

Rozdział 5.

PODSTAWOWE CZYNNIKI DECYDUJĄCE O WŁASNOŚCIACH MECHANICZNYCH POROWATYCH SPIEKÓW

Drogą metalurgii proszków otrzymuje się wyroby o różnorodnych właściwościach mechanicznych i fizyko-chemicznych. Decydują o tym zarówno właściwości materiałów wyjściowych jak również dobór odpowiednich parametrów technologicznych, które w pewnym zakresie pozwalają sterować finalnymi własnościami wyrobów spiekanych.

Z punktu widzenia zastosowań wyrobów spiekanych istotną rolę odgrywają następujące ich własności fizyczne:

- gęstość (związana ściśle z porowatością),
- oporność właściwa,
- własności magnetyczne,
- struktura,

oraz własności mechaniczne:

- twardość,
- wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie i zginanie,
- wydłużenie.

Spśród własności chemicznych najistotniejszą jest odporność na korozję i inne szkodliwe substancje.

Własności mechaniczne i fizyko-chemiczne uwarunkowane są czterema zasadniczymi czynnikami:

- jakością proszku,
- warunkami prasowania,
- warunkami spiekania,
- rodzajem obróbki specjalnej i wykończającej.

W rozdziale tym omówimy głównie własności mechaniczne i fizyko-chemiczne proszków i wyrobów spiekanych, najbardziej istotnych z punktu widzenia konstruktora. Będą to głównie materiały spiekane na osnowie proszków żelaza.

5.1. Jakość proszków.

Własności proszków wpływają w decydującym stopniu na właściwości finalne spieków. Istotnym czynnikiem umożliwiającym uzyskiwanie pożądanych efektów końcowych jest dobór odpowiedniego składu chemicznego proszku i jego czystości chemicznej. Przy doborze składu chemicznego problemem jest na ogół zapewnienie odpowiedniej reprezentatywności i powtarzalności poszczególnych partii proszków. Dotyczy to szczególnie proszków polskich, które niestety na ogół nie są powtarzalne.

Skład chemiczny proszków bada się zwykle metodami stosowanymi w analizie chemicznej (chromatografia, spektrografia itp.). Wyniki takich badań prawdziwe są na ogół jedynie przez ograniczony czas gdyż proszki mają tendencję do utleniania się zależnie od warunków magazynowania i transportu. Ponieważ stopień utlenienia proszków ma istotny wpływ zarówno na procesy technologiczne (prasowanie, spiekanie) jak również na finalne własności mechaniczne, często trzeba utlenione proszki redukować przed dalszym ich stosowaniem.

Zawartość tlenków w proszkach metali ocenić można również za pomocą pomiaru rzeczywistej gęstości proszków (pomiaru piknometrycznego), który wykaże odstępstwo od gęstości teoretycznej (gęstości metalu litego). Z różnicy można wyliczyć zawartość tlenku w proszku.

Dalszą specyfiką proszków jest obecność na ich powierzchni znacznej ilości zaadsorbowanych gazów. Adsorbacja gazu przez proszek metalu zależy od powierzchni właściwej ziaren, stanu tej powierzchni, odkształceń sieci krystalicznej i technologii wytwarzania proszku. Proszki drobnoziarniste o rozbudowanej powierzchni adsorbują więcej gazów niż proszki o gruboziarnistych ziarnach kulistych.

Proszki mające na swej powierzchni i wewnątrz duże ilości zaadsorbowanych gazów mają gorsze własności technologiczne a rozprężające działanie gazów w podwyższonych temperaturach utrudnia spiekanie i pogarsza finalne własności mechaniczne wyrobów.

Jednym z bardzo ważnych parametrów, wykorzystywanym przy sterowaniu procesami przetwarzania proszków i własnościami goto-

wych wyrobów jest wielkość i charakterystyka powierzchni. Wynika to z faktu, że mamy tutaj zupełnie odmienny niż przy materiałach litych stosunek powierzchni do masy. Powierzchnia proszków jest o wiele rzędów większa niż powierzchnia materiału litego o tej samej masie, np. dla proszku przekracza ona $10 \text{ m}^2/\text{g}$ podczas gdy dla litego żelaza wynosi ona $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{g}$. Wraz ze wzrostem powierzchni w stosunku do masy zwiększa się energia powierzchniowa proszku. Proszek staje się więc silnie reaktywny i piroforyczny. Zjawiska i procesy fizyko-chemiczne trudne do zaobserwowania w substancjach litych, tutaj zachodzą szybko i łatwo. Ma to zasadniczy wpływ na procesy takie jak dyfuzja, redukcja tlenków, spiekanie, obróbkę cieplno-chemiczną, itp.

Równocześnie jednak wzrost powierzchni proszków wnosi wiele niekorzystnych zjawisk. Przede wszystkim powoduje on wzmoczoną adsorbcję gazów, które wprowadzone następnie do wypraski, sprężone i zamknięte w proszku, utrudniają proces spiekania i uniemożliwiają uzyskanie spieków o dużej gęstości. W wypadku dużych powierzchni właściwych proszków adsorbowana może być także woda powodująca szybkie utlenianie, korozję, samozapalność i wybuchowość.

Idealnie kulisty proszek jest trudniejszy do sprasowania. Natomiast proszki o rozbudowanej powierzchni i składające się z różnych odgałęzień zazębiają się łatwiej mechanicznie podczas prasowania i tworzą wypraski o dobrych właściwościach mechanicznych, nie mające wykruszeń na krawędziach po wyjęciu ich z matrycy.

Podwyższanie własności mechanicznych spieków poprzez regulowanie wielkości i właściwości powierzchni właściwej proszków ma jednak ograniczony zakres szczególnie w przypadku stosowania techniki klasycznego prasowania i spiekania. Największe możliwości daje w tym względzie odpowiedni dobór składu chemicznego proszku i dodatki stopowe. Składniki stopowe dodaje się najczęściej w postaci proszków zmieszanych z proszkiem żelaza. Stopień wymieszania komponentów ma istotny wpływ na jednorodność struktury spieków i jego własności mechaniczne. Niejednorodna struktura może powodować pozostawanie naprężeń wewnętrznych a nawet uszkodzenia w strukturze. Ujednorodnianie przeprowadza się poprzez wymieszanie składników. Istnieje pewien optymalny czas mieszania, przy którym uzyskuje się najmniejszy

stopień niejednorodności mieszanki. Dalsze przedłużanie czasu mieszania prowadzi do zwiększenia stopnia niejednorodności wskutek segregacji składników o różnych gęstościach. Zbadano, że jeżeli rozmieszczenie składników stopowych jest nierównomierne to zastosowanie nawet podwyższonych parametrów spiekania nie doprowadzi do całkowitego ujednorodnienia struktury spieków.

5.2. Warunki technologiczne wytwarzania spieków.

Własności mechaniczne spieków są wprost proporcjonalne do ich gęstości. Stosunek gęstości spieku do gęstości materiału litego wyraża zarazem relacje własności mechanicznych (przede wszystkim wytrzymałości) spieku do własności mechanicznych metalu litego o identycznym składzie chemicznym. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na gęstość spieku są warunki prasowania i spiekania.

● Warunki prasowania.

Uzyskiwanie wypraski o żądanej gęstości możliwe jest przede wszystkim poprzez dobór efektywnego ciśnienia prasowania. Gęstość wypraski wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania przy czym wzrost ten jest większy w zakresie niższych ciśnień i mniejszy w zakresie wyższych ciśnień. Stosowanie zbyt wysokich ciśnień może powodować pękanie wyprasek i jest ograniczone względami wytrzymałościowymi matryc.

Celem uzyskania dużych gęstości (rzędu 95% gęstości materiału litego) stosuje się często prasowanie dwuetapowe lub wielokrotne.

Niejednorodność gęstości w wypraskach zmniejsza się poprzez stosowanie: środków poślizgowych, dwustronnego prasowania (rozrzut gęstości zmniejszony o połowę), prasowania z wykorzystaniem siły tarcia itp.

Istotnym czynnikiem jest dobór odpowiedniej metody prasowania w zależności od właściwości proszku, wymaganych własno-

ści wyprasek, wielkości produkcji itp. Z tego punktu widzenia można rozróżnić: kucie, wyciskanie, prasowanie izostatyczne, prasowanie w matrycach, także kroczące i obwiedniowe (dla wyprasek o stosunkowo dużej gęstości) oraz walcowanie, zagęszczenie wibracyjne i inne (dla wyprasek porowatych czyli o mniejszej gęstości).

● Warunki spiekania.

Spiekanie prowadzi z reguły do uzyskiwania kształtki o większej gęstości aniżeli miała wypraska (jeżeli zachodzi potrzeba można zachować a nawet powiększyć porowatość początkową).

W zależności od wymaganych własności spieków korzysta się z odpowiedniego sposobu spiekania np.:

- spiekanie swobodne (bez udziału dodatkowych obciążeń mechanicznych),
- spiekanie z udziałem dodatkowej siły (aktywizatora),
- prasowanie na gorąco,
- przeróbka plastyczna na gorąco (kucie, walcowanie).

Dla przykładu drogą kucia na gorąco można otrzymać spieki o gęstości dochodzącej do 99,2 - 99,5% gęstości teoretycznej a nawet 99,5 - 100% przy wielokrotnym przekuciu.

Przy spiekaniu aktywowanym otrzymuje się tym większe zagęszczenie spieku im wyższa jest temperatura, dłuższy czas spiekania i większe ciśnienie, przy czym szczególnie aktywnym parametrem jest temperatura.

● Własności mechaniczne a parametry prasowania i spiekania.

Najczęściej stosowanymi wartościami parametrów formowania i spiekania wyrobów z proszków żelaza są:

- ciśnienie prasowania - 5-6 T/cm²,
- temperatura spiekania - 1050-1200 °C.

Przy zastosowaniu takich parametrów gęstość spieku wynosi 5,7 - 7,0 g/cm³.

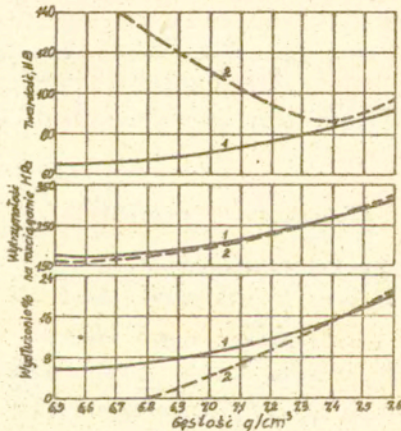
Przez powtórne prasowanie i spiekanie można zwiększyć gęstość o ok. 10%.

W tabl. 5.1. podano własności mechaniczne spieczonego żelaza otrzymanego z proszku rozpylanego w zależności od ciśnienia prasowania [1]. Spiekano w temp. 1150°C w czasie 2 godz.

Tabela 5.1. Wpływ ciśnienia prasowania na własności mechaniczne spieczonego żelaza.

ciśnienie prasowania	gęstość	porowatość	wytrzymałość na rozciąganie	wydłużenie	twardość	moduł sprężystości
kN/cm ²	g/cm ³	%	N/mm ²	%	HB	kN/mm ²
20	5,24	33	62	4,4	32	65,2
30	5,76	26	93	6,8	46	88,35
40	6,14	21	121	8,6	58	113,7
50	6,43	18	144	9,7	67	132,3
60	6,64	15	172	12,6	80	151,6

Własności mechaniczne spiekane żelaza w zależności od gęstości przedstawia rys. 5.1 [2].



Rys. 5.1. Własności mechaniczne spiekane Fe w zależności od gęstości.

1- po spiekaniu, 2- po utlenieniu w parze wodnej.

Wpływ gęstości spieku oraz przebiegu operacji technologicznych na własności mechaniczne kształtki wykonanej z proszku o składzie: 30% żelaza elektrolitycznego, 60% żelaza zredukowanego, 4% Ni, 1% Cu i 1% grafitu podano w tabeli 5.2. Spiekanie przeprowadzono w atmosferze zdysocjowanego amoniaku. Parametry technologiczne były następujące:

- pierwsze spiekanie: temp. 900°C, czas - 20 min.,
- drugie spiekanie: temp. 1120°C, czas - 30 min.,
- hartowanie z temp. 815°C, studzono w oleju,
- odpuszczanie w temp. 230°C w czasie 30 min., [3].

Wpływ parametrów prasowania i spiekania na własności spieków wykonanych z proszków żelaza MH-100.24 z dodatkiem 1% grafitu podano w tabl. 5.3, [3].

Tabl. 5.3. Wpływ parametrów prasowania i spiekania na własności spieków.

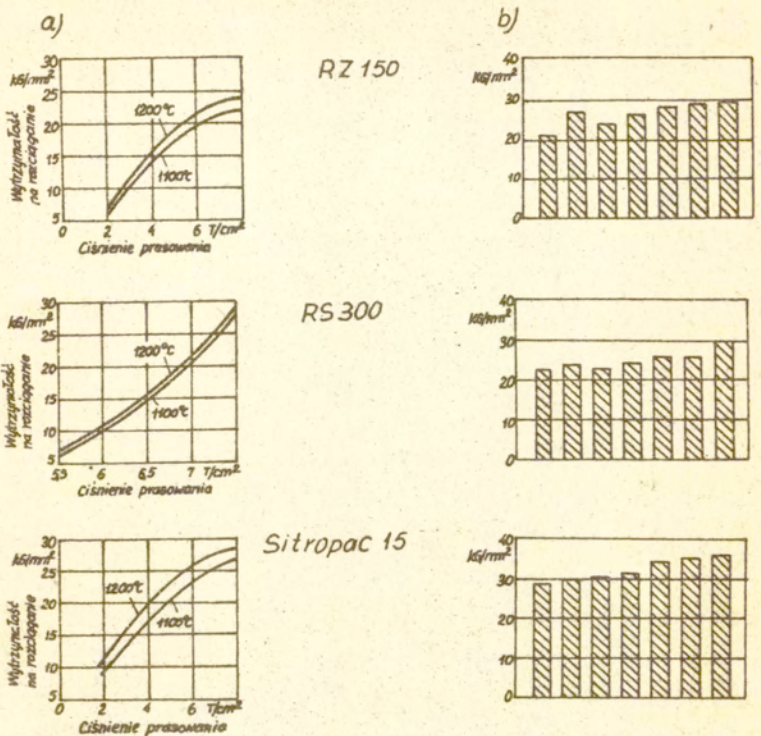
wielkość	uzyskane własności			
ciśnienie prasowania T/cm ²	4		6,5	
gęstość po prasowaniu g/cm ³	6,32		6,76	
czas spiekania w temp. 1300°C w godz.	2	4	2	4
gęstość po spiekaniu g/cm ³	6,74	6,84	7,01	7,07
skurcz po spiekaniu %	-2,42	-2,95	-1,45	-1,76
wytrzymałość na rozciąganie kG/mm ²	25,5	27,6	27,4	28,9
wydłużenie %	7,7	8,8	9,0	10,5

Na rys. 5.2 przedstawiono wytrzymałość na rozciąganie kształtek wykonanych z proszków żelaza rozpylonych w gatunkach RZ 150, RZ 300 i Sintropac 15 w zależności od parametrów prasowania i spiekania, [3].

W zakresie stosowanych praktycznie ciśnień prasowania i temperatur spiekania wytrzymałość na rozciąganie wynosi 15 - 23 kG/mm². Dwukrotne prasowanie i spiekanie powoduje znaczny wzrost gęstości spieków i ich wytrzymałości.

Tabela 5.2. Wpływ gęstości spieku oraz procesu technologicznego na własności mechaniczne spieków żelaza.

ciężnienie prasowania	przebieg operacji	gęstość	twardość	wytrzymałość na rozciąganie	wydłużenie
T/cm ²		g/cm ³		kG/mm ²	%
5,6	prasowanie i spiekanie	6,63	76HRB	41	1,5
	prasowanie spiekanie obróbka cieplna	6,63	24HRC	61	0,9
	prasowanie pierwsze spiekanie prasowanie drugie spiekanie	7,07	90HRB	62	2,7
	prasowanie pierwsze spiekanie prasowanie drugie spiekanie obróbka cieplna	7,07	37HRC	88	1,1
7,0	prasowanie spiekanie	6,75	80HRB	44	2,0
	prasowanie spiekanie obróbka cieplna	6,75	30HRC	65	0,9
	prasowanie pierwsze spiekanie prasowanie drugie spiekanie	7,18	94HRB	69	3,3
	prasowanie pierwsze spiekanie prasowanie drugie spiekanie obróbka cieplna	7,18	40HRC	97	1,4

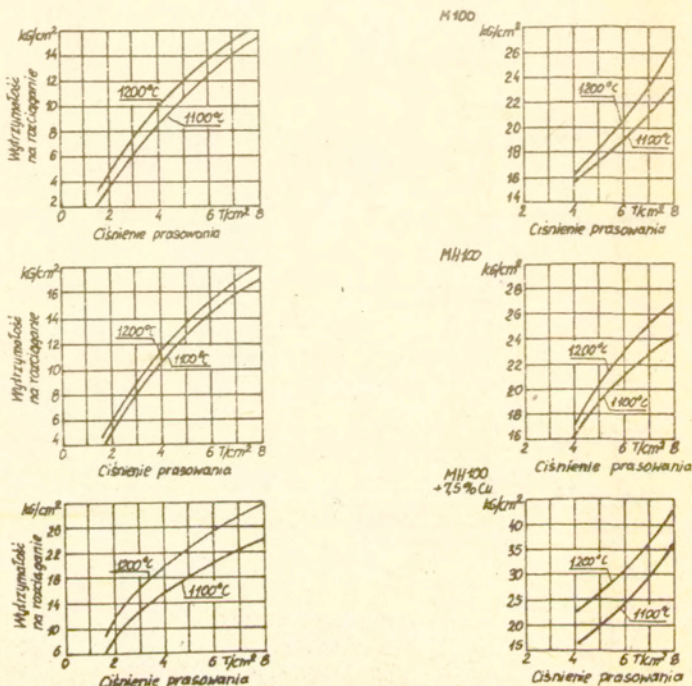


1. Prasowanie	4	6	4	6	6	6	6	T/cm²
1. Spiekanie	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	°C
2. Prasowanie	6	6	6	6	8	8	8	T/cm²
2. Spiekanie	1100	1100	1200	1200	1200	1200	1200	°C
Czas	60	60	60	60	60	120	60	min

Rys. 5.2. Wytrzymałość na rozciąganie kształtek wykonanych z proszków rozpylanych w gatunkach RZ 150, RS 300, Sintropac 15:

- a) jednokrotne prasowanie,
b) dwukrotne prasowanie.

Rys. 5.3. pokazuje wpływ pierwszego i drugiego prasowania oraz temperatury spiekania na wytrzymałość na rozciąganie spieków wykonanych z proszków redukowanych w gatunkach M-100, MH - 100, MH - 100 + 7,5% Cu, [3].



Rys. 5.3. Wytrzymałość na rozciąganie kształtek wykonanych z proszków redukowanych w gatunkach M-100, MH-100, MH-100+7,5% Cu:

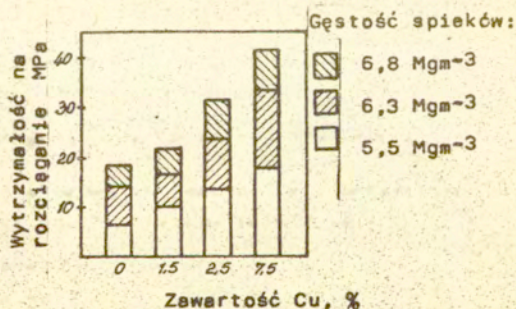
- a) jednokrotne prasowanie,
- b) dwukrotne prasowanie.

5.3. Dodatki stopowe.

Istotną zaletą metalurgii proszków jest to, że pozwala ona na dodawanie do podstawowego materiału (proszku) dodatków stopowych (również w postaci proszku). Dodatki stopowe poro-
dują zmiany własności mechanicznych i fizyko-chemicznych spieków oraz mogą nadawać wyrobom własności charakterystyczne tylko dla metalurgii proszków. Omówimy najważniejsze dodatki stopowe.

● Miedź.

Podstawowym dodatkiem stopowym mającym wpływ na zwiększenie wytrzymałości spieków żelaza jest miedź. Istnieją dwie metody wprowadzenia miedzi do spieków. Najczęściej stosuje się dodawanie proszku miedzi (do 10%) do proszku żelaza. Gdy zachodzi konieczność zamknięcia porów w wyrobach stosuje się metodę infiltracji, czyli nasycania wyprasek ciekłą miedzią (do 45%). Na rys. 5.4. przedstawiono wpływ dodatku Cu na wytrzymałość na rozciąganie kształtek wykonanych z proszków Fe i proszku Cu.



Rys. 5.4. Wpływ dodatków miedzi na wytrzymałość na rozciąganie kształtek wykonanych z proszków żelaza [3].

Stale miedziowe otrzymane poprzez nasycanie ciekłą miedzią spiekanych węglownie porowatych wyprasek żelaznych cechują się lepszymi własnościami mechanicznymi od podobnych stali otrzymanych drogą prasowania i spiekania mieszaniny proszków żelaza i miedzi. Nasycanie ciekłą miedzią umożliwia wyrównanie gęstości nawet w złożonych kształtach wyprasek.

Spiekanie wyprasek zawierających miedź przeprowadza się najczęściej w temperaturze 1120-1150°C.

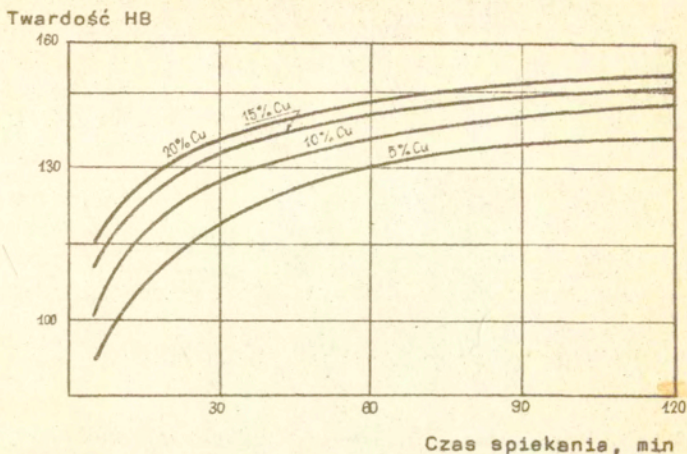
Wpływ zawartości miedzi i obróbki cieplnej na wytrzymałość na rozciąganie spieków przedstawiono w tabeli 5.4, [3].

Tabl. 5.4. Wpływ miedzi na własności spieków.

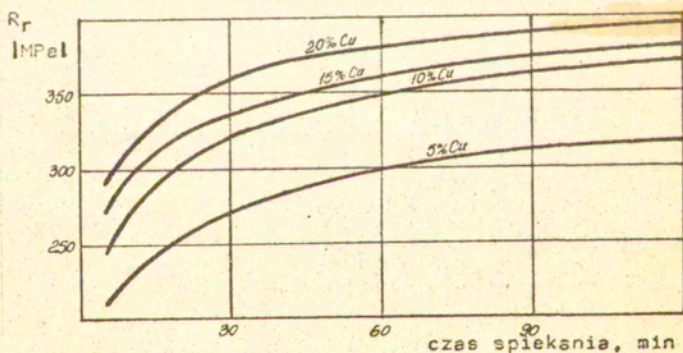
zawartość miedzi %	wytrzymałość na rozciąganie kg/mm^2	
	przed obróbką cieplną	po obróbce cieplnej
1,5	34 - 39	54 - 58
2,0	38 - 44	62 - 67
3,0	42 - 48	71 - 73
4,0	46 - 50	72 - 74
5,0	44 - 52	73 - 77
7,0	41 - 46	73 - 74

Poniżej przytoczymy wyniki badań [4] dotyczące zmian własności mechanicznych proszku polskiego nasycanego miedzią przy jej różnych zawartościach i czasach spiekania (rys. 5.5 - 5.8).

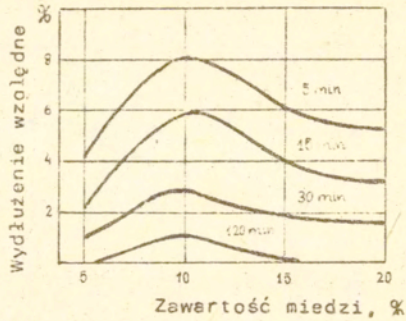
Można stwierdzić, że istnieje pewna optymalna zawartość miedzi (2-5 %) przy której materiał posiada najwyższe własności plastyczne i największą uderową wytrzymałość.



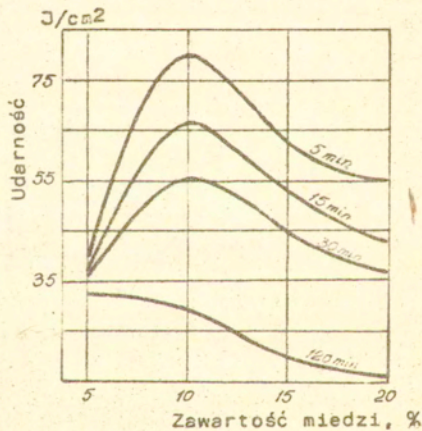
Rys. 5.5. Wpływ czasu spekania na twardość spieków żelazo-miedź o różnej zawartości miedzi.



Rys. 5.6. Wpływ zawartości miedzi na wytrzymałość na rozciąganie spieków żelazo-miedź o różnej zawartości miedzi.



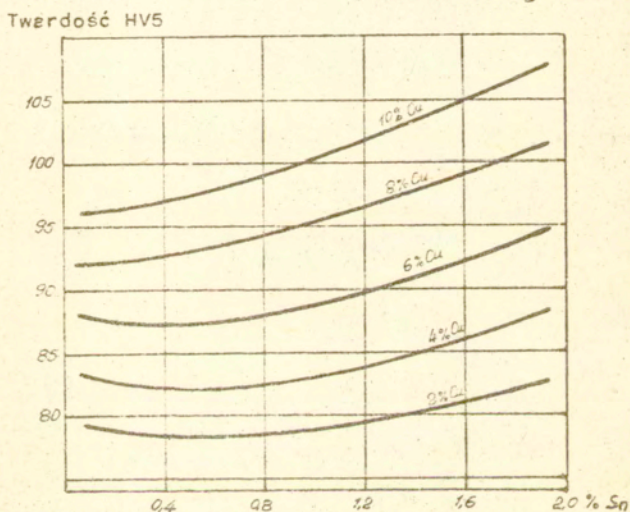
Rys. 5.7. Wpływ zawartości miedzi na wydłużenie spieków żelazo-miedź otrzymanych przy różnych czasach spiekania.



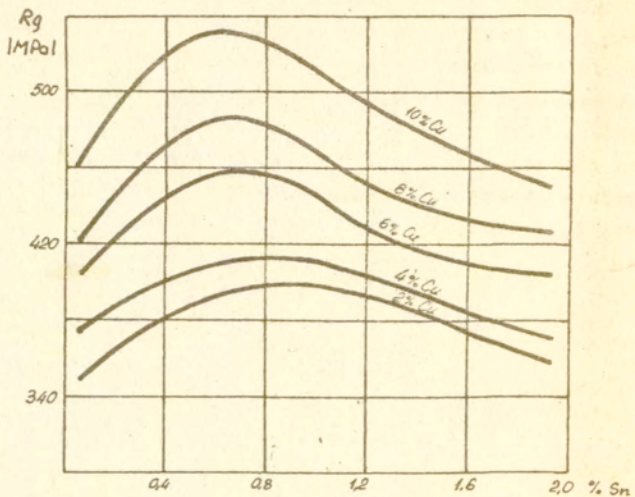
Rys. 5.8. Wpływ zawartości miedzi na uderność spieków żelazo-miedź otrzymanych przy różnych czasach spiekania.

Cyna.

Dodatek cyny (do 1%) do czystego żelaza powoduje wzrost wytrzymałości spieku na rozciąganie. Dalsze zwiększenie zawartości cyny powoduje spadek wytrzymałości. Ze wzrostem dodatku cyny do 4% rośnie twardość, ale maleje wydłużenie spieku Fe-Sn. Cyna niweluje także ujemne skutki powodowane przez miedź (peczenie), dlatego coraz częściej stosuje się domieszki miedzi i cyny równocześnie. Poniżej przytoczymy wyniki badań [4], [5], przedstawiające wpływ dodatków miedzi i cyny na twardość (rys. 5.9) i wytrzymałość na zginienie (rys. 5.10) spieków Fe-Cu-Sn.



Rys. 5.9. Wpływ dodatków miedzi i cyny na twardość spieków Fe-Cu-Sn, [4].



Rys. 5.10. Wpływ zawartości miedzi i cyny na wytrzymałość na zginanie spieków Fe-Cu-Sn, [10].

● Nikiel.

Nikiel stosuje się w celu podwyższenia wytrzymałości znormalizowanych stali konstrukcyjnych w ilości 0,5 - 5 %. Najwyższą twardość spiekanych proszków żelaza uzyskuje się przy dodatku 3% Ni. Nikiel zwiększa uderność a także znacznie poprawia hartowność. Szczególnie w połączeniu z Cr i Mo.

Znaczny wzrost własności mechanicznych spieków uzyskuje się przy jednoczesnym dodaniu Ni i Cu. Własności te przewyższają własności spieków, które zawierają tylko Cu lub tylko Ni. Najlepsze rezultaty otrzymuje się dla spieków o zawartości 5% Ni i 4,5% Cu. Wpływ dodatków stopowych przedstawia tabela 5.5 [6].

Tabela 5.5.

Dodatki stopowe	Gęstość prasowania	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie	Ciężnienie prasowania	Twardość	
	g/cm				kG/mm ²	%
0%	6,6	19,0	13	3,9	50	
	7,0	24,0	19	6,4	61	
	7,2	27,0	24	8,1	66	
2,5%Ni	6,6	22,0	10	3,8	59	9
	7,0	28,0	15,5	5,7	75	14
	7,2	31,8	19,2	7,5	83	30
2,5% Ni 3% Cu	6,6	42,5	2,1	4,8	106	56
	7,0	52,5	3,4	7,3	129	68
	7,2	55,5	5,0	9,8	140	74
2,5% Ni 4,5% Cu	6,6	50,5	1,6	5,5	125	75
	7,0	61,2	2,4	9,0	154	93
	7,2	64,4	2,9	12,5	168	102
5% Ni 1,5% Cu	6,6	33,5	2,8	5,0	89	39
	7,0	41,5	3,9	6,2	112	51
	7,2	45,5	5,5	8,8	123	57
5% Ni 3% Cu	6,6	46,0	2,2	4,5	120	70
	7,0	56,4	3,1	7,0	148	87
	7,2	61,5	4,0	11,0	163	97
5% Ni 4,5% Cu	6,6	54,2	1,4	4,8	143	93
	7,0	67,0	2,0	9,0	174	113
	7,2	-	2,7	15,0	190	124

Różnica twardości została obliczona w stosunku do czystego Fe (bez dodatków stopowych).

● Molibden.

Molibden stosuje się w małych ilościach, przeważnie do 0,5% jako dodatek uszlachetniający. Stosowany jest do proszków żelaza zawierających dodatki Ni lub Ni i Cu. Zwiększa hartowność i wytrzymałość na rozciąganie.

● Aluminium.

Dodatek Al w ilościach 0,5 - 1% podwyższa twardość spieków, obniża natomiast własności plastyczne tj. udurowienie i wytrzymałość na zginanie [7].

● Chrom.

Chrom zwiększa silnie hartowność stali spiekanych, a także własności żaroodporne. Silne powinowactwo chromu do tlenu powoduje jego utlenianie i utrudnia wprowadzenie tego dodatku do spieku, pogarsza się także prasowalność proszków. Z tego powodu chrom nie znajduje szerokiego zastosowania i zastępuje się go molibdenem.

● Siarka.

Siarka powoduje wzrost ciągliwości w wyniku sferoidyzacji porów, a także wzrost twardości i wytrzymałości na rozciąganie.

● Fosfor.

Fosfor polepsza własności mechaniczne i powoduje wzrost wydłużenia. Największy wpływ fosforu obserwuje się przy zawartości 0,8% P w spieku. Przykładowo przy tej zawartości wytrzymałość na rozciąganie spieku wynosi ok. 500 MPa.

5.4. Obróbka cieplno-chemiczna.

W celu podwyższenia własności fizycznych i mechanicznych spieków stosuje się dodatkowo obróbkę cieplną lub cieplno-chemiczną. Najczęściej stosowane są następujące zabiegi:

- hartowanie,
- odpuszczanie,
- nawęglanie,
- cyjanowanie (węgloazotowanie),
- azotowanie.

Z uwagi na specyficzne własności spieków, a głównie ze względu na ich porowatą strukturę rezultaty otrzymywane po przeprowadzeniu obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej różnią się ilościowo od wyników uzyskiwanych dla materiałów litych o tym samym składzie chemicznym.

Przykładowo, porowatość znacznie obniża przewodność cieplną spieków, co wpływa zasadniczo na czasy nagrzewania i chłodzenia w procesie hartowania. W porównaniu z materiałem litym spiek wymaga zdecydowanie intensywniejszego chłodzenia. Nie bez znaczenia jest również fakt przenikania wгłęb porów czynnika chłodzącego, co może obniżyć końcowy efekt przeprowadzanego zabiegu.

Sposób prowadzenie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej zależy w istotną sposób od gęstości właściwej (porowatości) spiekanego materiału. Dla gęstości spieków (na bazie proszków żelaza) powyżej $7,2 \text{ g/cm}^3$ proces obróbki cieplnej przebiega prawie tak samo jak dla materiałów litych. Dla gęstości mniejszych różnice są już dość znaczne.

● Hartowanie.

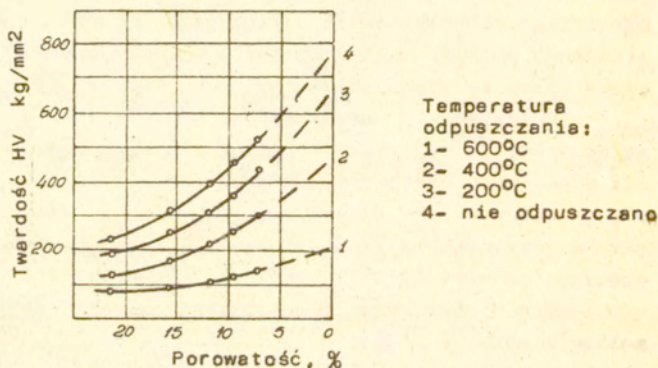
Hartowanie to zabieg cieplny powodujący podwyższenie własności wytrzymałościowych przy obniżeniu własności plastycznych obrabianego materiału.

Nagrzewanie podczas hartowania spieków żelaza o gęstości poniżej $7,2 \text{ g/cm}^3$ przeprowadza się wyłącznie w piecach z atmosferami ochronnymi, jak np. wodór, zdysocjowany amoniak, egzot lub endogaz. Studzenie prowadzi się w olejach, których resztki

pozostałe w porach przeciwdziałają powstawaniu ognisk korozji wewnątrz spieków.

Hartowanie spieków żelaza o gęstości powyżej $7,2 \text{ g/cm}^3$ prowadzi się tak samo jak dla materiałów litych. Brak porów otwartych umożliwia stosowanie urządzeń bez atmosfery ochronnej a studzenie przeprowadza się w wodzie lub oleju, w zależności od składu chemicznego spieku.

Przykładowe zależności między twardością ulepszonej cieplnie spiekanej stali a jej porowatością i temperaturę odpuszczania przedstawił rys. 5.11, [8].



Rys. 5.11. Twardość ulepszonych cieplnie stali spiekanych w zależności od temperatury odpuszczania i porowatości.

● Nawęglanie.

Zabieg ten polega na wzbogaceniu w węgiel powierzchniowej warstwy przedmiotu drogą dyfuzji. Stosuje się w celu uzyskania twardej i odpornej na ścieranie powierzchni. Jako środki nawęglające stosuje się między innymi: grafit, częściowo spalony propan i inne.

Z uwagi na obecność porów w spiekonym materiale dyfuzja aktywnych atomów węgla w głąb materiału przebiega o wiele szybciej.

ciej niż w materiale litym. Ponadto głębokość nawęglania jest kilkakrotnie większa przy łagodnej zmianie koncentracji węgla między warstwę powierzchniową a wnętrzem spieku.

Dla spieków o gęstości poniżej $6,5 \text{ g/cm}^3$ nawęglania następuje na wskroś. Regulacja głębokości warstwy nawęglanej czasem trwania procesu jest nieskuteczna. Dla gęstości powyżej $6,5 \text{ g/cm}^3$ głębokość tę reguluje się temperaturą nawęglania i czasem trwania zabiegu. Dla gęstości powyżej $7,2 \text{ g/cm}^3$ zabieg nawęglania przebiega podobnie jak w materiałach litych. W celu utwardzenia powierzchni nawęglanej spieki, podobnie jak materiały lite, poddaje się hartowaniu bezpośrednio z temperatury nawęglania. Uzyskiwane twardości są nieco niższe w porównaniu z materiałami litymi.

● Węglazotowanie.

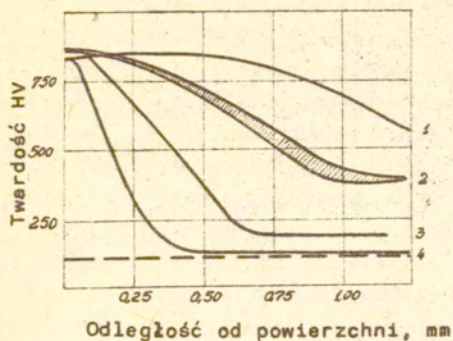
W porównaniu z nawęglaniem węglazotowanie ma tę zaletę, że umożliwia uzyskiwanie powtarzalności własności warstwy utwardzanej, bowiem azot zwiększa hartowność żelaza i znacznie zmniejsza rozrzut twardości spieków np. Fe-Cu.

Najczęściej stosuje się węglazotowanie gazowe prowadzone w mieszaninie gazu nawęglającego i amoniaku. Atmosferą nawęglającą jest endogaz otrzymany przez częściowe spalanie gazu ziemnego. Dodatek amoniaku do tego gazu wynosi ok. 2 %.

Węglazotowanie należy przeprowadzać w temp. $800-875^\circ\text{C}$. Hartowanie i odpuszczanie detali odbywa się w oleju w temp. 140°C . Przekroczenie tej temperatury może powodować spadek twardości.

Rozkład twardości w zależności od głębokości i gęstości spieku oraz temperatury i czasu węglazotowania przedstawia rys.5.12.

Podobnie jak w procesie nawęglania duży wpływ na głębokość warstwy utwardzonej ma porowatość. Pory zamknięte nie mają większego znaczenia, pory otwarte natomiast wpływają na zwiększenie grubości warstwy.



- Temperatura i czas
węglazotowania
oraz gęstość spieku:
- 1- 875°C, 60min, 6,3 g/cm³
 - 2- 875°C, 60-90 min,
7,2 g/cm³
 - 3- 875°C, 30min, 7,2 g/cm³
 - 4- 825°C, 30min, 7,2 g/cm³

Rys.5.12. Zmiana twardości w zależności od głębokości, gęstości spieku oraz temperatury i czasu węglazotowania [9]

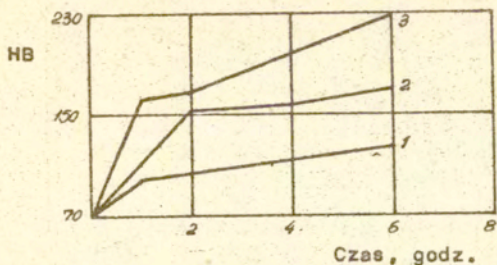
● Azotowanie

Spieki z proszków żelaza można również poddawać utwardzeniu powierzchniowemu drogą azotowania. W wyniku dyfuzyjnego przenikania azotu w głąb spieku tworzą się twarde i odporne na ścieranie warstewki azotków Fe_4Ni i Fe_2Ni .

Porowata struktura spieków umożliwia znaczną dyfuzję azotu, co prowadzi do dużych zmian wymiarowych.

Azotowanie spieków żelaza lub stali węglowych nie daje dużego wzrostu twardości. Poza tym azotki żelaza nie są trwałe w podwyższonych temperaturach. Dlatego do azotowania stosuje się zwykle spiekane stopy zawierające dodatki Al, Ti, V, Cr i Mo, które tworzą trwałe azotki o wysokiej twardości. W/w dodatki stopowe wymagają zastosowania specjalnych atmosfer ochronnych co ogranicza ich wykorzystanie.

Przykładowo wpływ dodatku Al na wzrost twardości warstwy azotowanej przedstawia rys.5.13.



1- SC 100.26, 2- SC 100.26+0,5% Al,
3- SC 100.26 + 1,0% Al

Rys.5.13. Wpływ czasu azotowania w temp. 540°C w atmosferze amoniaku na zmiany twardości powierzchniowej, [7].

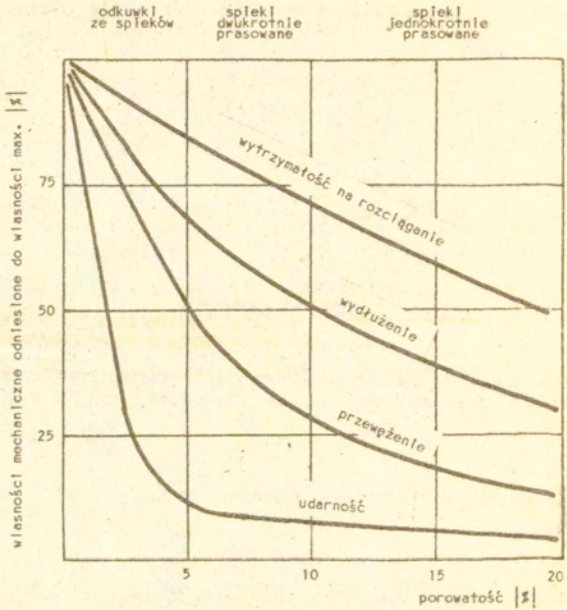
5.5. Ulepszająca obróbka mechaniczna.

Właściwości wyrobów spiekanych determinowane są głównie, dla ustalonego składu chemicznego, przez ich strukturę i gęstość (porowatość). Wytwarzane poprzez jednokrotne lub dwukrotne prasowanie spieki posiadają porowatość od 5-20% i pomimo znacznej wytrzymałości statycznej charakteryzują się małą plastycznością, niską udernością i niedostateczną wytrzymałością zmęczeniową.

Wpływ porowatości na właściwości mechaniczne spieków żelaza przedstawił rys.5.14, [10]. Widać, że nawet mała porowatość znacznie obniża właściwości wyrobów, szczególnie plastycznych.

W praktyce dąży się zatem, drogą dodatkowej obróbki mechanicznej, do całkowitej likwidacji wewnętrznej porowatości i uzyskania spieków bez wewnętrznych nieciągłości.

Tę dodatkową obróbkę mechaniczną można podzielić na obróbkę dotyczącą całego spieku oraz na wykorzystującą efekty zgniotu jego warstw wierzchnich.



Rys. 5.14. Wpływ porowatości na własności mechaniczne spieków.

Obróbka mechaniczna spieków zmieniająca ich własności w całej objętości.

Stosuje się następujące procesy mechaniczne pozwalające na zmniejszenie porowatości w całej objętości spieków:

- prasowanie izostatyczne na zimno i na gorąco spieków wstępnie prasowanych,
- doprasowywanie na gorąco - polega ono na powtórnych prasowaniu w matrycy kształtki niespieczonej lub po spiekanu, przy czym podgrzaniu podlega albo kształtka albo matryca.

- kucie na gorąco,
- dogniatanie (doprasowywanie) na zimno wstępnie ukształtowanych spieków na prasie z wahającą matrycą.

Z uwagi na znaczenie technologiczne omówimy tutaj krótko tylko dwa ostatnie procesy. Pierwsze dwa, ze względu na małą wydajność i duży koszt nie są powszechnie stosowane.

● Kucie na gorąco spieków.

Procesowi kucia na gorąco poddaje się spieki żelaza w celu uzyskania ich gęstości zbliżonych do gęstości teoretycznych (materiałów litych). Np. w wyniku kucia spieków stalowych otrzymuje się elementy o własnościach odpowiadających stalom litym, przerabianym plastycznie o tym samym składzie chemicznym [11].

Najczęściej stosuje się kucie matrycowe, polegające na jednoudarzeniowym (przy jednym suwie roboczym) ukształtowaniu ogrzanej przedkuwki umieszczonej w matrycy.

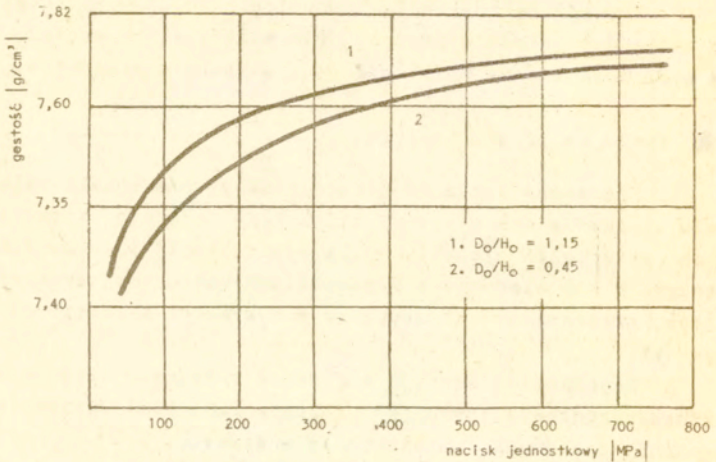
Gęstości otrzymywanych odkuwek są determinowane przez parametry procesu kucia, głównie przez nacisk jednostkowy, temperaturę kucia oraz stopień odkształcenia plastycznego. Wzrostowi tych parametrów towarzyszy wzrost zagęszczania odkuwek, jednak czynnikiem decydującym, zwłaszcza w pobliżu gęstości teoretycznych, jest nacisk jednostkowy, rys. 5.15, [12].

Na rys. 5.16 przedstawiono zależność gęstości odkuwek z niskowęglowej spiekanej stali konstrukcyjnej (stal 25) od temperatury kucia oraz stopnia odkształcenia, [13].

Na rys. 5.17 zestawiono najważniejsze własności mechaniczne spieków i odkuwek wykonanych ze stali 25 i porównane je z danymi katalogowymi stali 25 (litej).

W procesie kucia na gorąco wysokie gęstości odkuwek wykonanych ze spieków uzyskuje się przy znacznie niższych naciskach jednostkowych aniżeli w procesie formowania proszków na zimno, przy czym gęstość przedkuwek nie ma zauważalnego wpływu na wielkość nacisku jednostkowego.

Rozkład porowatości szczątkowej w odkuwkach jest korzystny i bardziej równomierny w porównaniu z porowatością



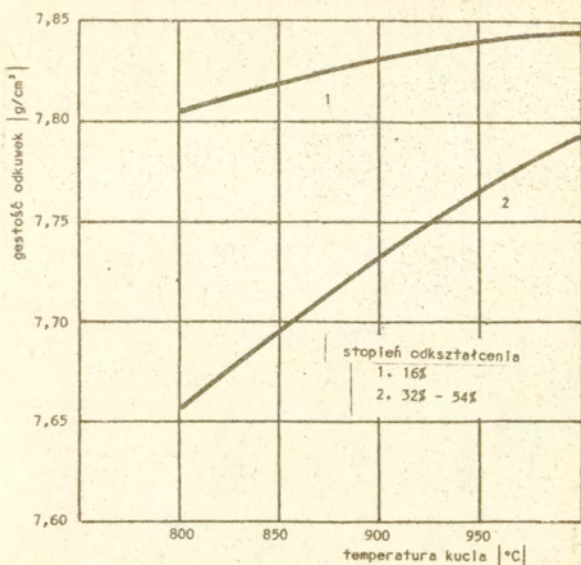
Rys. 5.15. Współzależność gęstości odkuwek i nacisku jednostkowego (stal niskostopowa).
 D_0, H_0 - średnica i wysokość przedkuwki walcowej.

spieków. Dotyczy to głównie wielkości porów i ich wewnętrznej powierzchni. Należy zaznaczyć, że zęszczanie odkuwek odkształcanych z intensywnym bocznym płynięciem jest korzystniejsze - swobodne spęczanie materiału porowatego w pierwszym etapie kucia matrycowego wpływa skutecznie na likwidację porów.

● Dogniatanie na zimno spieków wahającą matrycą.

Metoda ta polega na przyłożeniu do wyrobu skupionego nacisku i szybkim przemieszczeniu go po całej powierzchni dogniatania przez cykliczne wychylenie stempla od osi (prasowanie obwiedniowe) według założonego programu. Wykorzystuje się prasy z wahającą matrycą, opartą na patencie Z. Marciniaka, [14], [15].

Dogniatanie na zimno wahającą matrycą jest skuteczną metodą otrzymywania spieków o gęstościach bliskich gęstościom ma-



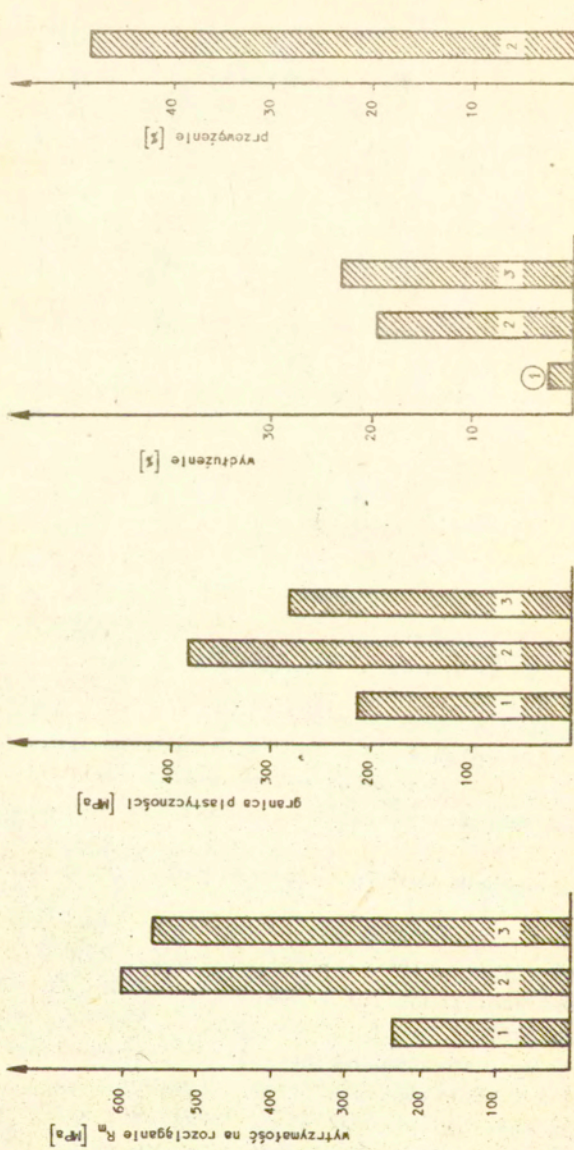
Rys. 5.16. Zależność gęstości odkuwek od temperatury kucia, stal 25.

teriałów litych (porowatość mniejsza niż 1,25 %). Analogiczne zagęszczenie spieków było dotychczas możliwe metodą kucia na gorąco. Średnia gęstość otrzymywanych tą metodą wyrobów nie zależy od gęstości początkowej spieków (przedkuwek), [16].

● Mechaniczna obróbka warstw wierzchnich spieków.

W procesie spiekania prasowane elementy z proszków metali zmieniają w różnym stopniu swoje wymiary a otrzymywane gładkości powierzchni, jak też ich twardości są niekiedy niezadowolające.

W celu uzyskania wysokich tolerancji oraz odpowiedniej gładkości i twardości powierzchni spieków stosuje się szereg rodzajów obróbki wykończającej, takich jak kalibrowanie (tłoczenie i wytłaczanie wykończające), rolkowanie, krążkowanie,



1 - epiek, 2 - kute epiekane stal, 3 - dane katalogowe dla stali 25
Rys.5.17. Właściwości mechaniczne epieków i odkuwek stali 25.

kulkowanie i inne.

W wymienionych operacjach wykorzystuje się następujące efekty zgniotu warstw wierzchnich spiekanych części maszyn; [17]

- zagęszczenie warstw wierzchnich,
- ujednorodnienie struktury powierzchni,
- wzrost gładkości powierzchni; zamykanie porowatości otwartej na powierzchni stwarza możliwość uzyskania ciągłego profilu powierzchni w szerokim zakresie gęstości spieków (dla spieków żelaza już od gęstości 5 g/cm^3),
- wzrost twardości warstw wierzchnich (tzw. mezotwardość),
- wzrost wytrzymałości zmęczeniowej wskutek w/w efektów a także w wyniku wytworzenia w warstwie wierzchniej naprężeń ściskających; następuje przesunięcie ognisk zmęczeniowych z powierzchni w głąb materiału,
- wzrost odporności na ścieranie,
- wzrost odporności na korozję.

Zagęszczenie warstw wierzchnich i likwidacja porowatości otwartej są korzystne przy dalszej obróbce powierzchni, np. poprzez nanoszenie powłok i obróbkę cieplno-chemiczną. Temperatury procesów cieplno-chemicznych nie mogą przekraczać temperatury rekryształizacji materiału ze względu na zanikanie skutków zgniotu.

Literatura do rozdziału 5.

- [1] W.SCHATT, Pulvermetallurgie Sinter- und Verbundwerkstoffe, Lipsk, 1977,
- [2] F.W.REGEL, Die Anwendung des Dampfbehandlungsverfahrens bei gesinterten Eisenteilen, Werkstatt u. Betrieb, 1963,
- [3] SZ.ADAMCZAK, F.ALEKSANDEREK, Wytwarzanie części maszyn z proszków metali, WNT, Warszawa, 1964,
- [4] L.CEDRO, M.LEWICKA, Wybrane czynniki kształtujące własności mechaniczne spieków stali konstrukcyjnych, Zesz. Nauk. Polit. Świętokrzyskiej, Mechanika, 22, 1980,
- [5] T.NARBUTT, R.BUGAJ, Dodatek cyny do spieków na osnowie żelaza, Metalurgia Proszków, 1, 1977,

- [6] G.ZAPF, W.VÖLKER, R.REINSTANDLER, Entwicklung von Fertigungsmethoden zur Erzeugung hochfester Sintererteile, Westdeutcher Verlag - Köln und Oplaten, 1965,
- [7] J.MICHAŁOWSKI, Wpływ dodatku aluminium na własności i strukturę spieków żelaza, Biul. WAT, 8, 1981,
- [8] R.KIEFER, W.HOTOP, Sintereseisen und Sinterstahl, Wien, 1948,
- [9] R.MEYER, M.SALAMON, Revue de Metallurgie, t.62,3,1965,
- [10] R.SZYNDLER, S.SZCZEPANIK, Wpływ parametrów technologicznych kucia matrycowego na gęstość odkuwek wykonanych ze spiekanej stali 45, Zesz. Nauk. AGH, Metalurgia i Odlewnictwo, 4, 3, 1978,
- [11] T.NARBUTT, W.CEGIELSKI, Nowe techniki wytwarzania spiekanych części maszyn, Metalurgia Proszków, 2, 1981,
- [12] S.SZCZEPANIK, Zagęszczenie materiału w procesie kucia matrycowego przedkuwek z proszków metali, Zesz. Nauk. AGH, Metalurgia i Odlewnictwo, 3, 1983,
- [13] Z.GOGÓŁKA, Własności fizyczne i mechaniczne odkuwek matrycowych ze spiekanej stali 25, Zesz. Nauk. AGH, Metalurgia i Odlewnictwo, 2, 1981,
- [14] J.OGRODNIK, Wpływ dogniatania wahającą matrycę na własności i strukturę spieków Fe, Praca Doktorska, Politechnika Warszawska, 1975,
- [15] J.OGRODNIK, T.KARPIŃSKI, Elementy z proszków spiekanych prasowane wahającą matrycę, Przegląd Mechaniczny, 20, 1975,
- [16] J.MICHAŁOWSKI, J.PIĘTASZEWSKI, Wpływ dogniatania spieków o niskiej gęstości wahającą matrycę na zmiany niektórych własności mechanicznych, Biul. WAT, 12, 1982,
- [17] W.OLSZEWSKI, Możliwości wykorzystania efektów zgniotu warstwy wierzchniej spiekanych części maszyn, Metalurgia Proszków, 3-4, 1982.