

## Rozdział 3.

### TECHNOLOGIA WYTWARZANIA POROWATYCH SPIEKÓW

W rozdziale tym omawia się podstawowe fazy technologii wytwarzania spieków z proszków metali. Wskazuje się na najważniejsze parametry wpływające na przebieg procesu technologicznego i charakteryzuje się parametry materiału wyjściowego proszku oraz parametry procesu decydujące o końcowych własnościach spiekanych elementów.

Wytwarzanie konstrukcyjnych wyrobów spiekanych metodą metalurgii proszków obejmuje trzy podstawowe fazy:

- 1° przygotowanie proszku,
- 2° formowanie (prasowanie),
- 3° spiekanie.

Omówiono także sposoby uszlachetniającej obróbki uzupełniającej, poprawiającej własności fizyko-mechaniczne spieków. Pominęto natomiast charakterystykę metod wytwarzania proszków, zakładając, że takim materiałem wyjściowym przemysł dysponuje, zarówno z importu jak również produkowanym w kraju [1].

#### 3.1. Formowanie (prasowanie).

Formowanie elementów konstrukcyjnych z proszków polega na wykonaniu takich zabiegów technicznych aby otrzymać wyrób (wypraszkę) o żądanym kształcie i wytrzymałości, umożliwiającą proces spiekania oraz zdolny do dalszej obróbki. Jest ono najbardziej odpowiedzialną operacją technologii metalurgii proszków.

Ze względu na temperaturę stosowaną w procesie formowania wyróżnić można:

- formowanie na zimno,
- formowanie na gorąco.

W praktyce przemysłowej najczęściej stosowane jest formowanie na zimno. Spośród wielu metod formowania na zimno (różne rodzaje prasowania, walcowanie, odlewanie gęstwy, wibracyjne zagęszczenie, kucie, formowanie udarowe), ze względów ekonomicznych i technicznych najbardziej rozpowszechnione jest prasowanie w zamkniętych matrycach, które omówimy tutaj szerzej.

#### ⊗ Sposoby prasowania na zimno w zamkniętych matrycach.

W procesie prasowania w zamkniętych matrycach dąży się przede wszystkim do tego, by otrzymywane wypraski wykonane były na gotowo (tzn. aby element uzyskiwał ostateczny kształt lub podlegał minimalnej obróbce wykończającej). Ponadto wymaga się, aby wypraski posiadały równomierną gęstość i żądane własności mechaniczne a użyte w procesie prasowniki były możliwie proste, trwałe i niezawodne.

Zasady projektowania kształtu spieków powinny zatem uwzględniać następujące zalecenia:

- kształt części powinien umożliwiać wypchnięcie jej z matrycy,
- wymiary części w kierunku prasowania powinny mieścić się w określonych granicach (maksymalna wysokość powinna wynosić nie więcej niż 2,5-krotną wielkość średnicy; minimalna grubość kształtki nie powinna być mniejsza niż 2 mm),
- proszek nie powinien być zasypywany pomiędzy blisko siebie położone ścianki, wąskie szczeliny i ostre naroża,
- część nie powinna posiadać dużych występow i wgłębień, które mają być formowane górnym stemplem,
- kształt prasowanej części powinien umożliwiać użycie trwałych narzędzi bez nagłych zmian przekroju, bez ostrych naroży w matrycach i na stemplach,
- stemple powinny podierać kształtkę na wystarczająco dużej powierzchni by uniknąć nadłamań podczas wypychania z matrycy.

Stosowane w praktyce przemysłowej metody prasowania proszku w zamkniętych matrycach można, w sposób ogólny

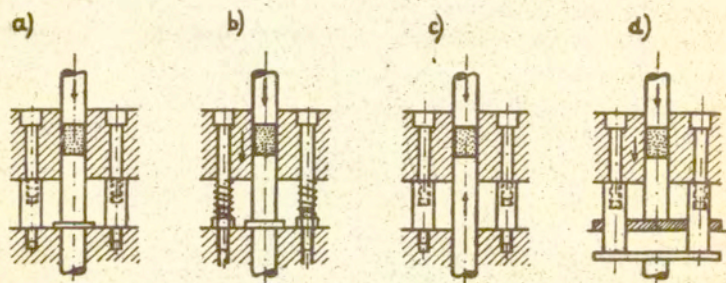
podzielić:

ze względu na kierunek poruszania się tłoków (rys.3.1) :

- prasowanie jednostronne,
- prasowanie swobodne,
- prasowanie dwustronne,
- prasowanie sterowane,

ze względu na stopień złożoności stempli:

- prasowanie z niedzielnymi stemplami
- prasowanie ze stemplami dzielonymi.



Rys. 3.1. Podstawowe rodzaje prasowania: a) jednostronne, b) swobodne, c) dwustronne przeciwbieżne, d) sterowane (dwustronne współbieżne).

O możliwości użycia wymienionych metod prasowania kształtek decyduje przede wszystkim stopień trudności ich wykonania, tzn. stopień złożoności ich kształtu i charakterystyczne wymiary części.

Prasowanie jednostronne (rys.3.1a) polega na zgęszczaniu zasypanego do matrycy proszku przez wywieranie na proszek nacisku górnym, ruchomym stemplem, przy nieruchomym stemple dolnym i nieruchomej matrycy. Metodę tę stosuje się przy prasowaniu cienkich kształtek o stałej grubości, dla których stosunek wysokości do średnicy jest mniejszy od jedności lub stosunek wysokości do grubości ścianki jest mniejszy od trzech.

W pozostałych wypadkach stosowane jest prasowanie dwustronne (dwustronne przeciwbieżne, swobodne, sterowane), przy czym stosunek wysokości do średnicy wypraski nie powinien przekraczać 10. Umożliwia to uzyskanie równomiernego zgęszczenia w całej objętości wypraski.

Prasowanie swobodne (rys.3.16) uzyskuje się poprzez stworzenie możliwości przemieszczania się matrycy względem nieruchomego dolnego stempla pod wpływem sił tarcia proszku o jej ścianki w trakcie prasowania stemplem górnym na prasach jednostronnego działania.

W prasowaniu dwustronnym przeciwbieżnym (rys.3.1c) proszek znajdujący się w matrycy jest prasowany jednocześnie górnym i dolnym stemplem.

Podczas prasowania sterowanego (rys.3.1d), podobnie jak w prasowaniu swobodnym, przemieszczają się współbieżnie zarówno stempel górny i matryca a stempel dolny pozostaje nieruchomy. Różnica polega na tym, że ruch matrycy jest wymuszony. Efekt prasowania dwustronnego osiąga się przez dwukrotnie szybsze przemieszczanie stempla górnego niż matrycy.

Prasowanie sterowane jest najbardziej niezawodną metodą prasowania i dlatego używane jest do otrzymywania części o najbardziej złożonych kształtach.

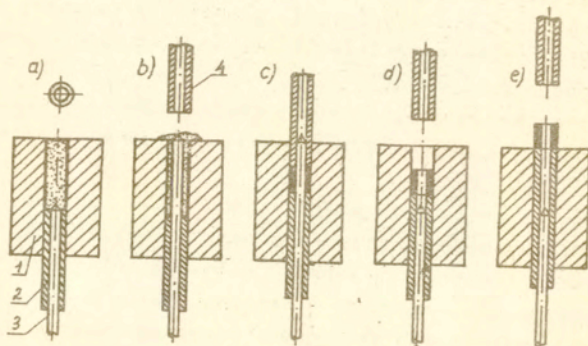
Prasowanie tulei cienkościennych o stosunku wysokości do grubości ścianki mniejszym od 20, z uwagi na szczególne trudności pojawiające się przy zasypywaniu i zgęszczaniu proszku, wymaga stosowania specjalnych metod, np. prasowania swobodnego z przebicciem proszku ruchomym rdzeniem, rys.3.2. Zasypywany do matrycy proszek jest przebijany ruchomym rdzeniem, który stanowi jednocześnie rdzeń tulei i jest on wycofywany po sprasowaniu elementu.

Części o różnej wysokości prasowania wykonywane są w prasownikach z dzielonymi stemplami. Jeżeli różnica wysokości wypraski jest niewielka stosuje się dzielony dolny stempel, przy większych różnicach wysokości wymaga się możliwości sterowania ruchem poszczególnych części stempla.

Przy prasowaniu kształtek o bardziej złożonych kształtach, często z przesunięciem części proszku, zachodzi konieczność stosowania podziału również górnego stempla.

Typowym zagadnieniem produkcji spiekanych części maszyn

jest prasowanie kształtek z kołnierzami. Kształtki z kołnierzami zewnętrznymi prasowane są zarówno w prasownikach z niedzielonymi jak i dzielonymi stemplami. Szczegółowe rozwiązania techniczne przedstawiono w pracy [2].



Rys. 3.2. Schemat prasowania tulei cienkościennych.  
a) dozowanie proszku, b) przebicie, c) prasowanie,  
d) wyciągnięcie rdzenia, e) wypchnięcie wypraski,  
1-matryca, 2-stempel dolny, 3-rdzeń, 4-stempel górny.

● Mikro- i makroefekty występujące podczas prasowania.

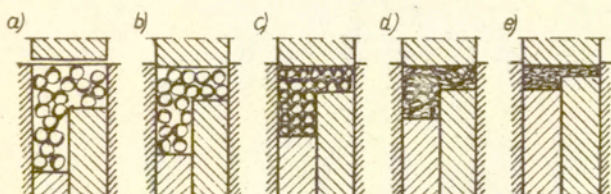
Zjawiska występujące w trakcie procesu prasowania można śledzić z dwóch punktów widzenia: w mikro- i makroskali.

W skali mikro, tj. w odniesieniu do pojedynczych ziaren, istotne są następujące zjawiska:

- 1<sup>o</sup> zbliżenie ziaren na odległość działania sił adhezji,
- 2<sup>o</sup> powiększenie powierzchni styku ziaren przez ich wzajemne zbliżenie,
- 3<sup>o</sup> wzrost powierzchni styku wskutek trwałych odkształceń,
- 4<sup>o</sup> mechaniczne ząbienie się ziaren proszku,
- 5<sup>o</sup> usuwanie powłok tlenkowych,
- 6<sup>o</sup> powstanie lokalnych skoków temperatury,

7° zgniot proszku prowadzący do odkształceń lub pęknięć.

Zjawiska w skali mikro obserwowane podczas prasowania wpływają w sposób istotny na zmianę własności globalnych wyprasek. Obrazuje to model Seeliga (rys.3.3) formowania wypraski o dużej gęstości, w którym ziarnom proszku odpowiada-  
ją gumowe kulki, [2].



Rys.3.3. Etapy prasowania wg modelu Seeliga.

Luźno zasypyany proszek jest poddany naciskowi stempla (a), pokonywana jest siła tarcia, załamują się mostki (układy cząstek powodujące istnienie luk w masie proszku) (b), (c). Dalsze działanie siły powoduje odkształcenia sprężyste i plastyczne ziaren (d), (e) oraz równoczesny wzrost spójności wypraski w miarę wzrostu gęstości.

W skali makro, a więc z punktu widzenia globalnych cech wyprasek, największe znaczenie mają:

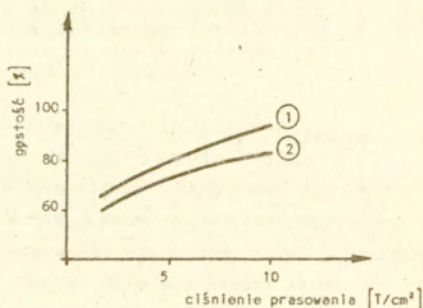
- 1° zmiany gęstości materiału i jego jednorodność,
- 2° sprężyste odkształcenia wyprasek,
- 3° zmiany własności mechanicznych.

Własności te uzależnione są ściśle od parametrów technologicznych prasowania (ciśnienie prasowania, szybkość i czas działania nacisku i siły wypychania) oraz od własności proszku (rozkład wielkości ziaren, kształt i własności powierzchni ziaren).

### ● Zmiana gęstości i porowatości. Rozkład gęstości.

W produkcji części maszyn drogą metalurgii proszków dąży się do uzyskiwania części o możliwie dobrych własnościach wytrzymałościowych (zbliżonych do własności materiałów litych) co związane jest z koniecznością uzyskiwania dużych gęstości wyprasek.

Parametrem technologicznym, który we wszystkich rodzajach prasowania decyduje o gęstości uzyskiwanych wyprasek jest ciśnienie prasowania. W miarę zwiększania ciśnienia intensyfikują się ostatnie fazy zgęszczania. Na rys.3.4 podano przykładową zależność średniej gęstości od ciśnienia prasowania [2].



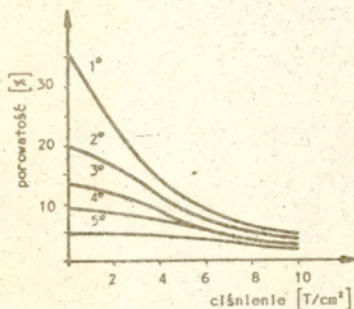
Rys.3.4. Zmiany gęstości wypraski w zależności od ciśnienia prasowania dla: 1 - proszku Hametag, 2 - proszku zredukowanego.

Najszybciej zagęszczanie zachodzi na początku procesu, dla niewielkich ciśnień prasowania. Dla większych ciśnień gęstość wzrasta wolniej.

Z uwagi na trwałość urządzeń prasowniczych ciśnienia w praktyce nie przekraczają 10T/cm<sup>2</sup>, co stanowi barierę uzyskiwania wyższych gęstości w jednokrotnym prasowaniu. Należy zaznaczyć, że drogą prasowanie dwustronnego uzyskuje się większe gęstości niż w prasowaniu jednostronnym.

Inną drogą osiągnięcia dużych gęstości jest prasowanie dwukrotne, które pozwala na osiągnięcie 94-95% gęstości me-

teriału litego. Zmiany porowatości w drugim prasowaniu dla różnych wartości ciśnień pierwszego prasowania, dla prozku żelaza, podano na rys.3.5, [3].



Rys.3.5. Zmiany porowatości przy drugim prasowaniu. Ciśnienie pierwszego prasowania: 1° - 1,5T/cm<sup>2</sup>, 2° - 3T/cm<sup>2</sup>, 3° - 5T/cm<sup>2</sup>, 4° - 7T/cm<sup>2</sup>, 5° - 10T/cm<sup>2</sup>.

Z przebiegu zależności widać, że największą zmianę gęstości podczas drugiego prasowania uzyskuje się przy małych i średnich ciśnieniach pierwszego prasowania.

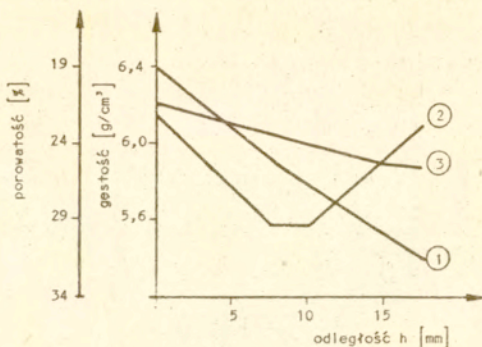
Innymi, mniej istotnymi parametrami wpływającymi na gęstość są szybkość prasowania i czas działania nacisku. Końcowa gęstość wypreski różnie przy mniejszych szybkościach prasowania, co związane jest z możliwością ewakuacji gazów z przestrzeni por.

Wzrost czasu działania nacisku (w pewnym jego zakresie) powoduje zwiększenie gęstości.

W wyniku istnienia tarcia wewnętrznego proszku oraz tarcia o ściany matrycy nacisk stempla nie rozchodzi się równomiernie. Jest to powodem nierównomiernego rozkładu gęstości zgęszczanego proszku. Ważny wpływ na jednorodność gęstości ma metoda prasowania oraz stosowanie środków poślizgowych.

Dodatek środka poślizgowego (krzywa 1), jak też zastosowanie prasowania dwustronnego (krzywa 3) pozwala na znaczne zmniejszenie rozrzutu gęstości wypraski w kierunku prasowania, rys.3.6 [3].





Rys.3.6. Gęstość i porowatość wypraski w kierunku prasowania 1 - dla prasowania jednostronnego, 2 - dla prasowania dwustronnego, 3 - dla prasowania jednostronnego ze środkiem poślizgowym.

Obok parametrów technologicznych prasowania o gęstości i jednorodności kształtki decydują własności proszków. Z tego względu proszek na wsad może być po wyprodukowaniu poddany szeregu operacjom modyfikującym jego własności.

Własności wyprasek w istotny sposób zależą od rozkładu wielkości ziaren, kształtu i własności powierzchniowych ziaren oraz składu chemicznego proszku i ilości dodatków poślizgowych.

Gęstość wypraski rośnie ze wzrostem rozdrobnienia proszku, jednakże z uwagi na wzrost powierzchni właściwej ustala się optymalny dla poszczególnych proszków rozkład wielkości ziaren.

Istotny wpływ na proces zgęszczania proszku ma kształt ziaren i stopień rozwinięcia ich powierzchni. Ponieważ kształt ziaren jest ściśle związany z metodą otrzymywania proszku często modyfikuje się kształt ziaren (sferoidyzacja) lub miesza się proszki otrzymywane różnymi metodami. Na rys. 3.4 widoczna jest różnica zgęszczalności proszków Hametag i zredukowanego.

Inną możliwością poprawy zgęszczalności proszku jest modyfikacja jego składu chemicznego lub dodanie środków poślizgowych. Najczęściej proszki żelaza wzbogaca się dodaniem miedzi (lub mosiądzu) co powoduje wzrost gęstości, polepszenie warun-

ków prasowania i spiekania oraz, co najważniejsze, wzrost własności mechanicznych spieków.

Efektywną metodą zwiększania gęstości podczas prasowania jest dodanie środków poślizgowych do proszku. Środki te powodują jednak pogorszenie formowalności proszku i pogorszenie własności mechanicznych wypraski. Należy to uwzględnić w doborze ilości i rodzaju środka poślizgowego (np. optymalna zawartość stearynianu cynku w proszkach żelaza wynosi 0,5-1,1% a łączna ilość środków poślizgowych nie powinna przekraczać 1,5%). Stosuje się również środki pośliz\_gowe do smarowania ścian matrycy.

Dla ciśnień średnich (do około 6T/cm<sup>2</sup>) bardziej efektywne jest wprowadzenie dodatków poślizgowych wymieszanych z proszkiem. Przy wyższych ciśnieniach prasowania większe gęstości uzyskuje się przez smarowanie ścian matrycy.

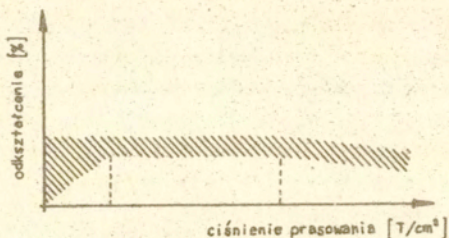
#### ● Odkształcenia sprężyste wyprasek.

Właściwe projektowanie procesu wytwarzania części maszyn drogą spiekania proszków metali wymaga uwzględnienia zmiany wymiarów elementów prasowanych po usunięciu nacisku stempla i wypchnięciu kształtki z matrycy. O wielkości odkształceń, będących następstwem sprężystych własności prasowanego proszku, decydują zarówno ciśnienie prasowania jak i własności proszku: ziarnistość, kształt ziaren, twardość ziaren, skład fizykochemiczny .

Na rys.3.7 [3] podano charakter zależności odkształceń względnych po prasowaniu od ciśnienia prasowania.

Największe odkształcenia występują przy średnich ciśnieniach prasowania - do około 8T/cm<sup>2</sup>. Przy małych ciśnieniach oraz ciśnieniach wyższych od 8T/cm<sup>2</sup> odkształcenia są mniejsze.

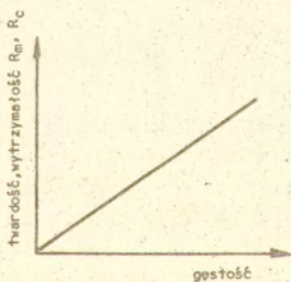
Efektywną metodę zmniejszania wielkości odkształceń sprężystych jest stosowanie środków poślizgowych, np. stearynianu cynku lub kwasu stearynowego.



Rys.3.7. Względne zmiany wymiarów wypraski po usunięciu nacisku.

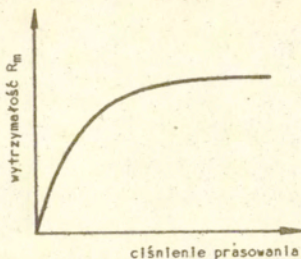
● Zmiana własności mechanicznych.

Własności mechaniczne wyprasek zależą głównie od ich gęstości, rys.3.8 [3]. Zależą one zatem od tych samych czynników, które decydują o zmianie gęstości w procesie prasowania, tj. parametrów technologicznych i własności proszków.

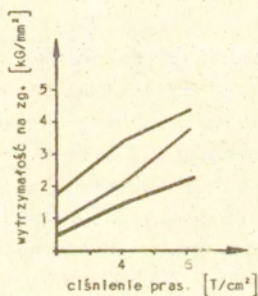


Rys.3.8. Zależność własności mechanicznych wypraski od gęstości.

Jako przykład podano zależności wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na zginanie od ciśnienia prasowania, rys. 3.9 i 3.10, [3], [2].



Rys.3.9. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od ciśnienia prasowania.



Rys.3.10. Zmiany wytrzymałości na zginienie w zależności od ciśnienia prasowania przy różnych temperaturach żarzenia proszku.

Rysunek 3.10 jest jednocześnie przykładem wpływu własności proszków (w tym przypadku wynikających z różnych temperatur żarzenia proszku) na własności mechaniczne wypraski (wytrzymałość na zginienie).

Można podkreślić, że negatywny wpływ na własności mechaniczne wyprasek mają dodatki poślizgowe. Nawet przy zawartości ok. 1% tych dodatków wytrzymałość może obniżyć się o ok. 40%.

### 3.2. Spiekanie.

Spiekanie jest podstawową operacją wykończającą w procesie wytwarzania elementów konstrukcyjnych z proszków metali. Polega ono na nagraniu sprasowanej kształtki do temperatury spiekania, niższej od temperatury topnienia metalu i wytrzymaniu w tej temperaturze przez pewien ściśle określony czas. Jego celem jest uzyskanie pożądaných końcowych własności fizyko-mechanicznych, które w czasie tego procesu powinny się zbliżyć do własności materiału litego.

Spiekaniu towarzyszy cały szereg procesów takich jak objętościowa i powierzchniowa dyfuzja, wypalanie i odparowywanie środków smarujących, wydzielanie gazów zaabsorbowanych w wierzchnich warstwach ziaren, redukcja tlenków, rekrytalizacja itp. Podczas tego procesu zachodzą jakościowe zmiany styków pomiędzy ziarnami proszku (styk powierzchni metalicznych zamiast styku powierzchni utlenionych, zmniejszenie lub usunięcie naprężeń, zmiana powierzchni styku itp).

Charakterystycznymi cechami procesu spiekania są:

- zwiększenie ruchliwości atomów (dyfuzja),
- zmiana wymiarów i porowatości wypraski (skurcz),
- zmniejszenie lub usunięcie naprężeń (relaksacja),
- redukcja tlenków powierzchniowych,
- zmiana powierzchni styku ziaren,
- rekrytalizacja,
- przemieszanie i reorientacja cząstek.

Efektom końcowym procesu spiekania jest termodyfuzyjne i plastyczne zespolenie uprzednio sprasowanego proszku.

#### ● Termomechaniczne mechanizmy procesu spiekania.

Spiekanie jest procesem termodyfuzyjnym i termoplastycznym. W wyniku podgrzania wypraski następuje zwiększenie ruchliwości atomów oraz związana z tym termodyfuzja czyli przemieszczanie się cząstek w strukturze wewnętrznej wypraski.

Struktura metali w stanie stałym charakteryzuje się budową krystaliczną. Sieć przestrzenna kryształu stanowi wie-

lokrotne powtórzenie komórek elementarnych. Metale stanowią twory polikrystaliczne t.j. składają się z dużej liczby pojedynczych kryształów o rozmaitej orientacji sieci przestrzennej, w których w rzeczywistości występują różne defekty. Część tych defektów jest pochodzenia cieplnego. Do defektów cieplnych należą przede wszystkim: puste węzły (wakanse) i atomy dyslokowane (przemieszczone). Mogą także wystąpić zaburzenia pochodzenia mechanicznego jak dyslokacje krawędziowe czy śrubowe, spowodowane działaniem sił zewnętrznych np. podczas prasowania.

Ruchliwość atomów w temperaturze pokojowej jest stosunkowo mała i stan sieci krystalicznej, mimo zdeformowania spowodowanego prasowaniem, można uznać za ustabilizowany. Dopiero ze wzrostem temperatury wzrasta energia atomów oraz ich ruchliwość. Rozpoczyna się wtedy termodyfuzyjne przemieszczanie atomów, a w wyższych temperaturach także termoplastyczne płynięcie masy.

W procesie spiekania proszków metali wyróżnić więc można następujące sposoby transportu masy wewnątrz wyprasek:

- dyfuzja powierzchniowa,
- dyfuzja przestrzenna,
- płynięcie termoplastyczne.

#### Dyfuzja powierzchniowa

występuje w temperaturze około 0,3 bezwzględnej temperatury topnienia metalu. Atomy poruszają się od powierzchni wypukłych, na których są słabiej związane z kryształem, w kierunku miejsc wklęsłych, gdzie wiązania atomu z kryształem są silniejsze. Ponadto pewien procent atomów, szczególnie tych na powierzchniach wypukłych, uzyskuje energię dostateczną dla ich ucieczki z powierzchni. Atomy te zostają przygarnięte przez sąsiednie powierzchnie (szczególnie wklęsłe). Zjawisko to przypomina w swoim charakterze proces parowania i kondensacji.

#### Dyfuzja przestrzenna

ma miejsce w temperaturze powyżej 0,5 bezwzględnej temperatury topnienia metalu. Występują wtedy drgania o dużej amplitudzie atomów w całej objętości ziarna.

Duża ruchliwość atomów umożliwia ich przeskoki z jednego kryształu posiadającego ich niedwiar w drugi, który ma miejsca niezapełnione atomami. Przemieszczanie atomów następuje tu do órodkie ziaren i dlatego zjawisko to nazywa się dyfuzją przestrzenną, w odróżnieniu od dyfuzji powierzchniowej, charakteryzującej się ruchem atomów po powierzchni ziaren.

#### Płynięcie termoplastyczne

następuje w wyniku jednoczesnego działania pola naprężeń i pola temperatury. Miejsce spiętrzenia naprężeń stanowią wierzchołki stykających się ziaren w sprasowanej kształtce. W wyniku działania dodatkowo pola temperatury w procesie spiekania wyężenie materiału w takich wierzchołkach osiąga stan graniczny. W miejscach, w których wyężenie przekracza stan graniczny następuje płynięcie materiału i przemieszczanie się masy. Zjawisku temu towarzyszy zaokrąglenie się ziaren, zmniejszanie się porowatości wskutek wypełnienia luk, ma miejsce skurcz kształtek i solidyzacja órodką.

#### Rekrytalizacja

jest zjawiskiem przebiegającym równolegle z termodyfuzją atomów i płynięciem plastycznym. Polega ona na odbudowywaniu się sieci krystalicznych w wyniku termodyfuzji i procesu relaksacji czyli zmniejszania się lub znikania naprężeń w ziarnach.

Proces spiekania wyprasek można podzielić na trzy stadia. Pierwsze stadium, kiedy powierzchnie styku ziaren proszku po sprasowaniu związane są siłami adhezji. Stadium to istnieje w temperaturze pokojowej i nieco wyższej. Drugie stadium, kiedy ziarna proszku zespolone są na niewielkiej powierzchni siłami wiązań atomowych. Faza ta ma miejsce podczas spiekania w temperaturze około 0,25 bezwzględnej temperatury topnienia metalu i nieco wyższej. Obserwuje się w tym stadium wzrost gęstości i wytrzymałości wypraski, w przybliżeniu proporcjonalny do wzrostu metalicznej powierzchni styku ziaren. Trzecie stadium ma miejsce, gdy następuje zmniejszenie porowatości wskutek plastycznego płynięcia wierzchołków i chropowatości ziaren. Większość porów dąży do skogulowania, natomiast największe z

nich przejawiają skłonność do rozrastania się w wyniku czego następuje zmniejszenie ilości porów.

Spiekanie ma podstawowe znaczenie w technologii wyrobów ze sprasowanych metali. Stąd też wiele prac poświęca się teoretycznym i praktycznym badaniom zmierzającym do szczegółowego poznania zjawisk towarzyszących temu procesowi. Jak dotąd brak jest jednolitej teorii, która w sposób kompleksowy opisywałaby cały proces spiekania

### ● Metody i charakterystyczne parametry procesu spiekania.

Wyróżnia się dwie zasadnicze metody procesu spiekania:

- 1<sup>o</sup> bez działania zewnętrznych sił mechanicznych zwane spiekanem swobodnym,
- 2<sup>o</sup> z działaniem dodatkowych zewnętrznych sił mechanicznych.

Swobodne spiekanie kształtek uformowanych na zimno polega na umieszczeniu ich w piecu na półkach, teckach lub ruchomym ruszcie celem poddania ich określonemu programowi temperaturowo-czasowemu. Następnie spiek studzi się przez określony czas do żądanej temperatury końcowej w piecu po czym wyjmuje się. Cały proces spiekania swobodnego odbywa się w odpowiedniej atmosferze ułatwiającej proces spiekania i pozwalającej na otrzymanie pożądanego składu chemicznego.

Spiekanie pod obciążeniem tj. przy działaniu dodatkowych zewnętrznych sił mechanicznych wiąże się najczęściej z procesem formowania gotowego wyrobu w podwyższonej temperaturze np. łucie, walcowanie, prasowanie na gorąco.

Bardziej rozpowszechniona i technicznie łatwiejsza w realizacji jest produkcja spieków poprzez prasowanie na zimno a następnie spiekanie swobodne. Dlatego też więcej miejsca w literaturze poświęca się spiekaniu swobodnemu niż formowaniu kształtek na gorąco.

Spiekanie swobodne może się odbywać:

- w atmosferze nieaktywnej,
- w obecności dodatkowych czynników aktywnych.



W pierwszym przypadku głównymi parametrami spiekania są temperatura i czas spiekania. W drugim przypadku oprócz wyżej wymienionych parametrów istotny wpływ na końcowy efekt spiekania mają dodatkowe czynniki aktywizujące ten proces takie jak:

- 1<sup>o</sup> uprzednie zaktywizowanie samych proszków,
- 2<sup>o</sup> czynniki chemiczne, których celem jest przyspieszenie lub spowalnianie (w zależności od potrzeby) reakcji chemicznych zachodzących podczas procesu spiekania,
- 3<sup>o</sup> czynniki fizyczne takie jak: cykliczne zmiany temperatury, działanie pól magnetycznych, elektrycznych, ultradźwięków, napromieniowania itp. (dotychczas mało stosowane).

Spiekanie przeprowadza się w specjalnie do tego celu przystosowanych piecach, najczęściej elektrycznych zapewniających realizację zaprogramowanych zmian temperatury i składu chemicznego atmosfery, a także możliwość zastosowania czynników fizycznych.

Piece o pracy ciągłej stosuje się przy produkcji masowej. Spiekanie odbywa się tu w sposób ciągły bez konieczności przerywania pracy pieca. Wyroby przemieszczane są w sposób ciągły na ruchomych rusztach, w piecach typu tunelowego.

Piece o pracy okresowej stosuje się przy produkcji małoseryjnej. Tutaj wypraski układane są na półkach lub tackach w piecach dzwonowych muflowych lub specjalnych (np. próżniowych).

Atmosfery spiekania w piecu można podzielić na trzy rodzaje:

- 1<sup>o</sup> redukujące czyli zmniejszające ilość tlenku w spiekany proszku,
- 2<sup>o</sup> obojętne, mające na celu odizolowanie procesów zachodzących w spiekany proszku od wpływów zewnętrznych,
- 3<sup>o</sup> utleniające, mające na celu zintensyfikowanie procesu spiekania (szczególnie wyrobów wykonanych z proszków żelaza). Obecność tlenków w proszku żelaza podwyższa skurcz podczas spiekania, a tym samym zwiększa wytrzymałość spieków.

Dwie pierwsze atmosfery nazywa się często atmosferami

ochronnymi, gdyż mają one zadanie przeciwdziałać utlenianiu proszku podczas podgrzewania, spiekania i chłodzenia. Do znanych atmosfer ochronnych zaliczyć należy grupę gazów obojętnych takich jak argon, hel, azot. Stosuje się również spiekanie w próżni. Ze względu na duże koszty, argon i hel czy też atmosfera próżniowa stosowane są praktycznie tylko w produkcji wyrobów o dużym stopniu doskonałości lub w warunkach laboratoryjnych. Bardziej powszechnie stosowana jest atmosfera azotu.

Atmosfera utleniająca odnosi się do zaktywizowanego spiekania. Jak wspomniano obecność tlenków w proszku żelaza jest z punktu widzenia końcowych własności mechanicznych korzystna. Jednakże proszki żelaza o dużej zawartości tlenków są twarde i trudno je prasować. Dlatego też kształtki wykonuje się z proszków żelaza o niskiej zawartości tlenków, a następnie utlenia się je przez spiekanie w atmosferze pieca przy czym końcowa faza procesu spiekania musi być przeprowadzona w atmosferze redukującej.

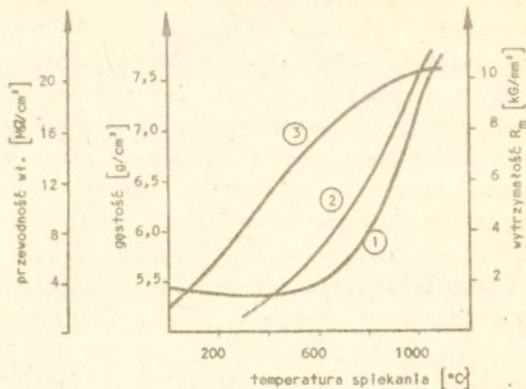
Innymi przykładami atmosfery aktywnej, najszerszej stosowanej jest atmosfera wodoru i amoniaku. Atmosfery te mają własności redukujące.

Podstawowymi parametrami spiekania są:

- 1<sup>o</sup> temperatura spiekania
- 2<sup>o</sup> czas spiekania
- 3<sup>o</sup> atmosfera spiekania

Temperatura spiekania jest parametrem aktywizującym procesy termodyfuzyjne i termoplastyczne. Analizując ten parametr, należy wziąć pod uwagę fakt, że w metalurgii proszków częściej mamy do czynienia z kompozycją proszków o różnych własnościach fizyko-chemicznych, czyli z tzw. układami wieloskładnikowymi niż z układami jednoskładnikowymi. Poszczególne komponenty takiego układu różnią się na ogół temperaturę topnienia. Temperatury spiekania ustala się wtedy jako 0,7-0,8 bezwzględnej temperatury topnienia przeważającego składnika. Ustalenie temperatury spiekania ma decydujący wpływ na końcowe własności wyrobów spiekanych. Zagadnienie to ilustruje nam rys.3.11, który przedstawia zmiany gęstości, przewodności właściwej i wytrzymałości na rozciąganie po dwugodzin-

nym spiekanie przy różnych temperaturach dla wyrobów wykonanych z proszku miedzi.

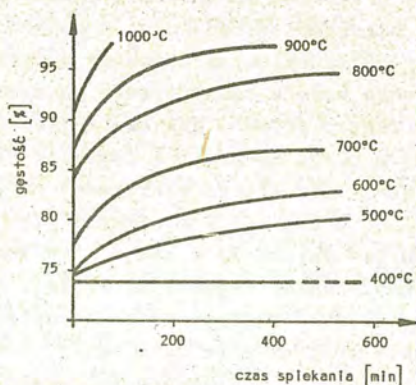


Rys.3.11. Zmiany własności podczas spiekania próbek wykonanych z elektroliżycznego proszku miedzi (ciśnienie prasowania  $4T/cm^2$ , czas spiekania 2 godz.); 1-gęstość w  $g/cm^3$ , 2-przewodność właściwa, 3-wytrzymałość na rozciąganie.

Procesy spiekania z obecnością fazy ciekłej dotyczą układów wieloskładnikowych i polegają na zwilżeniu powierzchni metalu trudno topliwego cieczą metalu łatwo topliwego. Jest to swego rodzaju "lutowanie" ziaren proszku. Ustalenie temperatury spiekania jest bardzo istotne, gdyż w zależności od niej zjawisko "lutowania" może wystąpić lub nie.

Czas spiekania decyduje raczej o ilościowych efektach procesu spiekania. Zależnie od czasu spiekania pozostaje w wyrobie mniej lub więcej por, mniej lub więcej tlenków itp. Powtórne spiekanie prowadzące do zmian charakterystyki spieków świadczy, że proces ten uprzednio nie został zakończony. Dodatkowe spiekanie lub przedłużenie czasu spiekania powoduje na ogół zawsze zmiany w spieku. Praktycznie przyjęto kończyć proces spiekania z chwilą, kiedy kształtki uzyskują wymagane własności określone wymaganiami konstrukcyjnymi tj. gęstość, wytrzymałość na rozciąganie dla elementów konstrukcyjnych, lub oporność elektryczna, własności magnetyczne dla materiałów stosowanych np. w energe-

tyce. Rys.3.12. przedstawia przebieg zmian gęstości w funkcji czasu spiekania dla różnych temperatur spiekania.



Rys.3.12. Zmiany gęstości kształtek wykonanych z proszków Ni podczas izotermicznego spiekania.

Atmosfera spiekania, jej skład chemiczny, stanowi trzeci ważny czynnik decydujący o końcowych własnościach spieków. W tym względzie istnieje szeroka gama możliwości. Ograniczymy się do podania kilku przykładów:

- 1<sup>o</sup> spiekanie w próżni - stosowane jest głównie dla spieków o wysokiej zawartości krzemu i chromu np. gniazda zaworów pracujących w wysokich temperaturach oraz do produkcji spieków o specjalnych własnościach magnetycznych, wytrzymałościowych lub plastycznych. Podczas spiekania w próżni zachodzi intensywny proces odparowania, dysocjacji tlenków oraz wydzielanie gazów. Dzięki temu wady spiekane w próżni posiadają większą czystość i z reguły wyższe własności fizyczne i mechaniczne.
- 2<sup>o</sup> Spiekanie w atmosferze azotu - stosowane przy spiekaniu części wykonanych z miedzi i jej stopów - posiada znaczenie przemysłowe. Zaletę spiekania miedzi i jej stopów w atmosferze azotu jest mały skurcz wyprasek podczas spiekania oraz uzyskiwanie wyższych wła-

- sności mechanicznych spieków niż podczas spiekania w atmosferze wodoru, powodującej najczęściej występowanie "choroby" wodorowej.
- 3° Spiekanie w atmosferze wodoru - stosowane jest najczęściej w przypadku spiekania żelaza i stopów żelaza dzięki własnościom redukującym wodoru. Czystość wodoru ma również wpływ na przebieg procesu spiekania. W atmosferze wodoru zawierającej znaczne ilości pary wodnej przebieg procesu spiekania jest znacznie powolniejszy z uwagi na powolną redukcję tlenków.
  - 4° Spiekanie w atmosferze otrzymanej z dysocjacji amoniaku ( $75\% \text{H}_2$  i  $25\% \text{N}_2$ ) - stosowane jest w podobnych przypadkach jak spiekanie w atmosferze wodoru, z tym, że jest powszechniej używane ze względu na 10-krotnie mniejsze koszty w stosunku do atmosfery wodorowej.
  - 5° Spiekanie w atmosferze gazów otrzymywanych z częściowego spalania gazu ziemnego lub węglowodorów płynnych (gaz egzotermiczny, endotermiczny, konwertorowy) stosowane są do spiekania części stalowych o dużej zawartości węgla (pow. 30%).
  - 6° Zасыпки do wsadu w postaci tlenku aluminium, tlenku magnezu, talku, odpadów proszku żelaza, grafitu - stosowane są przy spiekaniu części zawierających składniki stopowe.

Oczywiście lista możliwości doboru atmosfery spiekania mającej wpływ na własność spieku jest znacznie szersza.

Oprócz wymienionych trzech podstawowych parametrów spiekania należy wymienić jeszcze dwa mające związek ze spiekaniem zasadniczym.

- sposób podgrzania (szybkość, spiekanie wstępne),
- sposób chłodzenia po spieku.

Podgrzanie wypraski do temperatury spiekania może nastąpić bądź to przez włożenie jej do pieca nagrzanego do określonej temperatury bądź też przez podgrzanie jej wraz z piecem. Okazuje się, że takie dwa sposoby podgrzania mają wpływ na ostateczne własności spieku. Zaleca się stosowanie drugiego sposobu podgrzania lub wręcz stopniowe podgrzewanie połączone z wygrzewaniem na

pewnych poziomach.

Sposób studzenia ma wpływ na uzyskanie odpowiedniej struktury spieku. Może być przeprowadzone wolno np. wraz z piecem lub szybko np. przez hartowanie w ośrodku gazowym lub ciekłym.

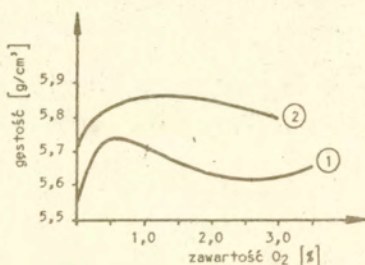
Istotny wpływ na proces spiekania ma sama technologia wytwarzania proszków i ich fizyko-chemiczne własności a także parametry prasowania.

Stopień rozdrobnienia i kształtu ziaren proszku ma wpływ przede wszystkim na temperaturę spiekania. Proszki drobnoziarniste spiekać można w temperaturach niższych, natomiast takie same pod względem składu chemicznego proszki gruboziarniste wymagają znacznie wyższej temperatury spiekania. Jako przykład można podać, że spiekanie proszków żelaza o koloidalnej wielkości ziaren można prowadzić w temperaturze 300°C, podczas gdy temperatura spiekania "normalnych" proszków żelaza wynosi 1000 - 1200°C. Fakt ten można wytłumaczyć tym, że proszki drobnoziarniste legitymują się większą rozwiniętą powierzchnią, a zatem większą energią powierzchniową i wzrostem aktywności procesu spiekania. Dla proszków drobnoziarnistych występuje też większy skurcz liniowy podczas spiekania i większa wytrzymałość spieków przy tej samej gęstości.

Skład chemiczny proszków ma również istotny wpływ na temperaturę spiekania. Dla proszków chemicznych jednorodnych (układ jednoscładnikowy) tzw. skuteczna temperatura spiekania wynosi 0,7 - 0,8 temperatury topnienia metalu, wyrażonej w stopniach Kelwina. Określenie temperatury spiekania dla proszków chemicznie niejednorodnych (układ wieloscładnikowy) zależy od czynników takich jak: temperatury topnienia komponentów, ilościowy ich udział w układzie. Praktycznie temperaturę spiekania wyznacza się tu na podstawie temperatury topnienia składnika występującego w przeważającej ilości w układzie. O doborze temperatury i czasu spiekania decydować też będzie obecność środków poślizgowych lub porotwórczych dodawanych do proszków w celu ułatwienia prasowania czy zwiększenia porowatości finalnej. Istotne znaczenie na przebieg procesu spiekania ma zawartość tlenków. Tlenki łatwo redukujące się (tlenki Fe, Cu, Ni, Mo, W) sprzyjają intensyfi-

kacji procesu spiekania ze względu na dużą ruchliwość atomów. Wzrost temperatury sprzyja redukcji tlenków. Na rys.3.13. pokazano wpływ zawartości tlenków na gęstość wypraski z proszków żelaza.

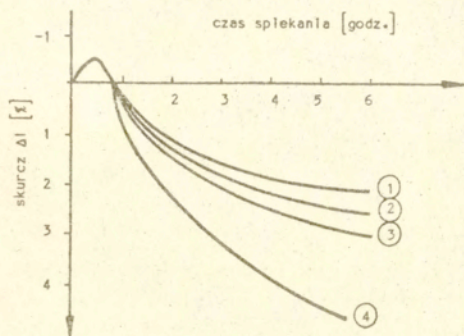
Jak widać istnieją optymalne zawartości tlenków przy których skurcz spiekanej kształtki jest największy. Obecność trudno redukujących się tlenków takich jak  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  komplikuje proces spiekania. Aby zaszedł proces spiekania w obecności takich tlenków musi nastąpić stopienie lub odparowanie ich warstwy z powierzchni ziaren. Nie usunięta z powierzchni warstwa izoluje ziarna w czasie spiekania.



Rys.3.13. Wpływ zawartości tlenu na gęstość spieków wykonanych z proszku żelaza Hametag temp. spiekania  $1200^{\circ}\text{C}$ , czas - 1 godz. 1- proszek nieredukowany, 2- proszek zredukowany.

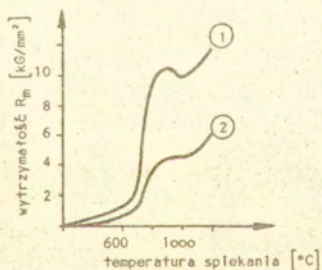
Ciśnienie prasowania kształtek wpływa przede wszystkim na czas spiekania. Jak wskazuje rys.3.14. przy większym ciśnieniu prasowania w krótszym czasie otrzymuje się spiek o żądanej, większej gęstości. Należy jednak wspomnieć, że niekiedy zamiast skurczu w czasie spiekania następuje powiększenie objętości kształtek. Zjawisko takie zachodzi najczęściej dla proszków źle zredukowanych lub zawierających duże ilości zaabsorbowanych gazów i gdy wypraski otrzymane z tych proszków mają małą porowatość (ok. 10%). Podczas spiekania takich wyprasek następuje gwałtowne wydzielanie gazów połączone z powstaniem lokalnych ciśnień wewnątrz wypraski, powodujących rozluźnienie jej spistości oraz zmniejszenie styków metalicznych. W efekcie po spiekanu otrzymujemy kształtki o objętości większej niż przed

spiekaniem. Przy spiekaniu wyprasek nierównomiernie zagęszczonych, występuje różny skurcz. Nierównomierna gęstość może być powodem pęknięcia kształtek w początkowej fazie spiekania.



Rys.3.14. Skurcz kształtek Fe przy izotermicznym spiekaniu. Ciśnienia prasowania: 1-  $10T/cm^2$ , 2-  $8T/cm^2$ , 3-  $6T/cm^2$ , 4-  $4T/cm^2$

Większa gęstość wyjściowa wyprasek lub innymi słowy mniejsza porowatość wyjściowa prowadzi w efekcie do spieków o większej wytrzymałości - rys.3.15.



Rys.3.15. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji temperatury spiekania dla kształtek o różnej porowatości, wykonanych z proszku żelaza: 1- porowatość wyjściowa 15%, 2- porowatość wyjściowa 25%.



Poza wymienionymi własnościami proszków wynikających z technologii wytwarzania oraz ich kompozycji i prasowania nie bez znaczenia jest sposób przechowywania proszków i wyprasek. Powinny one być przechowywane w pomieszczeniach suchych, chemicznie obojętnych i ponadto dodatkowo zabezpieczone przed utlenianiem. Rozkład i ilość tlenków zależy m.in. od sposobu przechowywania proszków.

### 3.3. Obróbka uzupełniająca spieków.

Znaczna większość części maszyn wykonywane techniką spiekania proszków metali otrzymuje żądany kształt, wymiary końcowe oraz właściwości fizyko-mechaniczne bez konieczności stosowania dalszej obróbki. Jednakże niekiedy tolerancje wykonania bądź też oczekiwane własności fizyko-mechaniczne są nieosiągalne lub trudno osiągalne w drodze zasadniczej technologii metalurgii proszków (prasowanie, spiekanie). W takich przypadkach poddaje się je obróbce specjalnej np. obróbce skrawaniem, nasycaniu metalami i niemetalami, obróbce cieplnej.

#### ● Obróbka skrawaniem

Wykonanie obróbki skrawaniem jest czasem niezbędne aby nadać wypraskom kształt zgodny z wymaganiami. Wykonuje się ją po spiekanu.

Typowymi przykładami stosowania obróbki skrawaniem są operacje, których celem jest:

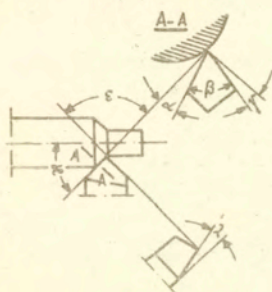
- wykonanie otworów w kierunku poprzecznym do kierunku prasowania,
- wykonanie otworów o małej średnicy w kierunku prasowania,
- wykonanie kanałów na powierzchni,
- wykonanie rowków wpustowych i otworów gwintowych,
- osiągnięcie wyższej klasy dokładności niektórych powierzchni.

Spieki z proszków żelaza można dobrze obrabiać przez toczenie, wiercenie, rozwiercanie, szlifowanie i frezowanie.

Z uwagi na specyfikę spieków z proszków metali, ich porowatą strukturę, istnieje trudność z chłodzeniem obrabianych części. Nie mogą być stosowane typowe sposoby chłodzenia stosowane w obróbce skrawaniem, ze względu na konsekwencje wnikania cieczy chłodzącej w pory. Najlepsze efekty uzyskuje się stosując jako środek chłodzący sprężone powietrze o ciśnieniu 0,2 - 0,3 atm. Zastosowanie powietrza w roli chłodziwa powoduje również oczyszczenie obrobionych powierzchni z wiórów.

### ● Toczzenie i wytaczanie.

Toczone przedmioty należy mocować w uchwycie bez wywieranie nadmiernego nacisku dla uniknięcia trwałych odkształceń spieków. Zalecane jest stosowanie tulejek zaciskowych lub trzpieni rozprężnych. Specjalna uwaga musi być zwrócona na krawędzie skrawające i geometrię ostrza noża tokarskiego. Krawędzie skrawające powinny być ostre, najlepiej docierane. Geometria noża powinna być dostosowana do rodzaju obrabianego spieku. Na rys. 3.16. podano geometrię ostrza dostosowanego do obróbki spieków o wytrzymałości 25 - 45 kG/mm<sup>2</sup> i twardości HV do 250 kG/mm<sup>2</sup>.



kąty ostrza

$\alpha = 6 - 8^\circ$
$\gamma = 8 - 12^\circ$
$\beta = 76 - 70^\circ$
$\lambda = 2 - 3^\circ$
$\epsilon = 45 - 50^\circ$
$\epsilon = 90 - 100^\circ$

Rys.3.16. Geometria ostrza noża tokarskiego do obróbki kształtki o  $R_r=25$  do 45 kG/mm<sup>2</sup> i HV do 250 kG/mm<sup>2</sup>.

Materiały o wyższej wytrzymałości i twardości powinny być obrabiane przy pomocy narzędzi o mniejszych kątach ostrza skrawającego. Natomiast materiały o niskiej gęstości 75-80% i dużej ziarnistości, stosowane np. na łożyska samosmarne najlepiej jest obrabiać w dwóch etapach, zgrubnie i wykończająco.

Zalecane parametry toczenia:

- szybkość skrawania - min. 150m/min,
- posuw - toczenie zgrubne - max. 0,3mm,
  - toczenie dokładne - max. 0,1mm,
- głębokość - toczenie zgrubne - max. 3mm,
  - toczenie dokładne - max. 0,3mm.

W przypadku konieczności zapewnienia współosiowości dla łożysk wciskanych w korpusy stosuje się wytaczanie. Do toczenia i wytaczania używać należy noży z ostrzami z węglików spiekanych.

### ● Wiercenie, szlifowanie, frezowanie i kalibrowanie.

Wiercenie jest stosowane do wykonania małych otworów w kierunku prasowania lub otworów niezgodnych z kierunkiem prasowania. Zalecane parametry wiercenia:

- szybkość skrawania 40-70m/min,
- posuw 0,02- 0,2mm/obr.,
- kąt wierzchołkowy wiertła - 140°.

Szlifowanie i frezowanie stosowane jest bardzo rzadko ze względu na szkodliwy ich wpływ na jakość spieków. W szczególności szlifowanie pozostawia w porach spieku wtrącenia ceramiczne, które mogą mieć szkodliwy wpływ podczas eksploatacji części.

Wysoką dokładność wymiarów spieku sięgającą 0,005mm w kierunku normalnym do kierunku prasowania oraz odpowiednią gładkość zapewnia kalibrowanie. Prowadzone w tym celu tłoczenie i przetłaczanie wykończające kalibruje powierzchnie równoległe do kierunku prasowania. Przetłaczanie prowadzi się zwykle na prasach do prasowania proszków przy naciskach 20 - 25% nacisku prasowania. Tarcie pomiędzy matrycą a stemplem zmniejsza się przez nasycenie spieku olejem, tłuszczami roślinnymi lub zwierzęcymi.

### ● Obróbka plastyczna.

W ramach obróbki specjalnej spieków, może być wykonana obróbka plastyczna. Stosuje się ją gdy zachodzi konieczność otrzymania spieków o dużej gęstości i dużych wymaganiach wytrzymałościowych. Podstawową operacją obróbki plastycznej jest

szybkobieżne kucie spiekanych prętów o przekroju kwadratowym 100 x 100mm. Dalejsza obróbka może być prowadzona w procesie walcowania lub przeciągania. Zastosowanie obróbki plastycznej pozwala niejednokrotnie osiągnąć lepsze własności mechaniczne części spiekanych, aniżeli odkuwek z materiału litego.

Innym sposobem poprawy własności spieków jest dogniatanie spieków na zimno wahającą matrycę. Metoda ta polega na przyłożeniu do wyrobu skupionego nacisku i szybkim przemieszczaniem go po całej powierzchni dogniatania przez cykliczne wychylenie stempla od osi (prasowanie obwiedniowe) według założonego programu. Wykorzystuje się prasy z wahającą matrycę wykonaną w oparciu o patent Z.Marciniaka.

Proces ten stosuje się głównie do przedkuwek otrzymywanych tradycyjnymi metodami metalurgii proszków osięgających gęstość  $5,4 - 7,2\text{g/cm}^3$ . Dogniatanie na zimno wahającą matrycę jest skuteczną metodą otrzymywania spieków o gęstościach bliskich gęstości teoretycznej (porowatość mniejsze niż 1,2%). Własności mechaniczne dogniatanych spieków żelaza i stali są podobne do własności stali litej o identycznym składzie chemicznym.

### ● Nasycanie metalami i niemetalami.

Częstym zabiegiem jest zmiana własności fizyko-chemicznych i mechanicznych spieków w drodze zmiany struktury całego elementu, bądź jego warstwy powierzchniowej.

Nasycanie metalami stosowane jest dla zwiększenia wytrzymałości oraz zabezpieczenia spieków przed korozją. Aby było możliwe nasycenie konieczną ilością metalu nasycającego element musi mieć odpowiednią porowatość oraz właściwie przygotowaną powierzchnię. Nasycanie prowadzi się w ogniotrwałych skrzyniach ze stali, grafitu lub gliny w których umieszcza się nasycone części oraz brykiety z proszku lub wiórów metalu nasycającego.

Innym sposobem nasycania jest zanurzenie części w kąpeli metalowej. Temperatura nasycania powinna być o  $30 - 50^{\circ}\text{C}$  wyższa od temperatury topnienia metalu nasycającego. Najczęściej metalami nasycającymi są: miedź, mosiądz, ołów, cyna oraz ich stopy.

Nasycanie niemetalami ma na celu zapewnienie dobrego

smarowania, zamknięcia porów, ochronę przed korozją lub zmianę własności mechanicznych spieku np. zwiększenie odporności na ścieranie. W przypadku łożysk samosmarnych jako środka poprawiającego smarowanie używa się olei (najczęściej wrzecionowych lub maszynowych), tworzyw sztucznych (teflonu) lub siarki. Nasywanie spieków olejem prowadzi się zwykle w próżni w temperaturze ponad  $100^{\circ}\text{C}$ , natomiast w przypadku dodania stabilizatora osłabiającego reakcję oleju wewnątrz spieku, temperatura nie powinna przekraczać  $30^{\circ}\text{C}$ .

Nasywanie siarką prowadzi się w dwóch etapach: właściwe nasywanie w roztopionej siarce oraz wygrzewanie w temperaturze  $750-800^{\circ}\text{C}$ , w czasie 5-10 godzin. Spieki nasycone siarką charakteryzują się podwyższoną o 30% trwałością i zwiększoną odpornością na korozję.

Łożyska suche nasycone teflonem mogą przenosić znaczne obciążenia, pracować w podwyższonej temperaturze (powyżej  $100^{\circ}\text{C}$ ) a jednocześnie są odporne na działanie czynników chemicznych.

Porowate spieki nasyca się również żywicami syntetycznymi np. fenolowymi. Uszczelnione żywicami spieki stosuje się jako korki metalowe, korki zaworów wodnych itp. Nasyca się przez zanurzenie bądź wprowadzając żywicę pod ciśnienie. Po nasyczeniu stosuje się wygrzewanie w temperaturze ok.  $120^{\circ}\text{C}$ , w czasie 0,5-1 godziny.

W wyniku nasywania niemetalami, obok polepszania własności ślizgowych i trwałości rośnie odporność na korozję spiekanych części maszyn.

#### Zmiana struktury warstwy powierzchniowej.

W celu ochrony spieków przed korozją, zwiększenia twardości lub dekoracji stosuje się obróbkę powierzchniową spieków, rozkładając powłoki ochronne lub ozdobne. Typowymi przykładami zmian struktury warstwy powierzchniowej są procesy obróbki cieplno-chemicznej, procesy rolkowania, oksydowania, fosforowania oraz wykonywania pokryć galwanicznych.

Procesy obróbki cieplno-chemicznej są szczegółowo omówione w rozdziale 5.

Operację rolkowania stosuje się dla podwyższenia gładkości

i zwiększenia twardości warstwy powierzchniowej spieków.

W celu ochrony spieku przed korozją, a także w celach dekoracyjnych wykonuje się powłoki galwaniczne, obróbkę dyfuzyjną, oksydowanie lub fosforowanie.

Powłoki galwaniczne stosuje się przy porowatościach mniejszych od 15%. Przed wykonaniem właściwej powłoki, jeśli porowatość jest większa niż 5% należy uszczelnić pory. Można to osiągnąć przez polerowanie, powtórne prasowanie lub nasycanie, np. lakierem kreozolowym. Najczęściej nakłada się powłoki niklowe lub kobaltowe o grubości około 0,25mm.

Innym sposobem wykonania powłok jest metoda wcierania w spieki takich metali jak: cyna, miedź, cynk, brąz itp. Proces przeprowadza się w bębnach obrotowych wypełnionych elementami spiekanyymi, proszkiem metalu pokrywającego oraz ciałami udarowymi.

Obróbką dyfuzyjną najczęściej wykonuje się pokrycia z chromu i aluminium. Chromowanie dyfuzyjne prowadzi się w temperaturze 900°C, a czas procesu zależy od żądanej grubości warstwy dyfuzyjnej. Powłoka chromu zwiększa odporność spieków na korozję 8-10 razy w porównaniu ze spiekami niechromowanymi, a także zwiększa odporność spieków na ścieranie. Podobny przebieg, jak chromowanie ma aluminowanie. Warstwa aluminium oprócz zwiększenia odporności na korozję zwiększa żaroodporność spieków.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą oksydowania jest obróbka w przegrzanej parze wodnej - zwana sztucznym utlenianiem. W tym celu spieki są podgrzewane w atmosferze obojętnej do temperatury 480-560°C, a następnie poddane działaniu pary wodnej. Po ochłodzeniu spieki są nasycane olejem. Na powierzchni oraz w porach spieku tworzy się warstewka tlenku żelaza chroniąca przed korozją.

Fosforowanie spieków prowadzi się dokładnie tak samo, jak fosforowanie części z materiałów litych.

Literatura do rozdziału 3.

- [1] W.MISSOL, Spiekane części maszyn. Wytwarzanie - własności - dobór materiałów, Wydawnictwo "Śląsk", Katowice, 1978,
- [2] R.P.SEELIG, W.E.KINGSTON, The Physics of Powder Metallurgy Bull., 7/1956,
- [3] W.RUTKOWSKI, Projektowanie właściwości wyrobów spiekanych z proszków i wiskien, PWN, Warszawa, 1977.