

3. Prasowanie proszków

Prasowanie jest jednym z głównych procesów technologicznych w produkcji wyrobów ze spiekanych metali. Ma ono na celu formowanie wyprasek o określonych wymiarach i kształcie oraz odpowiedniej gęstości i własnościach fizykochemicznych.

Prasowanie proszków na kształtki przeprowadza się w matrycach. Odważona lub odmierzona ilość proszku po zasypaniu do matrycy zagęszczana jest naciskiem stempla, a następnie wypychana z matrycy. Podczas prasowania proszek nasypany luźno do matrycy zmniejsza często dwu- lub trzykrotnie swoją objętość ulegając zagęszczaniu. Proszek zajmuje tylko 1/6 - 2/5 objętości matrycy w zależności od jego gęstości nasypowej. Powierzchnia styku ziarn po luźnym zasypaniu jest bardzo mała, ponadto licznie powstające „mostki” powodują zwiększenie porowatości nasypanego proszku. Porowatość warstwy luźno zasypanego proszku jest uzależniona od kształtu i wielkości cząstek proszku. Dla drobnoziarnistych proszków o nieregularnym kształcie cząstek może ona dochodzić nawet do 90%. Zmniejszenie porowatości zasypanego proszku można uzyskać przez odpowiedni dobór ziarnistości proszku, np. mieszając proszek gruboziarnisty z drobnoziarnistym, którego cząstki wchodzą w luki pomiędzy dużymi cząstkami. Bardzo istotne znaczenie ma również powierzchnia styku między cząstkami proszku. Proszki o bardziej nieregularnym kształcie i rozwiniętej powierzchni, charakteryzują się większą powierzchnią styku pomiędzy cząstkami przy tej samej porowatości w porównaniu z proszkami kulistymi. Można więc stosować niższe ciśnienia prasowania, aby uzyskać trwałą wypraskę, która nie ulegnie zniszczeniu w czasie wypychania.

Podczas prasowania proszku zachodzą następujące zjawiska:

- a) zbliżanie ziarn proszku na odległości umożliwiające działanie adhezji,
- b) powiększenie styku ziarn proszku przez wzajemne ich zbliżanie,
- c) powiększenie styku ziarn przez odkształcenie plastyczne,
- d) zdzieranie powłok tlenkowych przez wzajemne tarcie sąsiadujących ze sobą ziarn powodujące odsłonięcie czystych, aktywnych powierzchni metalicznych,
- e) powstanie lokalnych punktów” ciśnieniowo-topliwych” o podwyższonej temperaturze, umożliwiających dyfuzję powierzchniową.

Proces prasowania zasadniczo można podzielić na dwa etapy.

W początkowym etapie prasowania przy niskich ciśnieniach następuje załamywanie i likwidacja „mostków” utworzonych przy zasypywaniu, oraz ściślejsze ułożenie ziarn dzięki wzajemnym poślizgom i obrotom poszczególnych ziarn. W tym okresie duży wpływ na uzyskaną gęstość wypraski ma kształt i tarcie pomiędzy przemieszczającymi się cząstkami. Gęstości wyprasek prasowanych niskimi ciśnieniami są bardzo nierównomierne, występują duże różnice zwłaszcza pomiędzy materiałem przylegającym do ścian, a środkiem próbki.

W drugim etapie prasowania wyższymi ciśnieniami, ma miejsce odkształcenie plastyczne ziarn proszku. Oba stadia zagęszczania często nakładają się i odkształcenie plastyczne może rozpocząć się przed zakończeniem likwidacji porów wskutek przemieszczeń poszczególnych cząstek. Deformacja cząstek proszku rozpoczyna się w miejscach styku poszczególnych cząstek, a następnie rozprzestrzenia się w głąb cząstek. W czasie prasowania proszków kruchych nie występuje deformacja plastyczna ani kruszenie ziarn. Jednym z ważniejszych zagadnień procesu prasowania jest ustalenie zależności między gęstością a ciśnieniem prasowania (zależność 49):

$$\rho = f(p) \quad (49)$$

$$\rho = \frac{d}{d_t} * 100\% \quad (50)$$

gdzie: ρ - gęstość względna wypraski, d - gęstość rzeczywista wypraski, d_t - gęstość teoretyczna

Największy wzrost gęstości ma miejsce w zakresie ciśnień prasowania 3-5 T/cm² (300-500 MPa), następnie przyrost gęstości maleje i w zakresie ciśnień 10-15 T/cm² (1000-1500MPa) praktycznie nie obserwuje się dalszego wzrostu gęstości.

Taki charakter zależności ρ od ciśnienia prasowania wiąże się ze zwiększeniem powierzchni styków międzycząsteczkowych i tym samym ze zwiększeniem wytrzymałości porowatej kształtki, a także z utwardzeniem cząstek proszku związanym ze zgniotem, co z kolei utrudnia dalsze odkształcenie plastyczne.

Badając wpływ ciśnienia prasowania na uzyskaną gęstość stwierdzono, że istnieje bardzo wyraźna zależność zdolności do zagęszczania od twardości metalu, z którego wykonany jest proszek. Proszki plastyczne, takie jak srebro, miedź, łatwo poddają się prasowaniu, natomiast prasowanie proszków metali twardych takich jak chrom czy molibden, względnie związków trudnotopliwych, jest bardzo utrudnione. Wiąże się to ze skłonnością danego metalu do deformacji plastycznej. Na porowatość uzyskanych wyprasek ma także wpływ kształt, wielkość cząstek, stan ich powierzchni. Dlatego dla każdego rodzaju proszku należy sporządzić krzywe $\rho = f(p)$, które nazywa się wykresami prasowania. Pozwalają one ustalić wielkość ciśnienia niezbędnego do uzyskania żądanej gęstości.

3.1. Ciśnienie promieniowe

Podczas prasowania w matrycy, cząstki proszku znajdują się w warunkach nierównomiernego ściskania objętościowego. Wskutek tarcia pomiędzy cząstkami proszku rozkład ciśnienia nie jest równomierny w całej wyprasce. W kierunku prostopadłym do kierunku prasowania, ciśnienie jest mniejsze. Wartość ciśnienia promieniowego podaje wzór (51):

$$p_r = \frac{\nu}{1-\nu} * p = \xi * p \quad (51)$$

$$\xi = \rho * \xi' \quad (52)$$

gdzie: p_r - ciśnienie promieniowe, p - ciśnienie prasowania, ν - współczynnik Poissona, ξ - współczynnik ciśnienia promieniowego; zależy od gęstości wypraski, ξ' - współczynnik ciśnienia promieniowego dla ciała litego, ρ - gęstość względna wypraski

Ciśnienie promieniowe nie jest stałe; jego wartość zmienia się w zależności od wysokości wypraski. W miarę oddalania się od powierzchni stempla prasującego, zmniejsza się ciśnienie osiowe wskutek tarcia, a tym samym maleje również ciśnienie promieniowe.

3.2. Straty ciśnienia prasowania na pokonanie tarcia

Część ciśnienia zostaje zużyta na pokonanie sił tarcia wewnętrznego i tarcia zewnętrznego. Przez tarcie wewnętrzne rozumie się tarcie pomiędzy poszczególnymi cząstkami proszku, natomiast tarcie zewnętrzne - jest to tarcie proszku o ścianki matrycy. Straty ciśnienia na tarcie zewnętrzne zależą od:

- współczynnika tarcia między proszkiem a matrycą,
- skłonności do łączenia się tych materiałów,
- dokładności wykonania ścianek matrycy,
- wysokości i średnicy matrycy,
- zastosowanych środków poślizgowych.

Jak wynika z danych eksperymentalnych straty ciśnienia na tarcie o ścianki matrycy wahają się w granicach 60-90%. Oprócz tarcia o ścianki matrycy, dużą rolę odgrywają tarcie pomiędzy cząstkami proszku, czyli tarcie wewnętrzne. Współczynnik tarcia wewnętrznego jest znacznie wyższy od współczynnika tarcia o ścianki matrycy i nie zależy w zasadzie od ciśnienia prasowania. Natomiast na współczynnik tarcia wewnętrznego bardzo silny wpływ ma kształt i wielkość cząstek proszku.

Wprowadzanie środków poślizgowych w znacznym stopniu obniża straty ciśnienia na tarcie.

3.3. Rozkład gęstości w wypraskach

Ponieważ wskutek strat na tarcie, ciśnienie osiowe maleje w miarę oddalania się od powierzchni stempla prasującego, rozkład gęstości w wypraskach jest nierównomierny. Najwyższą gęstość uzyskuje się w warstwach górnych przylegających w czasie prasowania do stempla, przez który przenoszony jest

nacisk. W miarę oddalania się od powierzchni stempla prasującego, gęstość maleje. Na rozkład gęstości prasowanej kształtki w dużym stopniu wpływają jej wymiary. Im mniejszy jest stosunek h/d (h - wysokość, d - średnica), tym bardziej równomierny jest rozkład gęstości. Bardziej równomierny rozkład gęstości uzyskuje się przy dwustronnym prasowaniu, kiedy na prasowaną kształtkę wywierany jest nacisk przez stempel górny i dolny. Dwustronne prasowania stosuje się jeśli: h/d (smukłość wypraski) > 1 lub przy prasowaniu tulei - $h/s > 3$ (s - grubość ścianki tulei).

3.4. Ciśnienie wypychania

Końcowym etapem zabiegu prasowania jest wypchnięcie wypraski z matrycy za pomocą dolnego stempla. Wskutek sprężystego odkształcenia matrycy i wypraski, do jej wypchnięcia konieczne jest pewne ciśnienie. Przez ciśnienie wypychania rozumie się siłę konieczną do wypchnięcia wypraski z matrycy odniesioną do jednostki powierzchni bocznej wypraski w T/cm^2 (MPa). Ciśnienie wypychania jest proporcjonalne do ciśnienia prasowania i zależy od współczynnika tarcia cząstek proszku o ścianki matrycy i współczynnika Poissona. W przypadku proszków plastycznych, ciśnienie wypychania jest większe niż w przypadku materiałów kruchych. Ciśnienie wypychania wzrasta wraz ze zwiększeniem wysokości wypraski, natomiast dodatek środków poślizgowych obniża ciśnienie wypychania. Duży wpływ ma także gładkość ścianek matrycy i sztywność konstrukcji matrycy.

3.5. Rozprężenie wyprasek

Przez rozprężenie wyprasek określa się zmiany wymiarów wyprasek pod wpływem naprężeń wewnętrznych po usunięciu ciśnienia prasowania i po wypchnięciu wypraski z matrycy. Rozprężenie uwiadcza się w zwiększeniu zarówno wymiarów zgodnych z kierunkiem prasowania, jak i prostopadłym do niego. Zmiany wymiarów na wysokości wypraski dochodzą do 5-6%, a w kierunku prostopadłym do kierunku prasowania – od 1% do 3%. Wynika to z nierównomiernego przebiegu odkształceń podczas prasowania, które są mniejsze w kierunku promieniowym, co wiąże się z mniejszą wartością ciśnienia promieniowego w porównaniu z ciśnieniem osiowym. Wielkość rozprężenia określa się wzorami (53 i 54):

$$r_0 = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 = \frac{H_1 - H_0}{H_0} * 100\% \quad (53)$$

$$r_p = \frac{\Delta D}{D_0} * 100 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} * 100\% \quad (54)$$

gdzie: r_0 i r_p - rozprężenie osiowe i promieniowe, H_1 i D_1 - wysokość i średnica wypraski po wypchnięciu jej z matrycy, H_0 i D_0 - wysokość i średnica wypraski przed usunięciem ciśnienia prasowania

Znajomość zależności rozprężenia od własności proszków, składu mieszanki i warunków prasowania ma ogromne znaczenie praktyczne przy projektowaniu matryc dla właściwego doboru wymiarów komory matrycy. Rozprężenie może być czasami przyczyną powstawania pęknięć lub rozwarstwień wypraski wskutek zmniejszania powierzchni styków między cząstkami. Rozprężenie zależy od ziarnistości proszku, kształtu ziarn, zawartości tlenków, twardości ziarn oraz ciśnienia prasowania i stosowanych środków poślizgowych. Rozprężenie jest tym większe im twardszy jest proszek.

Dla większości proszków rozprężenie zmienia się wraz z ciśnieniem prasowania. W zakresie niskich ciśnień prasowania do $4 T/cm^2$ (400 MPa) rozprężenie rośnie ze wzrostem ciśnienia, od 4 do $8 T/cm^2$ (od 400 do 800 MPa) rozprężenie jest stałe i nie zależy od ciśnienia, a powyżej $8 T/cm^2$ (800 MPa) rozprężenie maleje, ponieważ zwiększa się odkształcenie plastyczne materiału i rośnie wytrzymałość wyprasek.

Zmniejszenie ziarnistości proszków i zwiększenie zawartości tlenków zwiększa wartość rozprężenia.

Rozprężenie można zmniejszyć przez dodatek środków poślizgowych powierzchniowo-aktywnych: stearynianów i kwasu stearynowego.

3.6. Czynniki wpływające na proces prasowania i gęstości uzyskanych wyprasek

Na proces prasowania i gęstości uzyskanych wyprasek wpływają:

1. Charakterystyka proszków
2. Stosowanie mieszanek proszków
3. Wymiary wyprasek
4. Stosowanie środków poślizgowych
5. Parametry procesu prasowania

ad. 1. Gęstość wyprasek przy jednakowym ciśnieniu prasowania zależy od wielkości cząstek. Im bardziej drobnoziarnisty proszek, tym gęstość wypraski niższa.

Proszki drobnoziarniste charakteryzują się dużym współczynnikiem tarcia wewnętrznego, co wywołuje straty ciśnienia prasowania. Na proces prasowania wpływa również kształt cząstek i stopień utlenienia. Im bardziej rozwinięta powierzchnia cząstek i stopień utlenienia większy, tym niższa jest gęstość wyprasek.

ad. 2. Częstym przypadkiem w praktyce metalurgii proszków jest prasowanie mieszanek proszków złożonych z dwóch lub więcej składników. Wpływ dodatków na własności prasownicze zależy od ich rozdrobnienia, twardości i własności smarujących, np. do żelaza często dodaje się miedź i grafit, który działa jako środek poślizgowy i tym samym polepsza się zgęszczalność proszków. Ogólnie można powiedzieć, że proszki stopowe posiadają gorsze własności prasownicze niż czyste metale.

ad. 3. Zwiększenie wysokości wypraski powoduje zwiększenie strat na pokonanie tarcia i wymaga wzrostu ciśnienia prasowania, np. przy prasowaniu żelaza Hametag zwiększenie stosunku h/d z 1 do 3 wymagało dla osiągnięcia takiej samej gęstości zwiększenia ciśnienia ponad dwa razy. W przypadku dużej wartości stosunku h/d , występuje znaczna nierówno mierność gęstości na przekroju wypraski.

ad. 4. W praktyce prasowania często wprowadza się środki poślizgowe celem polepszenia prasowności proszku. Środki poślizgowe wpływają na:

1. Zmniejszenie tarcia wewnętrznego i zewnętrznego
2. Zmniejszenie ciśnienia wypychania
3. Zmniejszenie skłonności przyczepiania się ziarn do ścianek matrycy i jej zużycie

Środki poślizgowe dzieli się na dwie grupy:

- obojętne (wazelina, gliceryna, parafina, itp.)
- powierzchniowo-aktywne (kwas stearynowy, oleinowy, stearyniany cynku, litu, wapnia, itd.)

Środki poślizgowe wprowadza się do mieszanek zazwyczaj w postaci roztworów w organicznych rozpuszczalnikach (benzyna, benzen, czterochlorek węgla), które przy suszeniu wymieszanego wsadu odparowują. Stearyniany i kwas stearynowy mogą być wprowadzone w postaci proszków. Istnieją dwie możliwości wprowadzania środków poślizgowych:

- smarowanie ścianek matrycy
- wprowadzanie środków poślizgowych do proszku i wymieszanie

Ilość wprowadzonych środków poślizgowych zależy od wielkości cząstek proszku, ciśnienia prasowania i wielkości powierzchni tarcia (powierzchni styku proszku ze ściankami matrycy).

Środki poślizgowe obojętne wpływają jedynie na współczynnik tarcia i nie uczestniczą w samym procesie odkształcenia ziarn proszku. wprowadza się je w ilości od 0,5 do 1,5% masowych.

Środki powierzchniowo-aktywne oprócz zmniejszenia tarcia wpływają na ułatwienie deformacji cząstek proszku. Drobinę środka poślizgowego wnikają w mikroszczeliny na powierzchni cząstek i ułatwiają odkształcenie plastyczne.

Przy ocenie wpływu środków poślizgowych na proces prasowania należy uwzględnić ich oddziaływanie na gęstość nasypową, sypkosć mieszanek, własności wyprasek i spieków. Środki poślizgowe nie powinny obniżać własności technologicznych oraz zmieniać składu chemicznego porowatego materiału.

ad. 5. Zasadniczy wpływ na gęstość i wytrzymałość wyprasek posiadają: szybkość prasowania i czas działania nacisku. Mniejsza szybkość prasowania powoduje uzyskanie wyprasek o wyższej gęstości. Wytrzymanie pod obciążeniem doprowadza do większych odkształceń plastycznych na stykach ziarn i gęstość nieznacznie wzrasta. Praktycznie stosuje się czas działania 20-30 sek., co wywołuje wzrost gęstości wyprasek, np. dla Fe o 2-3%. Otrzymanie wyprasek o wysokiej gęstości rzędu 95%, wymagałoby stoso-

wania wysokich ciśnień, np. dla Fe do 10 T/cm² (1000 MPa). Natomiast w warunkach produkcyjnych ciśnienie prasowania nie powinno przekraczać 5 do 6 T/cm² (500-600 MPa). Celem uzyskania wysokiej gęstości i nie dopuszczenia do zbyt dużego zużycia narzędzi stosuje się dwukrotne prasowanie i spiekanie. Końcowa gęstość uzyskanego elementu zależy przede wszystkim od ciśnienia pierwszego i drugiego prasowania. Spiekanie pomiędzy pierwszym a drugim prasowaniem doprowadza do usunięcia zgniotu, co umożliwia osiągnięcie wysokich gęstości po drugim prasowaniu.

3.7. Wytrzymałość wyprasek

Wytrzymałość wyprasek związana jest z wzajemnym zazębaniem się i zaczepianiem cząstek oraz działaniem międzyatomowych sił przyciągania, których wielkość uzależniona jest od powierzchni styku między cząstkami. Te czynniki, które doprowadzają do powstania większej powierzchni styków, zwiększają również wytrzymałość wypraski. Wzajemne przyleganie cząstek związane jest z ich odkształceniem plastycznym. Tak więc wypraski wykonane z materiału o większej plastyczności będą posiadały większą wytrzymałość w porównaniu z wypraskami wykonanymi z materiału twardego (przy tym samym ciśnieniu prasowania), gdyż przy tym samym ciśnieniu prasowania w wyprasce z materiału plastycznego będzie większa powierzchnia styków międzycząsteczkowych w porównaniu z materiałem twardym. Ponadto rozprężenie wypraski po wypchnięciu jej z matrycy doprowadza do zmniejszenia powierzchni styków, a jak wiadomo, im twardszy materiał, tym większe rozprężenie. Warstwy tlenków i obecność zbyt dużej ilości środków poślizgowych utrudniają tworzenie się metalicznych złącz, a tym samym obniżają wytrzymałość wyprasek. Wytrzymałość wyprasek w dużej mierze zależy od ciśnienia prasowania. W miarę wzrostu ciśnienia prasowania rośnie gęstość wyprasek, a tym samym i ich wytrzymałość. Obok ciśnienia prasowania bardzo duży wpływ na wytrzymałość wyprasek ma wielkość i kształt ziarn proszku. Proszki drobnoziarniste o rozwiniętej powierzchni charakteryzujące się niską gęstością nasypową, dają wypraski o wyższej wytrzymałości w porównaniu z proszkami o regularnym kształcie i grubym ziarnie sprasowanymi na taką samą gęstość. Własności wyprasek wykazują anizotropię, co wynika z nierównomiernego rozkładu naprężeń podczas prasowania. Ponieważ siły działające zgodnie z kierunkiem prasowania są większe od sił działających w kierunku promieniowym, odpowiednio wyższe są także własności wypraski w kierunku zgodnym z kierunkiem prasowania. Wzrost ciśnienia prasowania wpływa także na zmniejszenie anizotropii. Anizotropia wzrasta w przypadku proszków metali o mniejszej plastyczności.

3.8. Wady wyprasek i przyczyny ich powstania

Do najczęściej spotykanych wad wyprasek należą pęknięcia zarówno w kierunku prasowania jak i w kierunku do niego prostopadłym. Przyczyny pęknięć i rozwarstwień są różne. Można do nich zaliczyć:

- stosowanie proszków o gładkich regularnych ziarnach i dużej gęstości nasypowej
- duży stopień utlenienia
- wprowadzenie zbyt dużej ilości środków poślizgowych

Wszystkie wymienione powyżej czynniki przyczyniają się do obniżenia wytrzymałości wyprasek.

Przyczyną pęknięć może być także za wysokie ciśnienie prasowania twardych proszków o dużym rozprężeniu, a także nierównomierne rozłożenie w całej objętości wypraski domieszek lub poszczególnych składników mieszanki proszków, nierównomierne zasypanie proszku przy prasowaniu wyprasek o skomplikowanym kształcie. Wystąpieniu pęknięć sprzyja także niewłaściwa konstrukcja matrycy, mała gładkość powierzchni ścianek matrycy.

Obok pęknięć mogą wystąpić też wykruszenia szczególnie przy niskich ciśnieniach prasowania, złej formowalności proszków i dużej wysokości wypraski.

3.9. Wykonanie ćwiczenia

1. Odważyć z dostarczonego proszku 9 naważek po 6 g każda.
2. 65 g tego samego proszku zmieszać dokładnie w porcelanowym moździerzu z dodatkiem środka poślizgowego (gliceryna) w ilości 1% i podzielić na 9 naważek po 6 g każda.
1 kropla gliceryny waży 0,0324 g

3. Sprasować z każdej partii po trzy próbki stosując następujące ciśnienia prasowania: 0,75; 1,5; 4 T/cm² (75 MPa; 150 MPa; 400 MPa)
4. Określić objętość otrzymanych wyprasek metodą geometryczną, po czym zważyć je z dokładnością do 0,0002 g.
5. Określić gęstość rzeczywistą sprasowanych próbek.
6. Wyniki przedstawić w sposób tabelaryczny i na wykresie. Sporządzić wykres: $\rho=f(p)$ zarówno dla próbek ze środkiem poślizgowym jak i bez środka poślizgowego.
7. Porównać otrzymane wyniki i uzasadnić je
8. Opisać dokładnie przebieg ćwiczenia
9. Próbki zachować do następnego ćwiczenia.