

Rozdział 6.

OCENA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH SPIEKÓW ŻELAZA NA PODSTAWIE BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

W rozdziale omawia się cel i zakres badań wytrzymałościowych spieków wykonanych z krajowych i importowanych proszków żelaza. Szczegółowo przedstawia się sposób przygotowania próbek i przebieg prób wytrzymałościowych oraz podaje wyniki i ich interpretację. Rozdział zawiera ponadto uwagi dotyczące badania własności plastycznych spieków a kończy go wnioski podsumowujące wyniki badań.

6.1. Zakres badań.

W związku z potrzebą oceny przydatności krajowych proszków żelaza do wytwarzania spiekanych elementów maszyn przeprowadzono szereg prób wytrzymałościowych spieków.

Zasadniczym celem tych badań było porównanie własności mechanicznych próbek wykonanych z proszków krajowych (P1) i importowanych (S) a także odniesienie tych własności do "klasycznego" tworzywa konstrukcyjnego - żeliwa. Uzyskano ponadto szereg informacji istotnych przy formułowaniu równań konstytutywnych ciągliwych ośrodków porowatych (spieków metali).

Badania doświadczalne umożliwiły określenie niektórych stałych materiałowych spieków (moduły sprężystości podłużnej E i poprzecznej G , liczby Poissona ν) a ponadto ich wytrzymałości R_m , R_g , R_k , granice plastyczności R_z , uderności KC i twardości HB .

Zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych obejmował próby osiowego rozciągania i ściskania, statycznego i dynamicznego zginania, skręcania, twardości. Dla określenia początkowej powierzchni uplastycznienia styków wykonano rów-

niez próby w płaskim stanie naprężenia na próbkach rurkowych.

Otrzymane wyniki doświadczeń pozwalają ocenić przydatność krajowych proszków żelaza do wytwarzania spiekanych elementów maszyn.

6.2. Przygotowanie próbek.

Badaniom wytrzymałościowym poddano próbki spieków wykonanych z proszków P1 (ZM Trzebinia) i z proszków S (Höganäs NC) o różnych domieszkach proszku miedzi (2,5% i 10%).

W tabeli 6.1. podano zestawienie podstawowych cech tych proszków. Są to, oprócz własności fizyko-chemicznych, także własności typowo technologiczne takie jak: prasowalność (zgęszczalność i formowalność), gęstość nasypowa i sypkość. Należy nadmienić, że obowiązujące w tym zakresie norma (PN-71/H-97033) określa gatunek proszku z uwagi na skład chemiczny a odmiany proszku ze względu na ziarnistość, gęstość nasypową i sypkość.

Tabela 6.1.

Proszek żelaza	polski	Höganäs NC
1. Skład chemiczny		
C	do 0,04%	od 0,01 do 0,02%
Mn, P, S, Si	do 0,6%	do 0,015%
2. Prasowalność		
a zgęszczalność przy 600 MPa	ok. 6,6 Mgm ⁻³	-
b formowalność przy 6,6 Mgm ⁻³	ok. 93,8%	98,5 - 99,5%
3. Gęstość nasypowa	2,6-3,2 Mgm ⁻³	2,3 - 2,5 Mgm ⁻³
4. Sypkość	21 - 28s	ok. 30s
5. Analiza sitowa	zbliżona	
6. Kształt ziarna	nieregularny o kanciastych brzegach i nierozwiniętej powierzchni	nieregularny

Gotowe spieki zawierają dwie różne ilości miedzi - 2,5% i 10%. Parametry technologiczne ich wytwarzania nie odbiegały od parametrów typowych dla produkcji części maszyn ze spieków żelaza. Stosowano więc jednokrotne prasowanie i spiekanie przy następujących parametrach technologicznych:

- ciśnienie prasowania - 400 MPa
- temperatura spiekania ok. 1100°C
- czas spiekania ok. 30 min.

Uzyskane gęstości i porowatości próbek ujęto w tabeli 6.2.

Tabela 6.2.

Rodzaj materiału	ρ_{sp}	ρ_{szk}	ρ_{uzel}	f_v
	g/cm ³	g/cm ³	-	-
Pl/2,5% Cu	6.45	7.89	0.818	0.182
S/2,5% Cu	6.46	7.89	0.819	0.181
Pl/10% Cu	6.08	7.97	0.764	0.237
S/10% Cu	6.10	7.97	0.765	0.235

Otrzymanych spieków nie można dokładnie zakwalifikować według norm branżowych BN-76/0886-24 i 25. Spieki te zawierają śladowe ilości C podczas gdy normy te przewidują znacznie większą zawartość węgla. Najbliższe gatunki spieków według norm to :

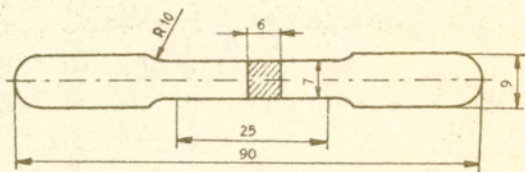
- spiekane żelazo OF-000 (gęstość 5,7-6,1),
- spiekane żelazo OF-000 (gęstość 6,1-6,5),
- stal miedziana bezwęglowa OFB-0200 (gęstość 5,7-6,1),
- stal miedziana bezwęglowa OFB-0200 (gęstość 6,1-6,5).

Własności mechaniczne badanych spieków będą zatem porównywane z własnościami powyższych gatunków.

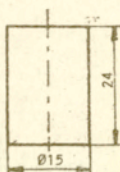
Próbki do rozciągania, ściskania, zginania i uderności zostały przygotowane jako spieki w gotowej formie, natomiast próbki rurkowe do skręcania uzyskano drogą dodatkowej obróbki

skrawaniem innych elementów spiekanych (kół zębatych).

Kształty i wymiary próbek do rozciągania (czterokrotny ściskania i skręcania przedstawiono odpowiednio na rys.6.1, rys.6.2 i rys.6.3. Próbom statycznego zginania i udarności po-
dano takie same próbki jak dla osiowego rozciągania.



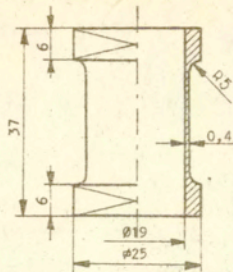
Rys.6.1. Próбка na rozciąganie i zginanie.



Rys.6.2. Próбка na ściskanie.

Liczbę próbek ustalono według przedmiotowych norm. W przypadku prób wytrzymałościowych minimalna ilość próbek wynosi 5 i te wymagania były spełnione z wyjątkiem prób skręcanie i pomiarów twardości, gdzie wykonano odpowiednio 3 i 4 próby.

Należy podkreślić, że ponieważ przygotowanie próbek, a zwłaszcza spiekanie, powinno przebiegać w podobny sposób jak przy produkcji seryjnej wyrobów spiekanych, dlatego do spiekania próbki rozłożono pomiędzy wyrobami w sposób losowy.



Rys.6.3. Próbkę na skręcanie.

6.3. Próby wytrzymałościowe.

W ramach porównawczych badań doświadczalnych przeprowadzono następujące próby wytrzymałościowe spieków:

- próbę osiowego rozciągania,
- próbę osiowego ściskania,
- próbę skręcania,
- próbę statycznego zginienia,
- próbę uderności,
- pomiary twardości.

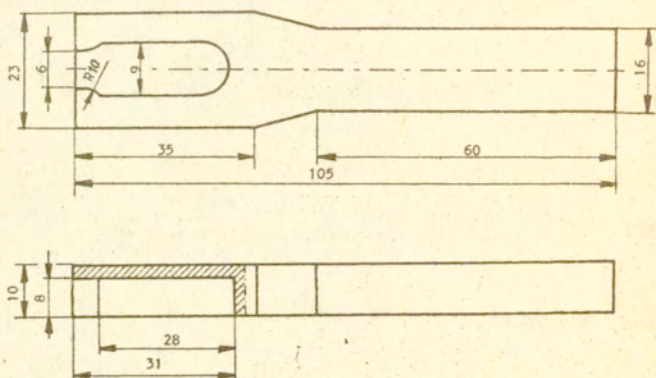
Istnieją odpowiednie normy (oprócz próby skręcania), które opisują przygotowanie próbek, sposób prowadzenia próby oraz opracowania wyników.

Próba osiowego rozciągania (PN-75/H-04937) zmierzała do określenia wytrzymałości spieków przy rozciąganiu R_m . Przeprowadzono ją na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej (fot.1.).

Z uwagi na niewielkie wymiary próbek oraz możliwości chwytowe maszyny skonstruowano i wykonano specjalne uchwyty (rys.6.4.).

Próbkę rozciągano do momentu zerwania z prędkością nie przekraczającą $10 \text{ N/mm}^2\text{s}$, wykonując jednocześnie wykres $F - \Delta l$,

będący podstawą do określenia modułu sprężystości podłużnej E . Odczytana na siłomierzu największa siła obciążająca, odniesiona do przekroju poprzecznego określała R_m .

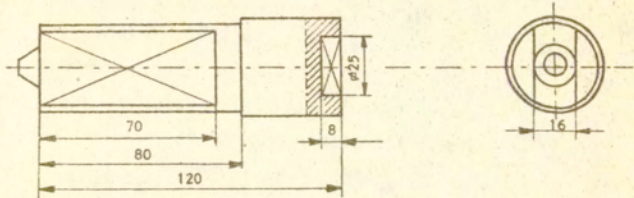


Rys.6.4. Uchwyt do osiowego rozciągania próbek.

W próbie osiowego ściskania (PN-76/H-04947) wyznaczano doświadczalnie krzywą umocnienia. Próbkę, umieszczoną w uchwycie zapewniającym osiowe ściskanie, (fot.2, Dodatek A) obciążano skokowo dokonując równocześnie mikrometrem pomiarów zmiany jej wysokości Δl i średnicy Δd . Tak otrzymane wyniki pozwoliły określić umowną granicę plastyczności R_2 , współczynnik Poissona ν i jego zmianę w funkcji odkształceń. Dla zachowania jednorodnego stanu odkształcenia w próbce (nawet przy odkształceniach sięgających 25%) używano folii teflonowej, która bardzo ograniczyła siły tarcia na powierzchniach czołowych.

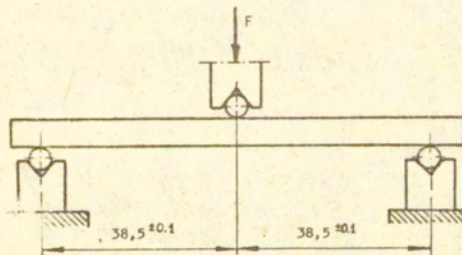
Wytrzymałość spieków na ścinanie określano w próbie skręcania rurek cienkościennych ($t/r < 1/20$). Próbki umieszczone w specjalnych uchwytach (rys.6.5), poddawano powolnemu skręcaniu na skręcarce (fot.3a,b), odczytując moment skręcający i odpowiadający mu kąt skręcenia. Wykonane były również bezpośrednio na maszynie wykresy $M_\varphi - \varphi$. Na podstawie wyników określono

wytrzymałość na ścinanie R_t i moduł sprężystości poprzecznej G .



Rys.6.5. Uchwyt do skręcania próbek.

Oznaczenie wytrzymałości na zginanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-81/H-04942. Użyto takich samych próbek jak do rozciągania. Przyrząd do obciążania, składający się z dwóch rolek podporowych i rolki obciążającej o średnicach $9^{+0,1}$ mm, miał zasadnicze wymiary jak na rys.6.6.



Rys.6.6. Schemat obciążania próbki przy zginaniu.

Wzrost obciążenia był powolny i jednostajny. Czas przyłożenia siły do zniszczenia próbki nie był krótszy od 10 s. Znając wymiary próbki i schemat obciążania wyznaczano R_g .

Próby udarnościowe przeprowadzono metodą Charpy'ego używając próbek bez karbu, takich samych jak przy rozciąganiu (PN-

82/H-04953). Pozwoliło to określić udarność KC spieków tylko w jednym kierunku prasowania (poprzecznym).

Pomiary twardości wyrobów spiekanych wykonano metodą Brinella, tak jak przewiduje to norma PN-81/H-04940. Poprzedzono je wyznaczeniem klasy twardości próbki na podstawie pomiaru twardości Vickersa przy użyciu obciążenia 49,03 N (HV5). Następnie wybrano warunki pomiaru odpowiednie dla danej klasy. Warunki te były jednakowe dla spieków z proszków krajowych jak i importowanych i określają je: średnica kulki (2,5mm), obciążenie (62,5 N) i czas obciążenia (10 s).

6.4. Wyniki badań wytrzymałościowych.

● Próba statycznego rozciągania.

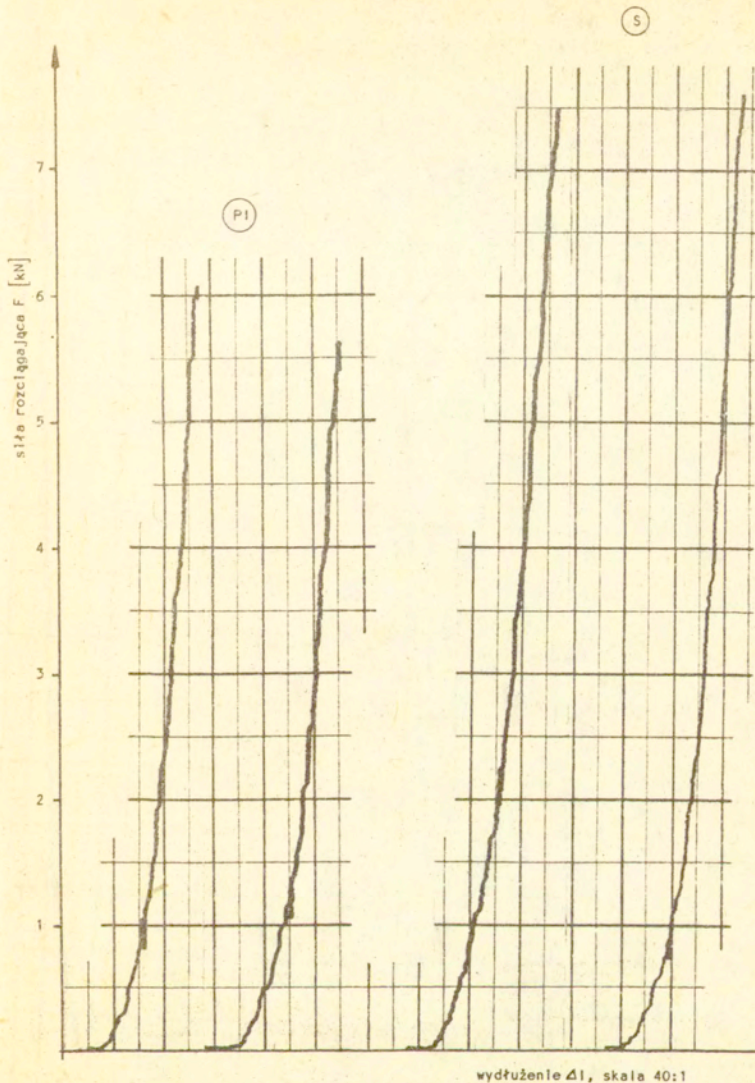
Graficzny obraz (przykładowe krzywe) przebiegu zależności siły rozciągającej F od wydłużenia Δl próbki dla badanych rodzajów materiału przedstawiono na rysunkach 6.7. i 6.8.

Z przebiegu krzywych wynika, że w całym zakresie zmian wartości siły F badane próbki spiekane zachowują własności sprężyste. Istnienie bowiem nieliniowego zakresu zależności w początkowym przedziale rozciągania należy tłumaczyć sposobem mocowania próbek w uchwytach. Wyraźny brak zakresu plastycznego wskazuje na to, że materiały spiekane przy rozciąganiu zachowują się jak materiały kruche.

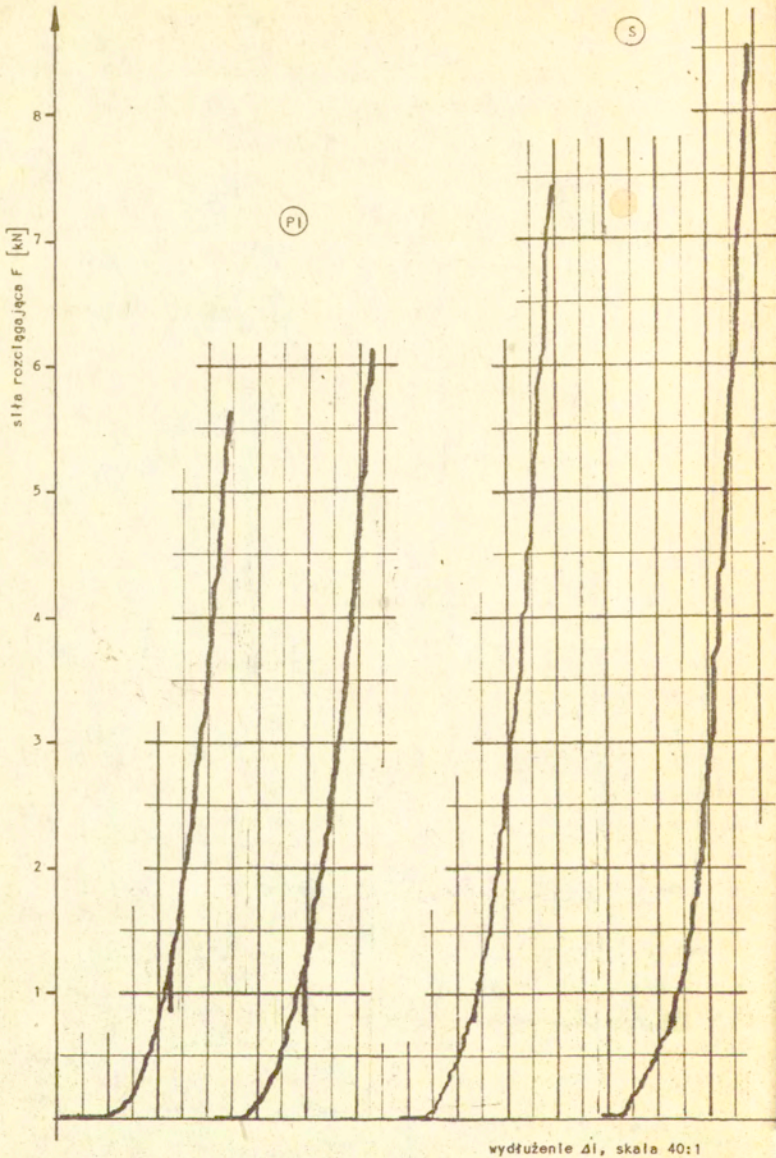
Wartości wytrzymałości R_m wraz z wytrzymałością na rozciąganie żeliwa Zl 14 zestawiono na rys.6.9.

Na podstawie przeprowadzonych prób rozciągania można stwierdzić, że wytrzymałość spieków P1 o zawartości 2,5% i 10% proszku Cu stanowi około 75% wytrzymałości na rozciąganie spieków S a ich wartości bezwzględne są porównywalne z wytrzymałością na rozciąganie żeliwa Zl 14. W obu przypadkach zwiększenie dodatku proszku Cu nieznacznie podwyższa R_m .

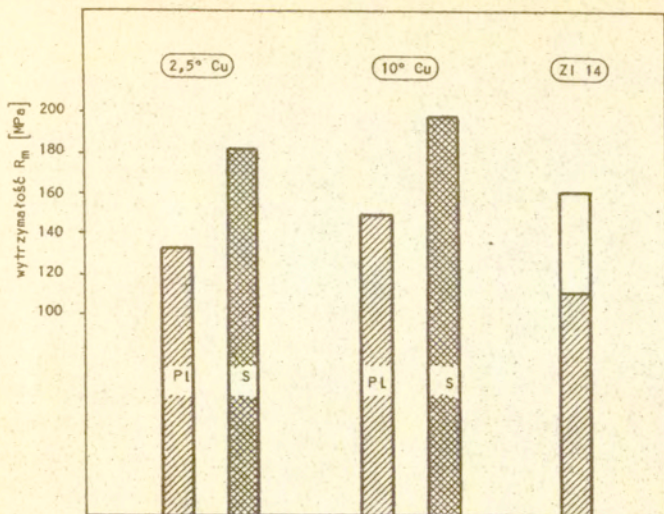
Na rys.6.10. zestawiono ponadto średnie wartości modułów sprężystości E określone na podstawie krzywych rozciągania.



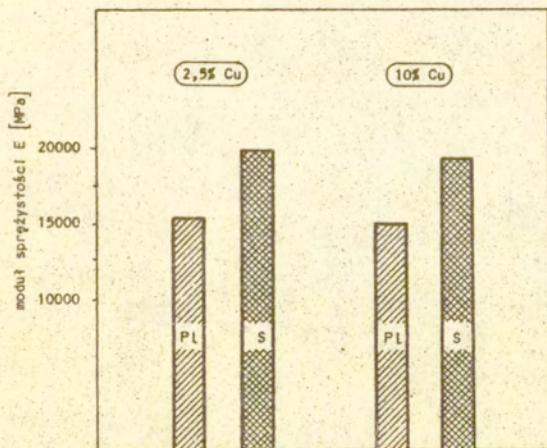
Rys.6.7. Przykładowe wykresy maszynowe przebiegu rozciągania dla spieków o zawartości 2,5% Cu.



Rys.6.8. Przykładowe wykresy maszynowe przebiegu rozciągania dla spieków o zawartości 10% Cu.



Rys.6.9. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie R_m .



Rys.6.10. Porównanie modułów sprężystości podłużnej E .

● Próba statycznego ściskania.

Na podstawie wyników pomiarów zmian wysokości l i średnicy d czterech rodzajów próbek w zależności od wielkości siły ściskającej F wyliczono średnie wartości naprężeń $\bar{\sigma}$, wartości rzeczywistych odkształceń osiowych ϵ_z oraz promieniowych ϵ_r . Zależności pomiędzy tymi wielkościami średnimi ilustrują wykresy na rys.6.11.

Z przebiegu krzywych ściskania wynika, że próbki w trakcie procesu ściskania, w odróżnieniu od procesu rozciągania, zachowują się jak materiały plastyczne.

Przy zawartości 2,5% Cu przebiegi krzywych ściskania próbek z proszku polskiego i szwedzkiego różnią się nieznacznie. Większe różnice zaznaczają się w przypadku 10% zawartości Cu. Podobne reelekcje zachodzą pomiędzy umownymi granicami plastyczności wyznaczonymi z krzywych ściskania dla 2% odkształcenia trwałego (wg normy PN-76/H-04847), rys.6.13. Wzrost zawartości Cu w niewielkim stopniu wpływa na przebieg krzywych ściskania w przypadku próbek z proszku P1, natomiast w przypadku próbek z proszku S powoduje wzrost wzmocnienia.

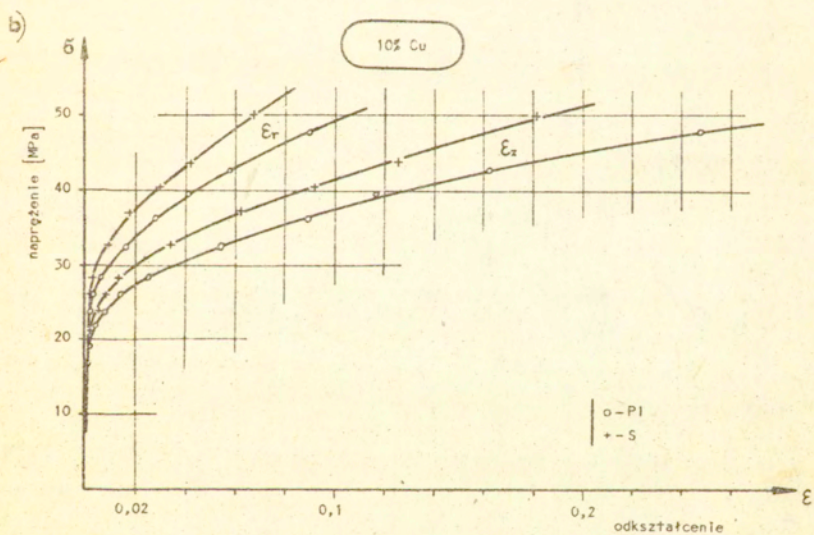
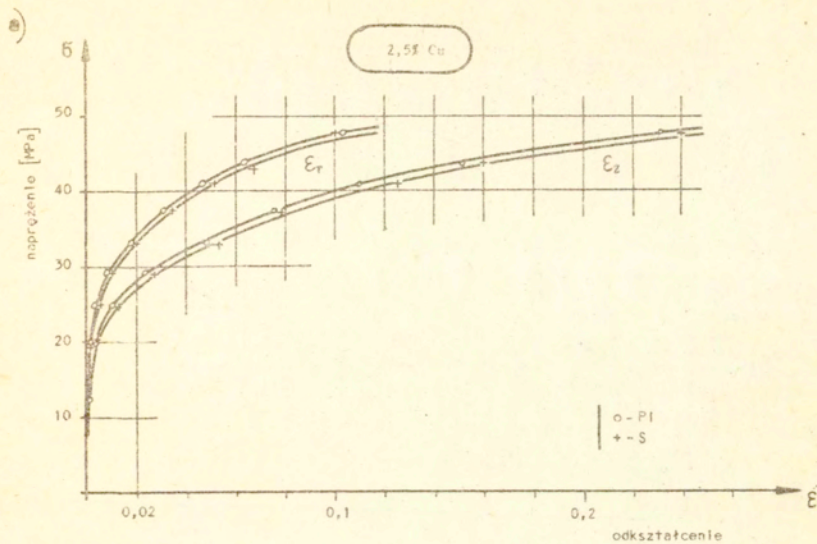
Na rys.6.12. przedstawiono przebiegi zależności odkształceń promieniowych ϵ_r od odkształceń osiowych ϵ_z . Pozwalają one prześledzić zmianę współczynnika Poissona ν , określonego nachyleniem stycznej do krzywej w trakcie przebiegu próby ściskania. Współczynnik Poissona zmienia się w sposób charakterystyczny dla materiałów porowatych. W początkowej fazie ściskania przyjmuje on wartości mniejsze od 0,5, co jest związane ze zmianą porowatości próbki, i dąży asymptotycznie do wartości 0,5 przy dalszym jej ściskaniu.

Warto zauważyć, że przebiegi krzywych ϵ_r od ϵ_z dla spieków z proszków P1 i S pokrywają się.

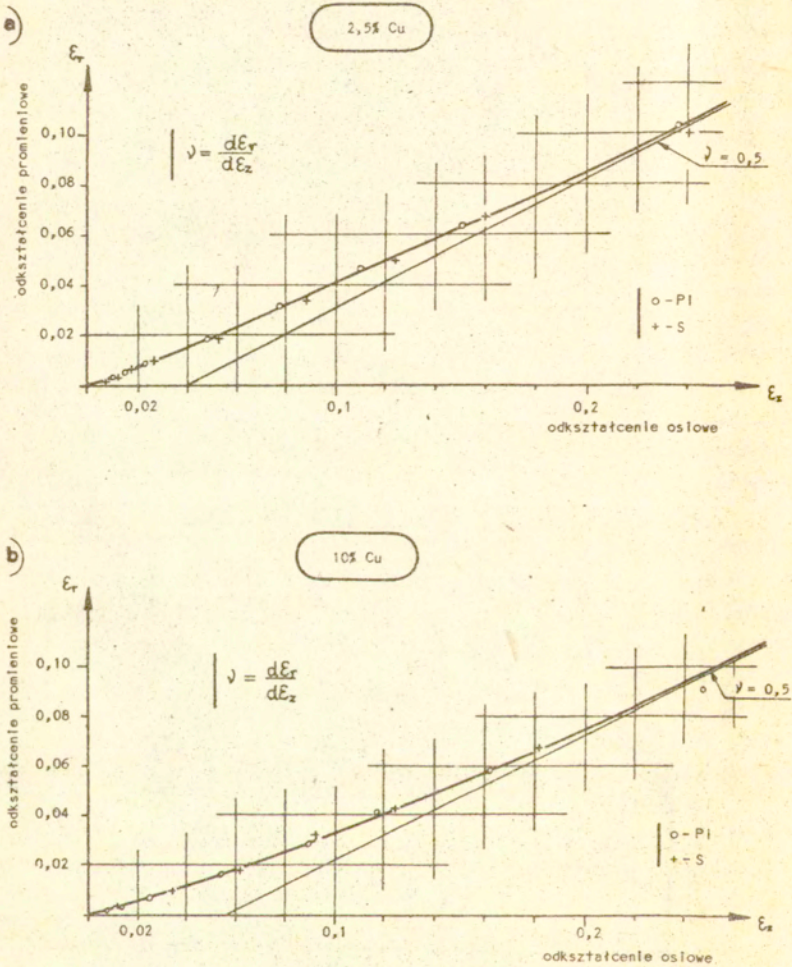
● Próba statycznego skręcania.

Na rys.6.14. zilustrowano przebieg zależności średnich wartości kąta skręcania ψ od wartości momentu skręcającego M_s . Na podstawie tych danych określono średnie wytrzymałości na skręcanie R_t , które zestawiono na rys.6.15.

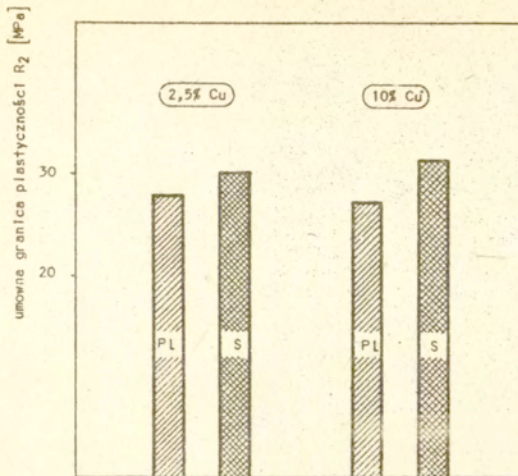
Wytrzymałość na ścinanie spieku P1 stanowi około 80%



Rys.6.11. Krzywe ściskania.



Rys.6.12. Wykres zależności $\epsilon_r - \epsilon_z$ w próbie osiowego ściskania.



Rys. 6.13. Porównanie umownych granic plastyczności przy ścisnieniu.

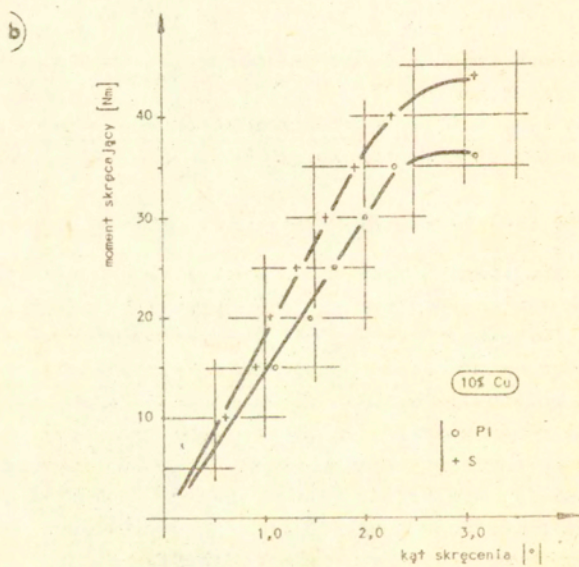
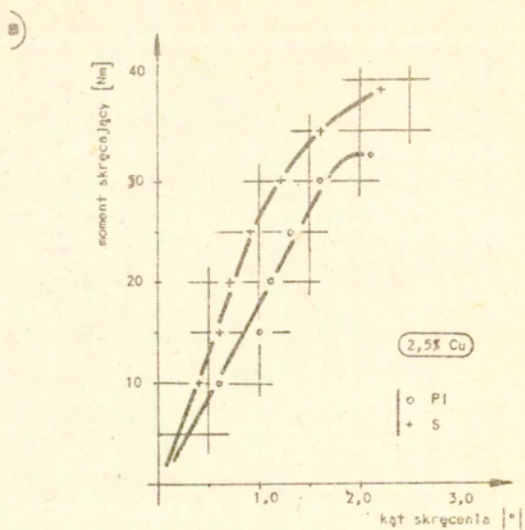
wytrzymałości spieków S. Wzrost zawartości miedzi w obu przypadkach podwyższa wartość R_t .

Na rys. 6.16 przedstawiono porównanie średnich wartości modułów odkształceń postaciowych G.

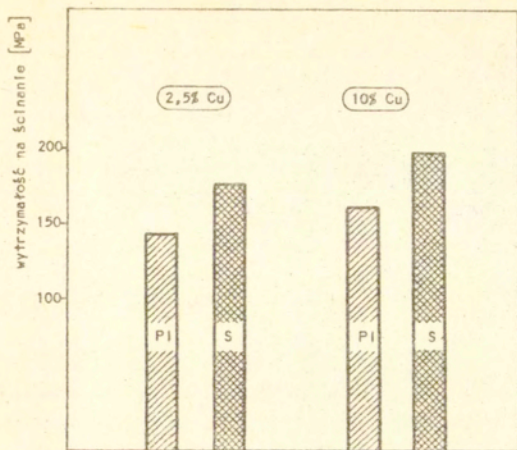
● Próba statycznego zginania.

Przykładowe krzywe zależności siły zginającej F od ugięcia Δf w miejscu przyłożenia siły (rys.6.6) przedstawiono na rys.6.17, natomiast na rys.6.18 zestawiono średnie wartości wytrzymałości na zginanie R_g spieków i żeliwa Zl 14.

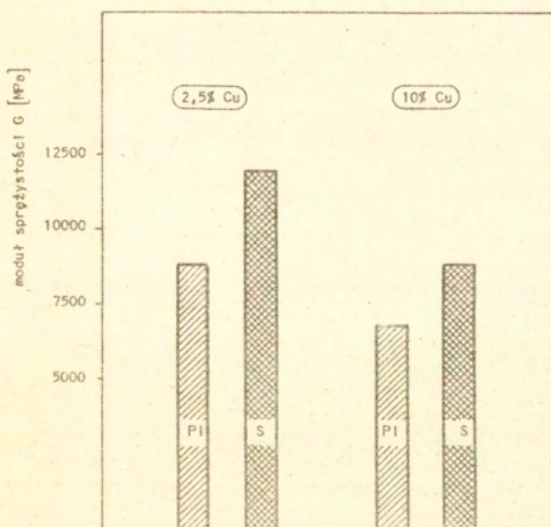
Z porównania wynika, że R_g spieków PL stanowi 76% R_g spieków S przy zawartości 2,5% Cu a 69% przy zawartości 10% Cu. Zwiększenie udziału miedzi w spieku w sposób nieznaczny wpływa na wartość tej wielkości. Ponadto należy podkreślić, że wytrzymałość na zginanie wszystkich rodzajów spieków znacznie przewyższa wytrzymałość na zginanie żeliwa Zl 14.



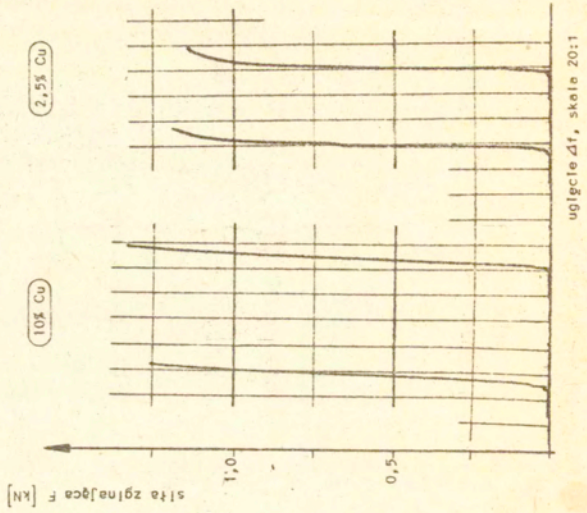
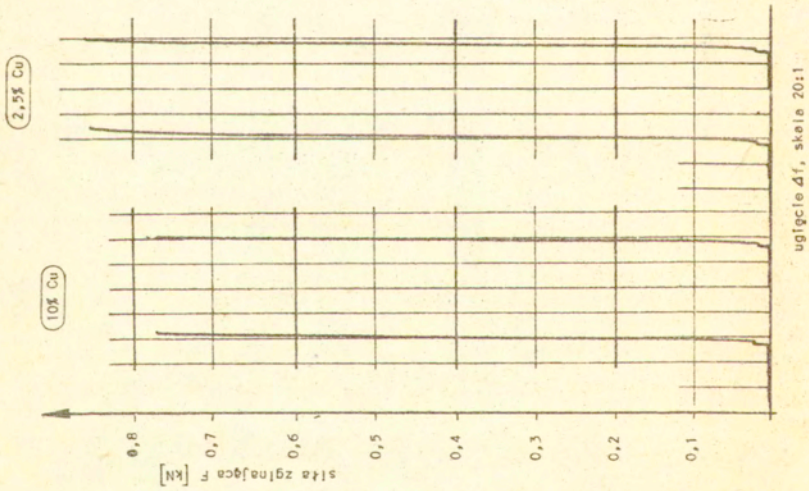
Rys. 6.14. Krzywe skręcania.



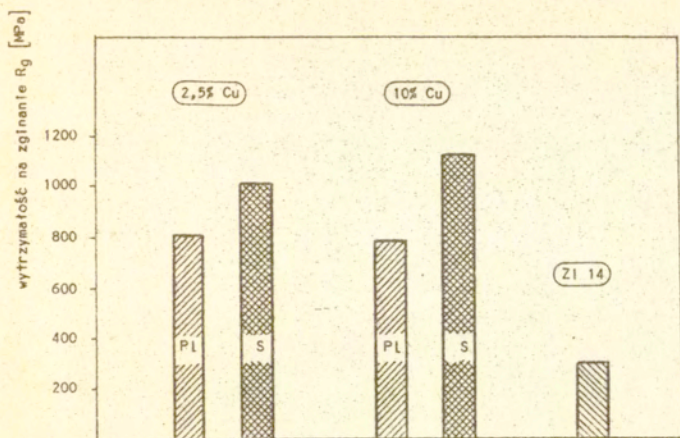
Rys.6.15. Porównanie wytrzymałości na ścinanie R_t .



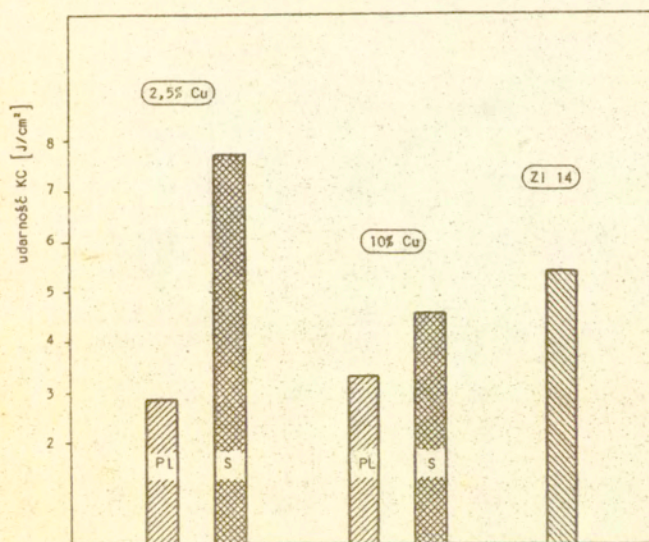
Rys.6.16. Porównanie modułów odkształceń postaciowych G .



Rys. 6.17. Przykładowe wykresy meszynowe przebiegu zginienia.



Rys.6.18. Porównanie wytrzymałości na zginanie R_g .



Rys.6.19. Porównanie udarności.

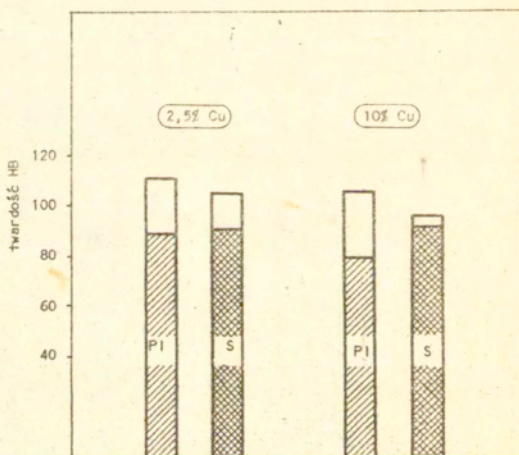
● Próba udarowego zginania.

Średnie wartości udarności KC dla poszczególnych rodzajów spieków oraz udarność żeliwa Zl 14 przedstawiono na rys. 6.19.

Udarność spieków P1 stanowi 37% udarności spieków S przy zawartości 2,5% Cu a 73% przy zawartości 10% Cu. Jest ona jednocześnie istotnie niższa od udarności żeliwa Zl 14. Stwierdzona kruchość spieków tłumaczy charakter przebiegu krzywych rozciągania, zginania i skręcania.

● Pomierzy twardości.

Na rysunku 6.20 zestawiono wartości twardości HB badanych próbek, zaznaczając przedziały ich zmienności.



Rys.6.20. Porównanie twardości spieków.

6.5. Uwagi o badaniu własności plastycznych.

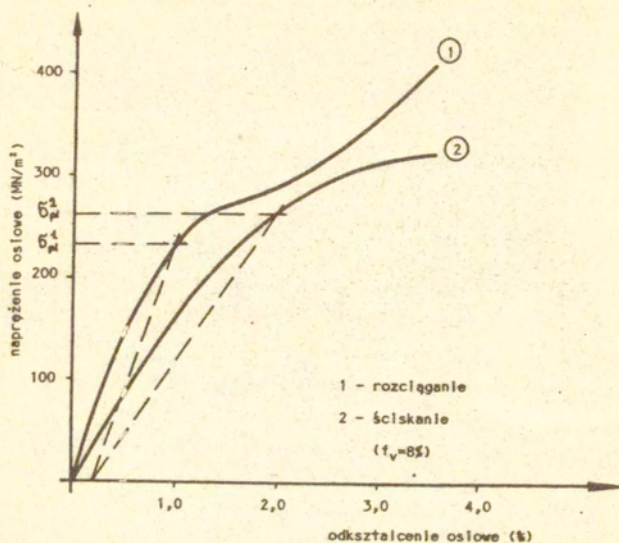
Wspomniano już wcześniej, że niektóre spieki metali wykazują dość dobre, szczególnie przy ścisaniu, własności plastyczne. Istnieje zatem możliwość ich dalszej obróbki plastycznej celem uzyskania wyższych parametrów wytrzymałościowych lub celem nadania odpowiednich kształtów i wymiarów końcowych.

Ażeby w sposób zamierzony i optymalny móc kształtować elementy spiekane, a więc również określać na drodze teoretycznej panujące w nich stany naprężeń i odkształceń, konieczne jest sformułowanie związków konstytutywnych dla ciągliwych ośrodków porowatych. W tym celu niezbędne jest nagromadzenie odpowiedniego materiału doświadczalnego, którego w literaturze jest jeszcze niewiele.

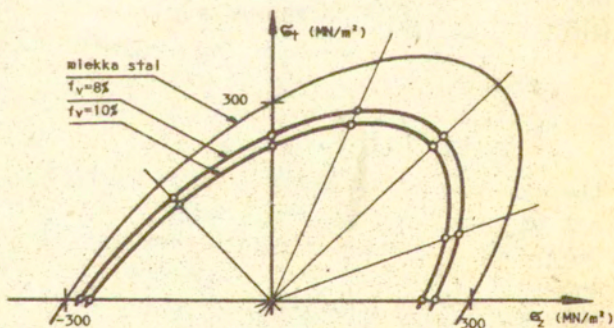
Przeprowadzone w ramach problemu badawczego Pracowni badania doświadczalne pozwoliły lepiej poznać własności mechaniczne ciągliwych spieków metali oraz ich mikrobudowę ([1], [2] [3]). Ważnym efektem tych badań było uzyskanie szeregu informacji niezbędnych do formułowania równań fizycznych takich ośrodków ([4], [5]). W oparciu o wyniki doświadczeń możliwe jest również wyznaczenie niektórych stałych materiałowych występujących w formułowanej teorii [6].

Zakres badań wytrzymałościowych oraz przygotowanie próbek opisano w punktach 6.1 i 6.2. Doświadczenia zmierzały do wyznaczenia zależności między naprężeniami i odkształceniami a z nich granic plastyczności, do wyznaczenia początkowej powierzchni plastyczności i wreszcie do określenia kierunków przyrostów odkształceń plastycznych.

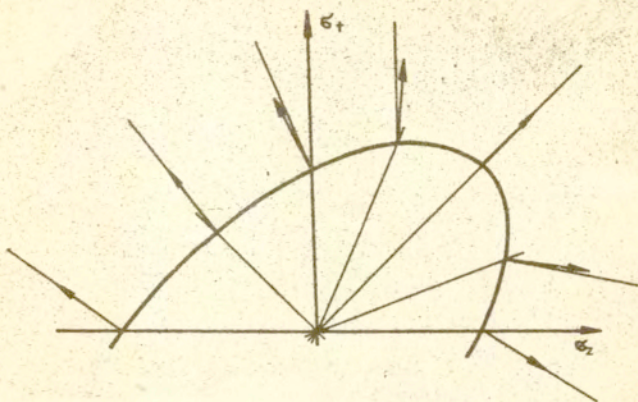
Najistotniejszy wniosek wypływa z porównania wykresów wykonanych dla rozciągania i ścisania spieków metali. W odróżnieniu od metali pełnych granice plastyczności przy ścisaniu jest tutaj wyższa (co do wartości bezwzględnej) od granicy przy rozciąganiu (rys. 6.21). Ponadto nachylenie krzywej ścisania w zakresie plastycznym jest mniej strome niż krzywej rozciągania. Świadczy to o większej ciągliwości spieków przy obciążeniach ścisających.



Rys.6.21. Porównanie krzywych umocnienia dla osiowego rozciągania i ściskania.



Rys.6.22. Doświadczalne krzywe uplastycznienia spieków żelaza.



Rys.6.23. Kierunki przyrostu odkształceń plastycznych.

Z badań w płaskim stanie naprężenia wynika, że powierzchnie plastyczności dla spieków żelaza zawarte są w powierzchni plastyczności pełnego metalu (miękkiej stali konstrukcyjnej). Świadczy to o niższych granicach plastyczności spieków. Na rys. 6.22 widać ponadto, że powierzchnia uplastycznienia spieku jest przesunięta w kierunku ściskania. Jest to wynikiem istnienia różnych granic plastyczności przy ściskaniu i rozciąganiu.

Istotny dla formułowania prawa plastycznego płynięcia spieków może okazać się wniosek wynikający z analizy rys.6.23. Otóż, dla małych porowatości początkowych spieków ($< 10\%$) wektory przyrostów odkształcenia plastycznego są na ogół normalne do krzywej początkowego uplastycznienia. Zatem przyjęcie również dla spieków metali, podobnie jak dla metali pełnych, stowarzyszonego prawa płynięcia może być wystarczająco dokładne do opisu ich mechanicznego zachowania się, przynajmniej w pierwszej fazie uplastycznienia.

6.6. Wnioski.

Przeprowadzono badania próbek spieków z proszków żelaza produkcji krajowej (P1) i importowanych (S) o dwóch różnych zawartościach miedzi: 2,5% i 10%. Próbkę te wykonane były w warunkach technologicznych dla jednej, ustalonej grupy parametrów:

- ciśnienie prasowania,
- temperatura spiekania,
- czas spiekania.

Analiza porównawcza wyników tych badań prowadzi do następujących wniosków:

- 1^o Wytrzymałość na rozciąganie R_m spieków P1 o zawartości 2,5 i 10% Cu wynosi odpowiednio ok. 134 i 150 MPa, co stanowi ok. 75% wytrzymałości spieków S i jest porównywalna z wytrzymałością na rozciąganie żeliwa Zl 14. W tym zakresie w pełni spełnione są wymagania normy BN-76/0886-25, która dla spieków żelaza o rozważanych gęstościach przewiduje minimalną wytrzymałość R_m - 118 MPa;
- 2^o Przy ścisaniu badane próbki spieków P1 i S zachowują się podobnie, wykazując dobre własności plastyczne. Nawet przy dużych odkształceniach (rzędu 25%) nie zaobserwowano spękań powierzchni bocznych próbek;
- 3^o Wytrzymałość na ścinanie spieków P1 jest ok. 20% niższa od wytrzymałości odpowiednich spieków S;
- 4^o Wytrzymałość na zginanie spieków P1 jest o około 25% niższa od wytrzymałości odpowiednich spieków S i jednocześnie znacznie przewyższa wytrzymałość na zginanie żeliwa Zl 14;
- 5^o Udarność spieków P1 jest istotnie niższa zarówno od udarności spieków S jak i żeliwa Zl 14, co podobnie jak przebiegi krzywych rozciągania, skręcania i zginania świadczy o dużej kruchości tych spieków;
- 6^o Zwiększenie od 2,5% do 10% udziału dodatku proszku Cu w spiekach żelaza nie wpływa istotnie na zmianę ich własności mechanicznych.

Literatura do rozdziału 6.

- [1] J.MIELNICZUK, Plasticity of porous metals, Int.Conf.CNRS, Villard de Lans, 1983,
- [2] J.MIELNICZUK, Doświadczalne badanie plastyczności porowatych spieków metali, Prace IPPT, 29, 1985,
- [3] J.MIELNICZUK, O.BRUHNS, Plasticity of porous metal sinters - experimental study, ZAMM, w druku ,
- [4] J.KUBIK, J.MIELNICZUK, Plasticity theory for anisotropic porous metals, Engng. Fracture Mech., 4, 1985,
- [5] J.MIELNICZUK, J.KUBIK, Anizotropowa plastyczność porowatych metali, Rozpr.Inż., 4, 1985,
- [6] J.KUBIK, J.MIELNICZUK, Yield condition of oriented porous solid, Ing.Arch., 53, 1983.