рішення. Очевидно, необхідно попереднє брикетування. Такий крок, звичайно, зажадає пресів значного розміру, хоча тиску пресування можуть бути досить низькими. Це означає істотне збільшення капітальних витрат. Попереднє нагрівання або попереднє спікання можна здійснювати в індукційних печах із захисною атмосферою. Передачу з печі в контейнер для екструзії можна здійснювати так швидко, що помітного внутрішнього окислювання пористого брикету спостерігатися не буде.

Неважко також здійснювати цю передачу в захисній атмосфері, придатної для сумішей, що містять частки окислів.

Дослідження викладених тут питань показали, що практичність екструзії не викликає сумнівів і що економічний ефект можливий, навіть якщо металеві порошки коштують дорожче литих заготівель.

Деякі із процесів екструзії вже добре вивчені, і їхнє тривале існування підтверджує економічну доцільність їхнього використання. Наприклад, так званий процес «коалесценції»<sup>1</sup> (Coalescence process) — процес видавлювання виробів з міді. Він полягає в одержанні тендітного мідного катода електролізом, на що витрачається на 15—25% електричній енергії менше, ніж для виробництва стандартного щільного катода такої ж товщини. Осад здирають, дроблять і пресують при тиску  $14 \text{ кг/мм}^2$ , одержуючи брикети пористістю 14—20%, які потім нагрівають до  $870\text{—}910^\circ$  у відбудовній атмосфері; при цьому S, As і Sb вигорають до дуже низького рівня. Нагріті брикети потім попадають прямо в прес; видавлювання роблять при  $22\text{—}37 \text{ кг/мм}^2$ . Для різних виробів діаметр міняється від 1,25 до 11,5 див. Поверхня цих виробів значно краще, ніж у гарячекатаної міді. Інші фізичні властивості такі ж, як у звичайної міді тої ж чистоти.

Розглядаючи практичні приклади застосування екструзії порошків, важко зрозуміти, чому цей метод не використовують для найважливіших промислових металів. Його застосовують у промисловості для металів з високою вартістю, наприклад для виробництва контактних матеріалів з композицій W - Cu і W - Ag.

У патенті описаний процес екструзії із застосуванням попереднього ущільнення й спікання. Досліджено процес видавлювання порошків магнію й алюмінію. Екструзія дає можливість одержувати вироби подовжених форм із матеріалів, дуже твердих або тендітних у литому виді (наприклад, алніко).

Існує метод захисту нагрітого брикету (запропонований Уільямсом), що усуває необхідність захисної атмосфери, а саме видавлювання в оболонці. Цей спосіб особливо коштовний для обробки металів, сильно взаємодіючих з атмосферою. Два моменти викликають тут інтерес: а) поводження оболонки в процесі екструзії; б) металургійна сумісність оболонки з її вмістом, із прес-формою й контейнером.

Холоднопресовані брикети поміщають у щільно підігнану оболонку, що потім відкачують і заварюють. При екструзії на поверхні оболонки можуть утворитися зморшки. На рис. 3.15, а показане утворення таких зморшок, коли матеріал оболонки більше твердий, чим серцевина, а на рис. 3.15, б — коли матеріал серцевини значно твердіше оболонки. Щоб звести утворення зморшок до мінімуму, необхідно стінки оболонки робити можливо більше тонкими. Однак у зв'язку зі стоншенням оболонки при видавлюванні є межа зменшенню її початкової товщини. Уільямс указує, що при використанні оболонок з м'якої сталі або міді кінцеву товщину стінки оболонки можна довести тільки до 0,12 мм. Якщо є можливість після нагрівання скоротити до мінімуму перебування пакета на повітрі, то зморшкуватості можна уникнути, використовуючи

штовхальник (в екструзіоному пресі), що продавлює ущільнений порошок через форму й очко (рис. 3.16).

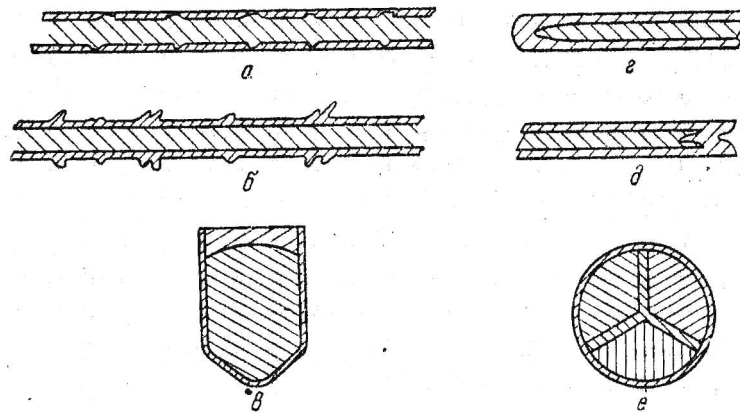


Рис. 3.15. Приклади екструзії в оболонці. а -оболонка твердіше серцевини; б -серцевина твердіше оболонки; в-оболонка із загостреним носом; г-стовщення носової частини після екструзії; д — поява дефекту при екструзії (запресовування оболонки); е-оболонка з перегородками

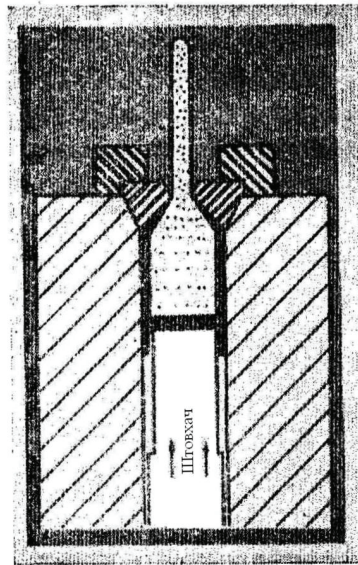


Рис. 3.16. Наскрізна екструзія в оболонці

Штовхальник продавлює порошок через оболонку й очко, розміри перетину витримуються дуже точно. Цей метод усуває додаткові операції, тому що оболонку по закінченні екструзії не видаляють.

Цей метод володіє й тією перевагою, що оболонка залишається на готовому продукті (її видалення іноді важко). Для екструзії в оболонках конусоподібні прес-форми краще, ніж прямокутні; часто застосовують оболонки із загостреним кінцем (рис. 3.15, в). Після екструзії оболонка в носовій частині

завжди товще (рис. 3.15, г). Щоб уникнути запресовування оболонки у виріб (цей дефект показаний на рис. 3.15, д), можна використовувати фасонну пробку (рис. 3.15, в) для закриття оболонки. Товщину виробу витримують звичайно з точністю до 0,1 мм по його довжині. Використовуючи круглу оболонку й перегородки, можна одержувати вироби неправильної форми через кругле очко (рис. 3.15, е).

У деяких випадках велике значення має співвідношення термічного розширення серцевини й оболонки. Наприклад, при екструдированні берилієвих трубок необхідно, щоб зовнішня оболонка термічно розширювалася менше, ніж берилій, а внутрішня, навпаки, більше (або вона повинна бути настільки тонкої, що буде деформуватися при стиску берилію в процесі охолодження). Із цих причин важко видавлювати вироби складних форм із берилію. Навіть якщо стиск серцевини при охолодженні прагне до її відділення від оболонки, тертя між їхніми поверхнями може бути настільки велико, що перешкодить стиску й викличе напруги. Шорсткість і переплетення таких поверхонь, що примикають, можуть виникнути в, результаті окислювання оболонки або влучення стороннього матеріалу при обробці.

Видалення оболонки механічним способом не завжди можливо, і іноді краще робити це хімічним шляхом. Дуже важливо вибрати для оболонки розчинний матеріал так, щоб серцевина при цьому не реагувала з розчинником.

Деякі метали, важливі в атомній енергетиці (U, Th, Be і Zr), хімічно активні й утворюють досить міцні окисли, карбіди й нітриди. Спінання цих металів треба проводити в атмосфері дуже чистого інертного газу або у високому вакуумі. Важко вибрати матеріал для прес-форм гарячого пресування для цих металів, з огляду на можливе утворення легкоплавких евтектик або забруднення пресуємого матеріалу внаслідок швидкої дифузії. Часто виробу із цих металів мають дуже більшу довжину й, отже, необхідна екструзія в оболонці або прокатка. Мідь — підходящий матеріал для покриття урану аж до 800°, а також цирконію й торію. Нікель і залізні сплави можуть бути використані для урану до 600°. Мідь можна видалити аміачним розчином або оцтовою кислотою.

Екструзію в оболонці широко застосовують для берилію; прутки діаметром від 0,8 до 3,8 мм або перетином 1,25 × 4,45 мм можна екструдировати в оболонці з м'якої сталі при температурі 1050°. В Англії роблять трубки зовнішнім діаметром від 12,5 до 63 мм і товщиною стінок від 1,25 до 15 мм. Оболонки з м'якої сталі видаляють із берилію розчиненням у концентрованій азотній кислоті.

Екструзією в оболонці роблять трубки із пластичного хрому.

У ядерній техніці застосовують композиції, у яких різні тендітні дисперсні неметалічні матеріали розподілені в пластичній металевій матриці. У тепловипромінюючих елементах як дисперсна фаза служить речовина, що розщеплюється. Для регулювання й захисту реактора потрібні речовини, що сильно поглинають нейтрони. Ці дисперсні матеріали звичайно містять в оболонку («покриття»), що перешкоджає влученню продуктів

розподілу в теплоносія або їхню взаємодію з навколишнім середовищем. Розміри часток і розподіл дисперсної фази повинні строго контролюватися; це легше всього досягається застосуванням порошкової технології. Зовсім очевидно, що для виготовлення виробів витягнутої форми з таким покриттям найбільш підходящим методом виявляється екструзія в оболонці. Сюди ставиться, наприклад, виробництво труб з окису урану, розподіленої в залозі або нержавіючій сталі, з оболонкою з того ж металу. Ці труби одержують за одну операцію екструзією суміші порошків в оболонці при 1100°. Більшу частину складних виробів зі змінними перетинами з таких дисперсій одержують цим методом. Наприклад, з окисів Європію й Самарію, розподілених у нержавіючій сталі (оболонка теж з нержавіючої сталі), одержують екструзією контрольні стрижні тригранної жолобчастої форми для реакторів. Після екструзії можна, звичайно, продовжити обробку, наприклад, шляхом гарячого ротаційного кування.

### Видавлювання пористих виробів

При належних умовах екструзією можна робити вироби зі значною пористістю. У деяких межах пористості такі вироби можуть бути отримані простим набиванням порошку в трубку при безперервному спіканні. Витончений метод складається в пропусненні порошку по вібруючій трубці, розташованій в гарячій зоні печі.

Широкий діапазон пористості може бути отриманий гарячою або холодною екструзією із застосуванням пороутворювачів або без них. Після екструзії необхідне спікання. При екструзії пористих виробів більші труднощі представляє регулювання точної величини тиску на матеріал при проході його через прес-форму для забезпечення заданої пористості. Практично тиск сильно падає уздовж стінок контейнера завдяки тертю, викликаючи зміну пористості по довжині зразка. Ці труднощі можна перебороти шляхом застосування рознімної прес-форми, елементи якої стислі певним тиском. Така рознімна прес-форма дозволяє підтримувати тиск біля очка більше постійним. Однак збільшення сталості пористості супроводжується в цьому випадку зменшенням точності розмірів по довжині зразка, що більше терпимо.

### **3.3 Порошки для процесів прокатки й екструзії**

Розглядаючи зв'язок між виробництвом порошків і прямою їхньою прокаткою або екструзією, необхідно відзначити два основних моменти.

По-перше, можливість одержувати порошкові матеріали, що володіють унікальними властивостями, наприклад сплави, зміцнені дисперсними частками. Крім того, порошковим методом можна робити матеріали в більших

кількостях. З метою економічності необхідно при цьому використовувати найдешевший метод виробництва порошків. Технологія розпилення розплавлених металів забезпечує таку економічність. У недалекому майбутньому установки для розпилення металів будуть розташовуватися на плавильних заводах; матеріал для розпилення буде надходити безпосередньо з бесемерівського конвертера, мартенівської печі, мідеплавильній відбивній печі або печі для плавки алюмінію.

По-друге, можна одержувати металеві порошки прямо з руд, минаючи стадію плавлення. Ця технологія вже відома для таких металів, як Cu, Ni і Co; її можна поширити й на виробництво заліза.

Такі прямі методи не легко застосувати для одержання порошків сплавів, і зовсім очевидно, що зробити латуні, бронзи, нержавіючі сталі й інші подібні матеріали прямим виробництвом порошків можна тільки шляхом дифузійного легування протягом або після спікання. Значну увагу тому потрібно приділити вивченню прокатки й екструзії й наступному спіканню сумішей порошків - проблемі, який дотепер повністю зневажали.