

- 5.51 — doświadczalne metody badania
materiałów i konstrukcji
tensometria, elastooptyka.
Pomiary odkształceń.
- 5.52 — Fizyczne i mechaniczne
własności metali

Janusz Michalczyk

**DOSWIADCZALNE
BADANIE PLASTYCZNOŚCI
POROWATYCH SPIEKÓW METALI**

29/1985

P.269



WARSZAWA 1985

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 1 kwietnia 1985 r.



56920



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 140 egz. Ark.wyd. 1,17 Ark.druk.1,75

Oddano do drukarni w sierpniu 1985 r.

Nr zamówienia 498/85

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Janusz Mielniczuk
Pracownia Mechaniki Ośrodków Porowatych
Zakład Aeroakustyki IPPT PAN

DOSWIADCZALNE BADANIE PLASTYCZNOŚCI POROWATYCH SPIEKÓW METALI

1. Wstęp

Porowate spieki metali znajdują coraz szersze zastosowanie w technice. Spowodowane jest to głównie łatwością otrzymania drogą metalurgii proszków nawet skomplikowanych, gotowych części maszyn a także dużą oszczędnością materiałową takiego procesu wytwarzania. Stosując jako materiały wyjściowe proszki i włókna metali (również niemetalu) można wytwarzać gotowe wyroby omijając kosztowną obróbkę skrawaniem, przeróbkę plastyczną czy odlewanie. Przez odpowiedni dobór parametrów technologicznych procesu wytwarzania można nadawać spiekom żądane i regulowane w wyjątkowo dużym zakresie własności fizyczne i chemiczne.

Główną cechą spieków proszków metali jest ich porowatość, różna w zależności od zastosowania wyrobu. W zasadzie dąży się do uzyskania jak największej gęstości spieku (tzw. porowatości resztkowej), co zapewnia ich największą wytrzymałość. Niektóre jednak wyroby muszą być projektowane i wykonane w taki sposób, żeby porowatość ta była w gotowym wyrobie możliwie duża. Jest to warunkiem ich użyteczności, na przykład jako łożysk porowatych, filtrów, elektrod itp. Pory występujące wewnątrz materiału są przeważnie połączone ze sobą, tworząc skomplikowany labirynt drobnych, kapilarnych kanalików i stanowią mogą od kilku do 50% (niekiedy nawet więcej) całkowitej objętości wyrobu. Porowatość, rozłożenie porów w materiale oraz ich wielkość zależą

od wielu czynników, zarówno materiałowych jak i technologicznych, między innymi takich jak skład i jakość proszku, kształt i wielkość ziaren, ciśnienie prasowania proszku, temperatura i czas spiekania. Bardzo istotny może być również wpływ odkształceń (głównie trwałych) spieku na jego porowatość i własności mechaniczne.

Drugą istotną cechą spieków metali, odróżniającą je zasadniczo od porowatych ośrodków sypkich czy granulowanych, jest ich ciągliwość. Jest ona niekiedy nawet równa ciągliwości pełnych metali. Zapewnia to dobrą kowalność wyrobów spiekanych, na przykład podczas ich wykańczającej obróbki plastycznej.

Ażeby w sposób zamierzony i optymalny móc kształtować plastycznie elementy spiekane, a więc również określać drogą teoretyczną 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 spotyka się jeszcze bardzo mało. Znane są między innymi badania Kuhna i Downeya [1], zmierzające do określenia zmiany współczynnika Poissona spieku żelaza w trakcie osiowego ściskania. Otrzymane wyniki posłużyły do sformułowania warunku plastyczności. Nieco szerszy program badań realizowali Shima i Oyane [2] na spiekach miedzi. Celem ich było określenie niektórych stałych materiałowych, występujących w podanej wcześniej teorii.

Badania plastyczności spieków metali w złożonym stanie naprężenia oraz obserwacje i pomiary ich struktury i jej zmiany, co przedstawiono w niniejszej pracy, nie były dotąd prowadzone w kraju.

2. Cel i program badań

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły lepiej poznać własności wytrzymałościowe ciągliwych spieków żelaza oraz ich mikrobudowę (strukturę). Głównym celem badań było uzyskanie szeregu informacji niezbędnych do sformułowania równań konstytutywnych plastyczności takich ośrodków. W oparciu o wyniki do-

świadczeń możliwe jest również wyznaczenie niektórych stałych materiałowych występujących w formułowanej teorii.

Badania objęte poniższym programem można ogólnie scharakteryzować jako badania wytrzymałościowe oraz badania mikroskopowe struktury.

Badania wytrzymałościowe prowadzono dla różnych początkowych porowatości spieków (>10%) i przy różnych stanach obciążenia, to jest dla osiowego rozciągania i ściskania oraz dla płaskiego stanu naprężenia. Doświadczenia te 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.

Badania metalograficzne (mikroskopowe) pozwoliły określić strukturę i porowatość spieku oraz ich zmiany w trakcie deformacji plastycznej. Obserwacje przełomów próbek, dokonane elektronicznym mikroskopem skaningowym, dostarczyły informacji na temat mikrobudowy spieków żelaza i żelaza z miedzią.

3. Próby osiowego rozciągania i ściskania

Podstawowymi próbami mierzącymi do zbadania mechanicznych własności ośrodków ciągliwych są próby jednoosiowego rozciągania i ściskania. Badania wytrzymałościowe spieków metali były klasycznymi próbami wytrzymałościowymi i przeprowadzono je na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej.

3.1. Próbki i metodyka badań

Próbki do badań na osiowe rozciąganie wykonane zostały z proszku żelaza (SC10026) o różnej zawartości miedzi (0%, ok.1% i ok.10%). Wyselekcjonowano dwie grupy próbek o początkowej porowatości objętościowej 8% i 10%, przy czym pomiaru takiej porowatości dokonano metodą wagową wg. PN. Przeprowadzone wstępne badania mikroskopowe struktury próbek w stanie nieodkształconym wskazywały na ich początkową izotropię i jednorodność.

Kształt i wymiary próbek do rozciągania (czterokrotnych) przedstawiono na Rys.3.1. Ze względu na niewielkie rozmiary próbek oraz możliwości mocujące maszyny wytrzymałościowej zaprojektowano i wykonano specjalne uchwyty (Rys.3.2). Pomiaru odkształceń wzdłużnych przy rozciąganiu dokonywano z dokładnością do 5×10^{-5} przy pomocy pary tensometrów elektrooporowych o bazie pomiarowej 10mm oraz mostka tensometrycznego.

Próbki do badań przy osiowym ściskaniu wykonano również ze spieku żelaza o dwóch różnych porowatościach objętościowych 8% i 10%, mierzonych tą samą metodą. Wymiary takiej próbki pokazano na Rys.3.3. Dla zmniejszenia tarcia na powierzchniach czołowych i dla zachowania jednorodnej deformacji przy ściskaniu zastosowano specjalny kształt próbek z warstwą parafiny. Pomiaru odkształceń wzdłużnych i obwodowych dokonywano przy pomocy dwóch par tensometrów elektrooporowych o bazie 5mm, naklejanych na przeciwległych ściankach próbki. Pozwoliło to wyeliminować ewentualne mimośrodowości obciążania.

Obciążenia osiowego dokonywano drogą stopniowego (skokowego) zwiększania siły rozciągającej lub ściskającej. Po każdym przyroście obciążenia następował okres wyczekiwania (stabilizowania), po którym dokonywano odczytu odkształceń. Część próbek poddano również próbom cyklicznego obciążania i odciążania.

3.2. Krzywe rozciągania i ściskania

Wykresy rozciągania wykonano dla trzech różnych spieków, o różnej zawartości miedzi. Dla próbek żelaznych badania prowadzono przy dwóch różnych porowatościach początkowych. Na Rys. 3.4 przedstawiono krzywe rozciągania. Posłużyły one do wyznaczenia granicy plastyczności porowatego spieku. W przypadkach, gdy brak było wyraźnej granicy wyznaczano ją umownie jako naprężenie wywołujące odkształcenie plastyczne 0,2%, która ta wartość odkształceń jest najczęściej przyjmowana dla spieków jako wartość graniczna [3].

Dla spieków żelaza wykonano również próby osiowego obciążania (rozciągania) i odciążania. Wyniki tych prób przedstawiono na Rys.3.5. Pozwoliły one między innymi określić zmianę mo-

dużą sprężystości podłużnej porowatego spieku.

Próby osiowego ściskania przeprowadzono tylko na spiekach żelaza. Krzywe ściskania przedstawiono na Rys.3.6. Na podstawie zamieszczonych wykresów można również śledzić zmianę odkształceń obwodowych przy ściskaniu.

Dla łatwiejszego porównania krzywych umocnienia przy osiowym rozciąganiu i ściskaniu przedstawiono je na jednym Rys.3.7.

4. Obserwacje i pomiary mikroskopowe struktury

W trakcie wykonywania osiowych prób wytrzymałościowych dokonywano jednocześnie obserwacji struktury spieków metalowych. Przeprowadzono je wykorzystując mikroskop metalograficzny (powiększenie 200x) oraz sprzężone z nim elektroniczne urządzenie zliczające, pozwalające określić wielkość porów, ich ilość oraz porowatość powierzchniową. Po zniszczeniu próbek (rozerwaniu) przeprowadzono obserwacje ich przełomów przy pomocy mikroskopu skaningowego o powiększeniu 800x, dokonując również zdjęć struktury typowych obszarów.

4.1. Porównanie porowatości powierzchniowej i objętościowej

Dla trzech rodzajów spieków (żelaznych oraz z domieszkami miedzi) dokonano porównania wartości porowatości powierzchniowej i objętościowej. Dla szeregu poziomów odkształceń plastycznych (przy rozciąganiu) określano odpowiadające im lokalnie wartości porowatości spieku. Porowatość objętościową określano metodą wagową natomiast porowatość powierzchniową przy pomocy mikroskopu. Uzyskano w wyniku zależności $f_v - f_s$ (Rys.4.1). Porowatość powierzchniowa jest z eksperymentalnego punktu widzenia wielkością łatwiejszą do wyznaczenia, szczególnie w skomplikowanych konstrukcyjnie częściach. Można ją określać lokalnie, co w przypadku porowatości objętościowej (metodą wagową) jest niemożliwe do zrobienia bez uprzedniego zniszczenia próbki drogą wycięcia elementu o określonych odkształceniach trwałych. Wykorzystując otrzymane zależności można wyrazić używaną w rów-

naniach konstytutywnych porowatość objętościowa (lub gęstość względną) poprzez porowatość powierzchniową.

4.2. Zmiana porowatości

Jak już wyżej wspomniano, próby osiowego rozciągania i ściskania zatrzymywano na różnych poziomach odkształceń plastycznych, ażeby zmierzyć aktualną porowatość ośrodka w miejscu występowania tych odkształceń. Następnie przy pomocy mikroskopu dokonywano pomiarów porowatości powierzchniowej spieku. Pozwoliło to w efekcie skonstruować krzywe zmiany porowatości powierzchniowej w funkcji odkształceń plastycznych (Rys.4.2 i Rys.4.3).

4.3. Struktura spieku i jej zmiana

Wykresy przedstawione na Rys.4.4 sporządzono na podstawie wyników uzyskanych z mikroskopowego urządzenia zliczającego. Pozwalają one określić rozkłady wielkości porów dla różnych odkształceń plastycznych powstałych przy osiowym rozciąganiu spieku. Można zauważyć wyraźne przesuwanie się krzywych w prawo (ze wzrostem odkształceń), w kierunku większych wymiarów cięciw. Wskazuje to na rozrost porów w wyniku rozciągania. Przykładowo załączone zdjęcia (Fot.1 i Fot.2) ilustrują opisane wyżej zjawisko. Zdjęcia te zostały wykonane przy powiększeniu 200x dla tego samego miejsca próbki przy różnych jej odkształceniach plastycznych.

Możliwość wyznaczenia przy pomocy urządzenia zliczającego aktualnej średniej cięciwy porów w dwóch prostopadłych kierunkach pozwoliła w w efekcie obserwować również zmianę ukierunkowania struktury spieku w trakcie deformacji. Przedstawiona na Rys.4.5 krzywa $\phi^*/\phi^*(\epsilon)$ wykonana została dla osiowego rozciągania spieku żelaznego. Średnie wymiary cięciwy były mierzone dla kierunku rozciągania, ϕ^* , oraz dla kierunku prostopadłego, ϕ'' . Można zauważyć, że spiek początkowo izotropowy ($\phi^*/\phi''=1$) zmienia swoją strukturę na ukierunkowaną ($\phi^*/\phi''>1$).

Obserwacji struktury spieków dokonywano również przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego. Obserwowane były prze-

łomy spieku żelaznego, również z domieszką miedzi, otrzymane w wyniku zerwania próbek podczas osiowego rozciągania. Fot.3 i F.4, wykonane przy powiększeniu 800x, ukazują rodzaj zniszczenia oraz mikrobudowę spieku. W przełomie każdej z próbek stwierdzono obecność fragmentów zniszczenia łupliwego (kruche) oraz plastycznego. Udział fragmentów zniszczenia ciągliwego jest większy w przypadku spieków zawierających domieszkę miedzi (Fot.4). Charakterystyczne dla tego rodzaju zniszczenia są liczne pęknięcia przebiegające po granicach ziaren.

Wnikając w mikrobudowę spieku można zauważyć dwa rodzaje porów w ośrodku. Są to pory zamknięte, o niewielkim udziale procentowym, oraz otwarte, przepuszczalne o strukturze kanalikowej.

5. Początkowa powierzchnia plastyczności porowatych spieków żelaza

Znajomość własności materiału, określonych w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia, jest często niewystarczająca dla sformułowania teorii czy też przeprowadzenia obliczeń wytrzymałościowych. Istotne są badania własności w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, złożonych. Doświadczalne badania powierzchni plastyczności spieków dokonano dla płaskiego stanu naprężenia na próbkach rurkowych.

5.1. Próbki i aparatura

Próbki rurkowe wykonane zostały ze spieków żelaza. Temperatura spiekania wynosiła 1100 - 1200°C, zaś granulacja proszku nie przekraczała 150µm. Wyselekcjonowano, podobnie jak dla badań osiowych, dwie grupy próbek o początkowych porowatościach objętościowych 8% i 10%. Kształt i wymiary próbki oraz specjalnie zaprojektowanego uchwytu przedstawiają Rys.5.1 i Rys.5.2.

Stanowisko badawcze wyposażono w dwa niezależne hydrauliczne układy obciążające. Jeden z nich wywoływał w próbce osiowe naprężenia rozciągające lub ściskające. Przeguby kuliste za-

pobiegały powstawaniu momentu zginającego. Drugi układ obciążający doprowadzał olej pod ciśnieniem do wnętrza próbki wywołując w niej dodatkowo naprężenia obwodowe. Z uwagi na przepuszczalność spieku zastosowano uszczelnienie w postaci gumowej rurki, zaciskanej na końcach stożkowymi dociskami (patrz Rys.5.2). Obecność tej rurki nie zakłócała w sposób istotny stanu naprężenia w próbce.

Niezależność obydwu układów obciążających pozwala realizować dowolną drogę obciążania na płaszczyźnie σ_z (naprężenia osiowe) i σ_r (naprężenia obwodowe) w jej pierwszej i drugiej ćwiartce. Należy podkreślić, że w próbce rurkowej wystąpi przybliżony płaski stan naprężenia, gdy zachowana zostanie nierówność $r/t > 20$, gdzie r jest promieniem wewnętrznym rurki a t grubością jej ścianki. W naszym przypadku warunek ten był zachowany, gdyż $r/t \approx 23 > 20$.

Odształcenia mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych o długości pomiarowej 5mm, naklejanych na zewnętrznej powierzchni próbki w środku jej długości. Dla wyeliminowania wpływu ewentualnej małej mimośrodowości obciążania tensometry naklejano po dwa symetrycznie po przeciwnych stronach próbki w obu głównych kierunkach odształceń. Wielkość odształceń wyznaczano jako wartość średnią ze wskazań obu tensometrów jednokowo skierowanych. Odczytów dokonywano na mostku tensometrycznym. dokładności do 5×10^{-6} .

5.2. Sposób obciążania i metoda opracowania wyników

Ogółem poddano badaniom 28 próbek ze spieku żelaza. Obciążania dokonywano według z góry ustalonych siedmiu różnych dróg, co ilustruje Rys.5.3. Poniższa tabela podaje zestawienie sposobów obciążania próbek rurkowych.

nr	σ_r/σ_z	siła osiowa P	ciśnienie p	P/p
1	∞	rozciąganie	0	∞
2	2	rozciąganie	wewnętrzne	4,62
3	1	rozciąganie	wewnętrzne	1,54
4	0,5	rozciąganie	wewnętrzne	-0,22

5	0	ściskanie	wewnętrzne	-1,54
6	-1	ściskanie	wewnętrzne	-4,62
7	$-\infty$	ściskanie	0	$-\infty$

Dla każdej próbki rejestrowano w trakcie jej defamacji wartości odkształceń osiowych i obwodowych, które odpowiadały ustalonym naprężeniom osiowym i obwodowym. Ze względów technicznych rzeczywiste drogi obciążania odbiegały nieco od teoretycznych prostych proporcjonalnego obciążania. Mianowicie, kolejno zwiększano małymi skokami wielkość siły osiowej a następnie ciśnienia wewnętrznego aż do uzyskania żądanej proporcji. Z otrzymanych wartości przyrostów odkształceń $\Delta \varepsilon_x$ i $\Delta \varepsilon_y$, odpowiadających kolejno przebytych odcinkom, które były określone przyrostami naprężeń $\Delta \sigma_x$ i $\Delta \sigma_y$, obliczano następnie przyrost intensywności odkształceń

$$\Delta \varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{3} [(\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_y)^2 + (\Delta \varepsilon_x - \Delta \varepsilon_z)^2 + (\Delta \varepsilon_y - \Delta \varepsilon_z)^2]},$$

przyjmując uproszczenie, że $\Delta \varepsilon_z = 0$, to znaczy, że w czasie procesu obciążania nie ma zmiany grubości ścianki. Następnie obliczano intensywność odkształceń ε_i w poszczególnych momentach procesu obciążania, sumując od początku przyrosty $\Delta \varepsilon_i$.

Podobnie obliczano intensywność naprężeń, tzn.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{3} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2]},$$

przy czym w obliczeniach przyjęto średnią wartość $\sigma_z = -p/2$. Przykładowo dla drogi obciążania oznaczonej numerem 6, tzn. dla $\sigma_x/\sigma_y = -1$, czyli $P/p = -4,62$, otrzymano

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{3} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y)}, \quad \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \frac{p^2}{4}}$$

Po obliczeniu ε_i i σ_i sporządzono dla każdej próbki i dla każdej drogi obciążania wykresy $\sigma_i - \varepsilon_i$. Na Rys.5.4 i Rys.5.5 pokazano przykładowo krzywe dla punktów 1 i 2 obciążania. Na tych samych rysunkach naniesiono również krzywe $\sigma_x(\varepsilon_i)$ i $\sigma_y(\varepsilon_i)$. Z punktu na osi ε_i odpowiadającemu umownej granicy plastyczności

spieku ($\varepsilon_z = 0,2\%$) poprowadzono proste równoległe do początkowego prostoliniowego odcinka $\varepsilon_z(\varepsilon_z)$. Punkt przecięcia rzutowano następnie na krzywe $\varepsilon_z(\varepsilon_z)$ i $\varepsilon_z(\varepsilon_z)$, znajdując w ten sposób składowe stanu naprężenia, które wywołały w próbce początek uplastycznienia. Otrzymane w ten sposób wartości naprężeń dla wszystkich dróg odkształceń naniesiono na płaszczyznie $\varepsilon_z, \varepsilon_z$. Przez uzyskane punkty poprowadzono krzywe będące krzywymi uplastycznienia spieków w płaskim stanie naprężenia. Na Rys.5.6 przedstawiono eksperymentalne krzywe plastyczności spieków żelaza wykonane dla różnych początkowych porowatości. Naniesiono również krzywą uplastycznienia dla miękkiej stali, a więc dla ośrodka bez porów o zbliżonych do spieków własnościach.

5.3. Kierunki przyrostów odkształceń plastycznych

Kolejnym krokiem w badaniach było wyznaczenie kierunków przyrostów odkształceń plastycznych dla różnych dróg obciążania spieków żelaza. Wykorzystano tutaj metodę zaproponowaną przez Miastkowskiego i Szczepińskiego [4]. Przyrosty te określano tylko dla spieku żelaza o początkowej porowatości objętościowej 8% i w postaci wektorów pokazano je na Rys.5.7. Sposób wyznaczania przyrostów odkształceń plastycznych przedstawiono na Rys.5.8 na przykładzie pierwszej drogi obciążania. Podstawę do wyznaczenia tych przyrostów stanowią wykresy obydwu odkształceń ε_z i ε_z w funkcji jednego z naprężeń, ε_z lub ε_z . Na wykresach tych w punktach, odpowiadających uplastycznieniu (0,2%) prowadzimy trzy proste, mianowicie jedną w kierunku stycznym do krzywej, drugą równoległą do jej początkowego prostoliniowego odcinka, a trzecią równoległą do osi naprężeń. Przyjmując dowolny przyrost naprężenia $\Delta\varepsilon_z$ (lub $\Delta\varepsilon_z$) znajdujemy w sposób pokazany na rysunku odpowiadające mu składowe przyrostu plastycznej części odkształcenia $\Delta\varepsilon_z^p$ i $\Delta\varepsilon_z^p$. Odkładając te składowe na płaszczyźnie naprężeń odpowiednio w kierunkach osi ε_z i ε_z znajdujemy kierunki przyrostów odkształcenia plastycznego.

W pracy nie określano modułów wektorów przyrostów odkształcenia plastycznego jak również nie wyznaczano kierunków przyrostów sprężystych.

6. Analiza wyników i wnioski

Uzyskane w trakcie badań doświadczalnych wyniki, mimo, że ich ilość jest jeszcze niewystarczająca, mogą już stanowić pewne wytyczne przy formułowaniu teorii plastyczności porowatych, ciągliwych spieków metali. Mogą one również stanowić podstawę do określenia niektórych stałych materiałowych (patrz [5]).

Z wykresów rozciągania i ściskania spieków żelaza, wykonanych dla różnych porowatości początkowych, wynika podstawowy wniosek. Im porowatość spieku jest większa, tym gorsze są jego własności wytrzymałościowe, to znaczy niższe granice sprężystości i plastyczności.

Analizując wykresy rozciągania łatwo zauważyć, że obecność miedzi w spieku, a więc dodatek proszku miedzianego do proszku żelaznego, podwyższa wytrzymałość spieku. Również granica plastyczności ulega podwyższeniu. Jednak nachylenie początkowego prostoliniowego odcinka wykresu jest dla różnych spieków prawie niezmiennie, zatem moduł sprężystości podłużnej E tylko w sposób nieznaczny zależy od dodatku miedzi (do 10%).

Przeprowadzone na spiekach próby cyklicznego obciążania i odciążania wskazują również na niewielkie zmiany modułu Younga. Odróżnia to w sposób zasadniczy spieki metali od ośrodków sypkich, na przykład proszków, z których te spieki wykonano i dla których wyraźnie zauważa się zmianę kąta nachylenia początkowego odcinka krzywej $\sigma - \varepsilon$ w miarę wzrostu odkształceń.

Najistotniejszy wniosek wypływa z porównania wykresów wykonanych dla rozciągania i ściskania spieków żelaza. W odróżnieniu od pełnych metali granica plastyczności przy ściskaniu jest tutaj wyższa (co do wartości bezwzględnej) od granicy przy rozciąganiu. Ponadto nachylenie krzywej ściskania w zakresie plastycznym jest mniej strome niż krzywej rozciągania. Świadczy to o większej ciągliwości spieku przy obciążeniach ściskających.

Może to być uzasadnione specyficznym zachowaniem się spieku na poziomie mikro. W przypadku ściskania zachodzi najpierw dokładniejsze "upakowanie" struktury, bez niszczenia więzów między poszczególnymi ziarnami, podczas gdy przy rozciąganiu może następować zrywanie takich powiązań już od początku stanu

uplastycznienia.

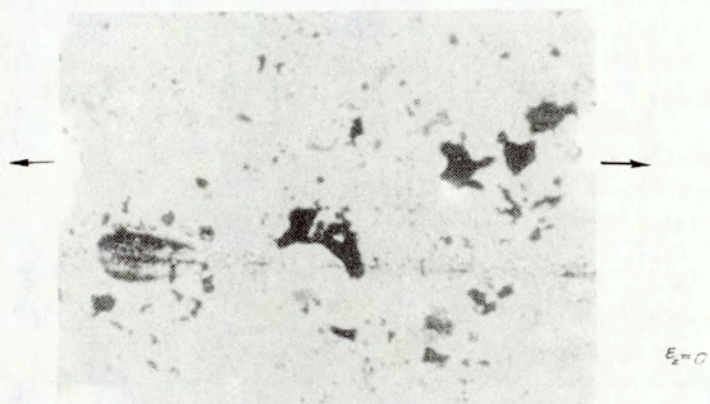
Podobne, jak wyżej opisane, informacje uzyskano z prób wytrzymałościowych spieków w płaskim stanie naprężenia. Powierzchnie plastyczności dla spieków żelaza o początkowych porowatościach 8% i 10% zawarte są w powierzchni plastyczności pełnego metalu (miękkiej stali konstrukcyjnej). Świadczy to o niższych granicach plastyczności spieków. Na Rys. 5.6 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.5.7. 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 opisanie ich mechanicznego zachowania się, przynajmniej w pierwszej fazie uplastycznienia.

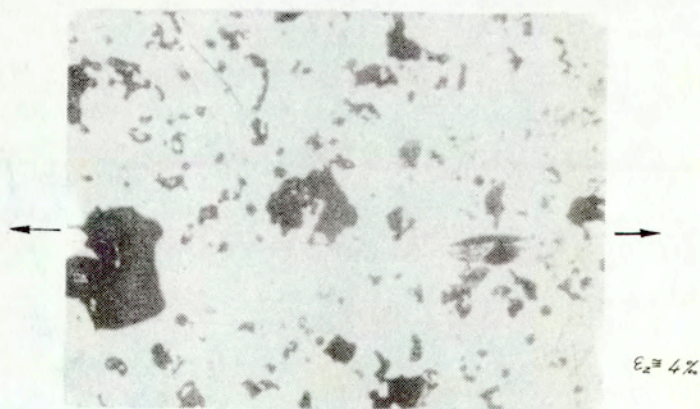
Wyniki pomiarów i obserwacji mikroskopowych struktury spieków prowadzą do następujących wniosków. Porowatość ośrodka (lub jego gęstość) jest dla małych porowatości początkowych praktycznie niezmienna w zakresie niewielkich odkształceń plastycznych. Wniosek ten jest bardzo ważny przy formułowaniu i rozwiązywaniu zagadnień brzegowych (|6|). Prowadzi on mianowicie do znacznego uproszczenia równań plastyczności. Drugi wniosek dotyczy zmiany struktury spieku w trakcie jego odkształcania. Mimo, że porowatość pozostaje praktycznie stała, to zmienia się wielkość porów, ich ilość i ukierunkowanie. Obserwacje przeprowadzone dla rozciągania wskazują na rozrost porów i zmianę ich kształtów. Początkowo izotropowa struktura spieku zmienia się na ukierunkowaną po wystąpieniu odkształceń plastycznych.

Literatura

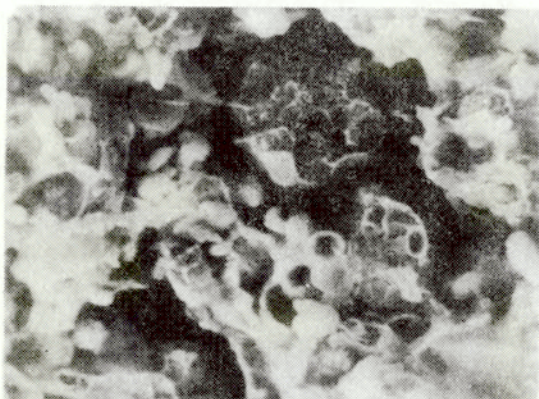
1. Kuhn H.A., Downey C.L., Deformations characteristics and plasticity theory of sintered powder materials, *Int. J. Powder Met.* 7, str. 15-21, 1971
2. Shima S., Oyane M., Plasticity theory for porous metals, *Int. J. Mech. Sci.* 14, str. 215-226, 1972
3. Rutkowski W., Projektowanie wyrobów spiekanych z proszków i włókien, PWN, Warszawa, 1977
4. Miastkowski J., Szczepiński W., Doświadczalne badanie powierzchni plastyczności odkształconego mosiądzu, *Mech Teor. Stos.* 3, str. 55-66, 1965
5. Kubik J., Mielniczuk J., Yield condition of oriented porous solid, *Ingenieur-Archiv*, 53, str. 53-60, 1983
6. Mielniczuk J., Zum ebenen plastischen Fließen der porigen Metalle, *Ingenieur-Archiv*, 52, str. 221-228, 1982



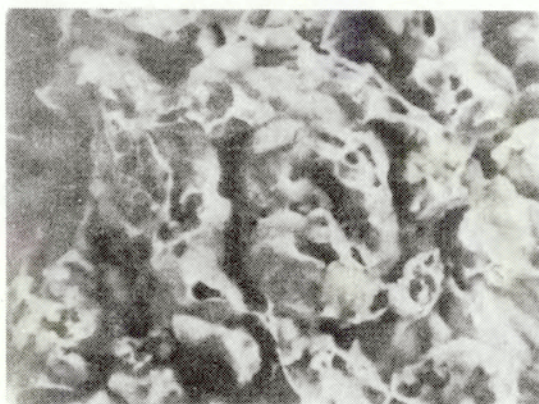
Fot. 1



Fot. 2



Fot. 3



Fot. 4

Tabela 1

$$\sigma_x / \sigma_y = 0,5$$

P	σ_x	σ_y	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_r
2	2,28	4,57	0,01	0,02	2,23	0,01
6	6,58	13,70	0,03	0,08	6,70	0,04
10	11,42	22,84	0,05	0,14	11,73	0,07
20	22,84	45,68	0,12	0,30	22,34	0,15
30	34,26	68,52	0,17	0,45	33,51	0,23
50	57,12	114,19	0,28	0,76	55,86	0,38
65	74,23	148,46	0,35	1,01	72,61	0,51
77	87,93	175,87	0,42	1,20	85,71	0,61
91	103,92	207,84	0,51	1,50	101,65	0,76
100	114,20	228,40	0,60	1,65	111,70	0,84
110	125,62	251,24	0,66	1,90	122,88	0,96
120	137,04	274,08	0,74	2,10	134,05	1,07
130	148,46	296,92	0,84	2,45	145,22	1,25
140	159,80	319,76	0,96	2,80	156,93	1,42

Tabela 2

$$\sigma_x / \sigma_y = -\infty$$

$\sigma_x (-)$	$\epsilon_x (-)$	ϵ_z	σ_z	ϵ_r
22,26	0,23	0,03	12,85	0,14
37,10	0,32	0,07	21,42	0,21
51,94	0,47	0,09	29,99	0,30
66,78	0,62	0,12	38,55	0,49
103,88	1,01	0,17	59,97	0,63
133,56	1,40	0,20	77,11	0,87
163,24	1,60	0,25	94,20	1,00
192,92	2,00	0,29	111,40	1,24
222,59	2,35	0,33	128,50	1,46
237,43	2,50	0,36	137,10	1,56
267,11	3,00	0,42	154,20	1,87
296,79	3,40	0,48	171,36	2,11
326,47	3,90	0,56	188,50	2,43
356,15	4,40	0,66	205,62	2,81
385,83	5,10	0,72	214,20	3,00

Uwaga

naprężenia w MN/m², odkształcenia w %

Tabela 3

$\sigma_z/\epsilon_z = 0$

P	σ_z	ϵ_z	ϵ_t	σ_t	ϵ_t
6	13,70	0,17	0,14	7,82	0,09
10	22,84	0,23	0,21	13,04	0,13
16	36,55	0,29	0,35	20,87	0,19
20	45,69	0,46	0,44	26,08	0,26
28	63,96	0,60	0,60	36,51	0,35
36	82,24	0,70	0,76	46,95	0,42
44	100,51	0,82	0,94	57,38	0,51
54	123,36	0,96	1,20	70,42	0,64
62	141,63	1,10	1,40	80,85	0,74
70	159,90	1,20	1,60	91,28	0,83
78	178,18	1,30	1,85	101,67	0,95
86	196,45	1,35	2,10	112,15	1,06

Tabela 4

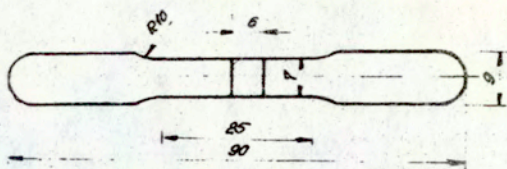
$\sigma_z/\epsilon_z = -1$

P	$\sigma_z (-)$	$\epsilon_z (-)$	ϵ_t	σ_t	ϵ_t
2	4,57	0,15	0,01	4,57	0,09
4	9,14	0,29	0,02	9,14	0,18
6	13,70	0,04	0,04	13,70	0,26
8	18,28	0,50	0,06	18,28	0,30
10	22,84	0,62	0,07	22,86	0,38
12	27,41	0,70	0,09	27,42	0,43
16	36,55	0,96	0,13	36,56	0,59
20	45,60	1,20	0,15	45,64	0,74
24	54,80	1,50	0,18	54,85	0,92
28	63,90	1,80	0,21	63,96	1,10
32	73,10	2,10	0,24	73,17	1,29
36	82,20	2,50	0,27	82,28	1,53
40	91,30	3,00	0,30	91,38	1,82
44	100,50	3,50	0,35	100,60	2,13

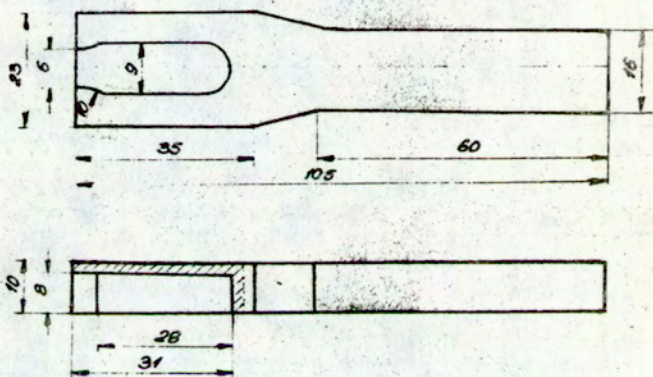
Tabela 5

współrzędne punktów pomiarowych krzywej plastyczności

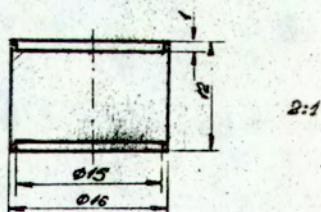
	1	2	3	4	5	6	7
σ_z	230,0	275,0	245,5	135,0	0	-142,0	-277,0
σ_t	0	105,0	245,5	270,0	247,0	142,0	0



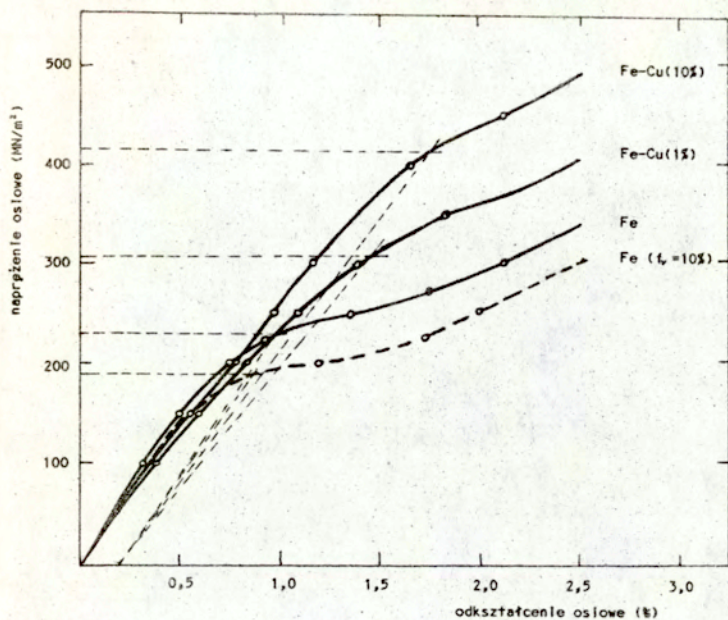
Rys. 3.1



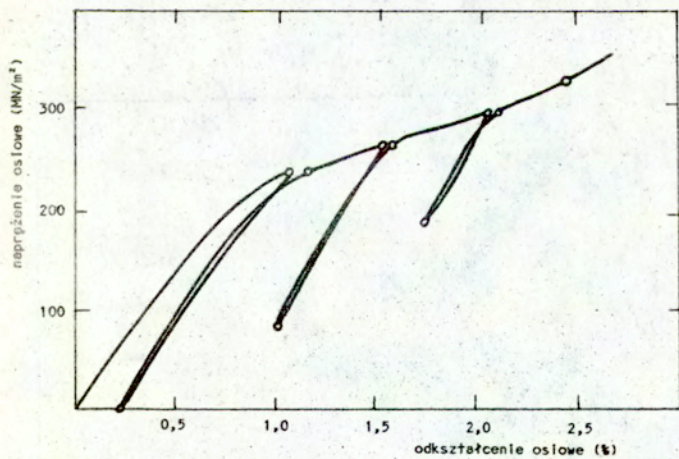
Rys. 3.2



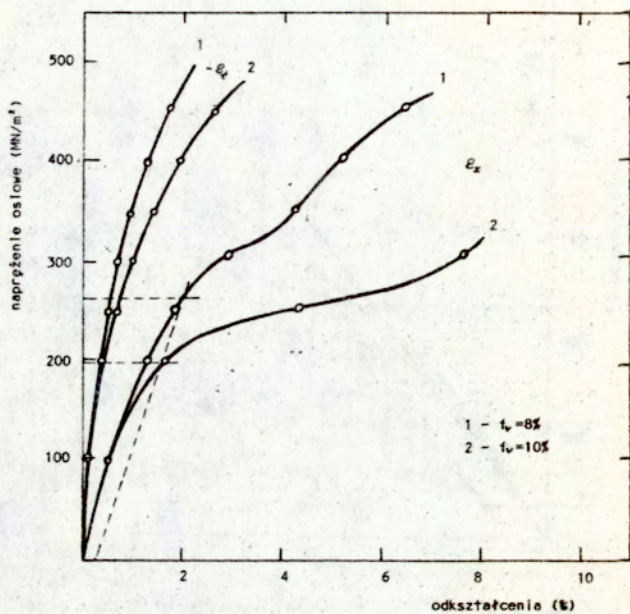
Rys. 3.3



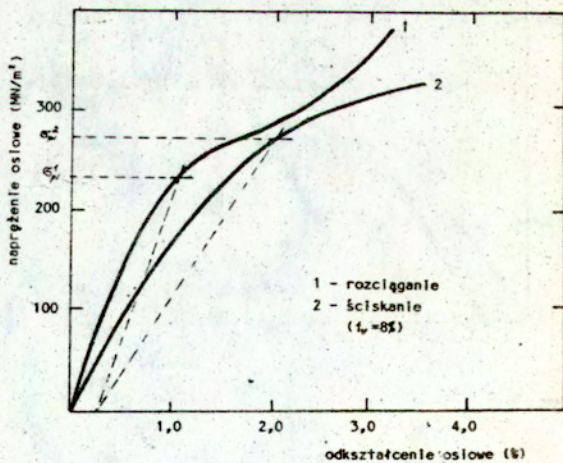
Rys. 3.4



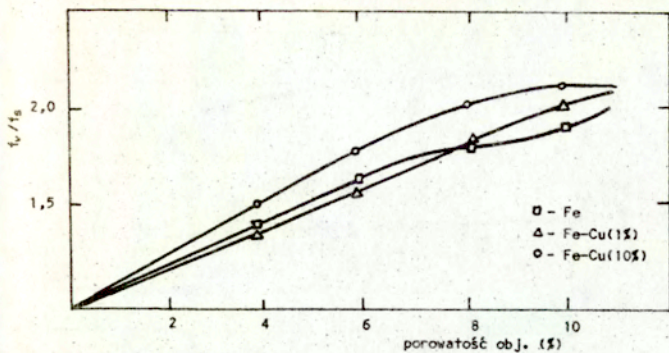
Rys. 3.5



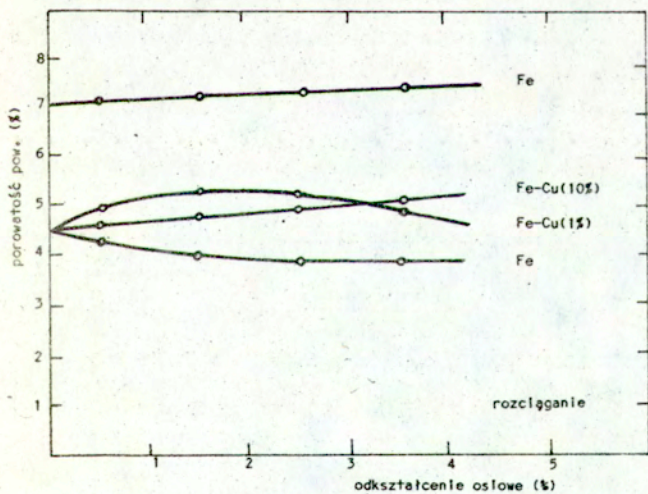
Rys. 3.6



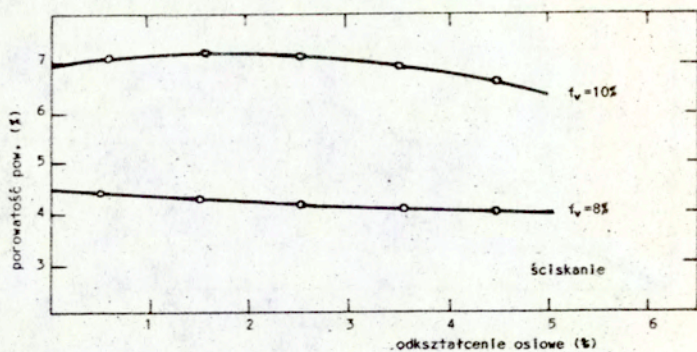
Rys. 3.7



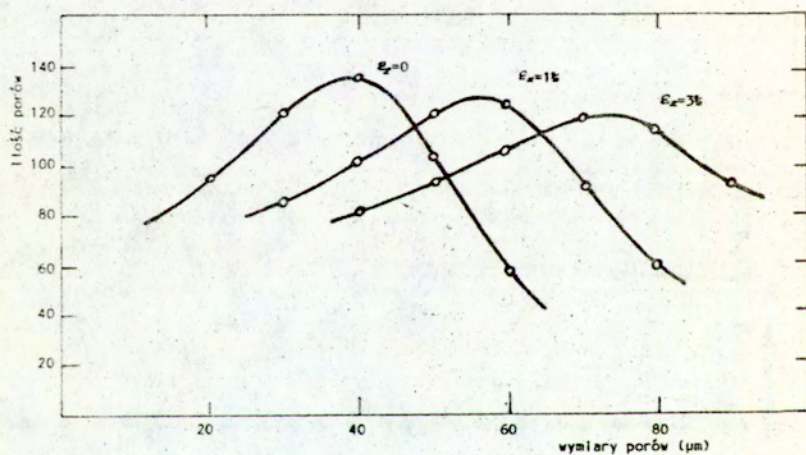
Rys.4.1



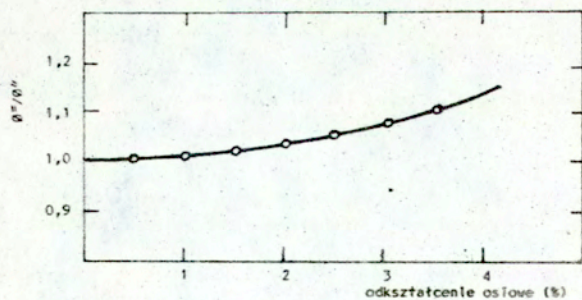
Rys.4.2



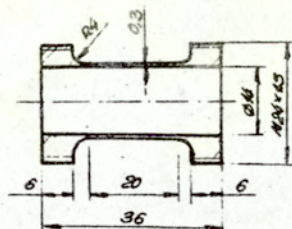
Rys. 4.3



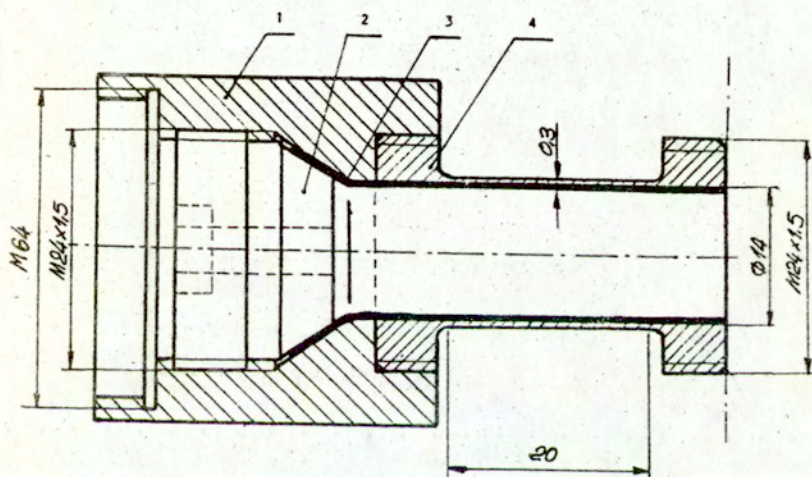
Rys. 4.4



Rys. 4.5

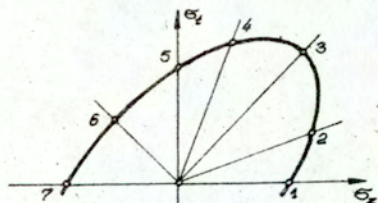


Rys. 5.1

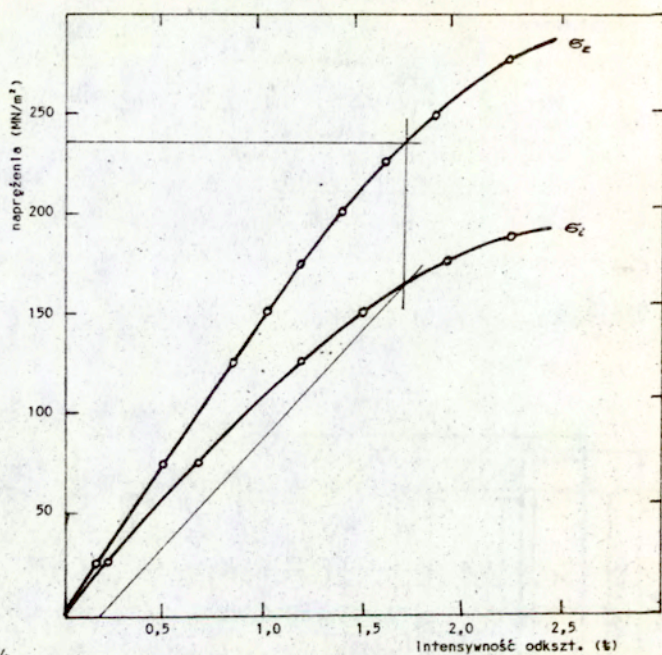


- 1 - uchwyt 3 - wąż gumowy
2 - docisk stożkowy 4 - próbka

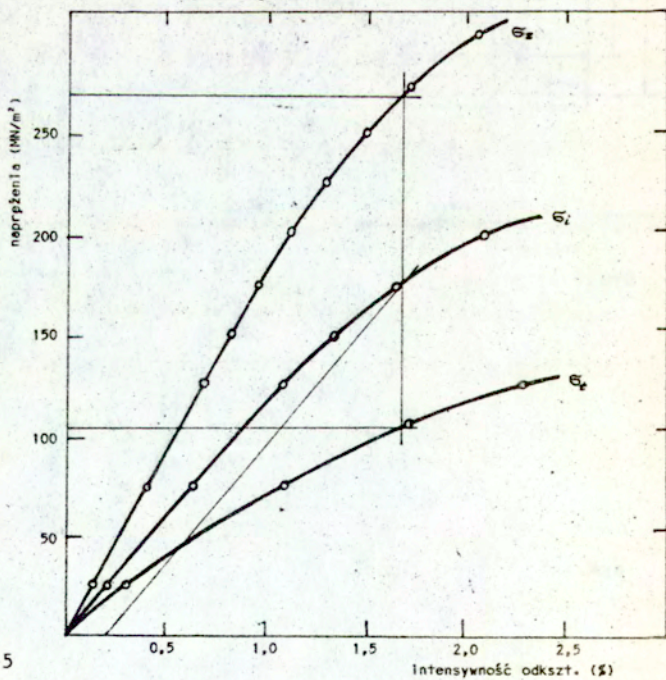
Rys. 5.2



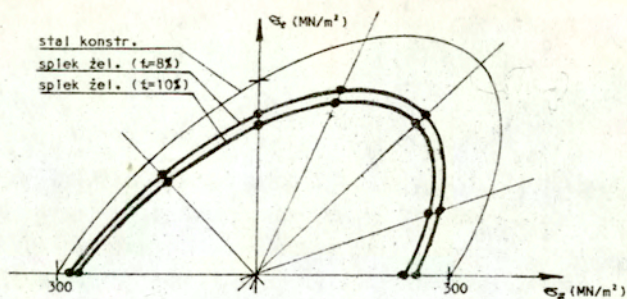
Rys. 5.3



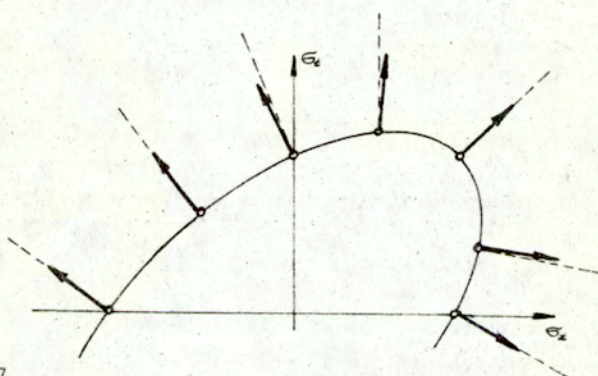
Rys. 5.4



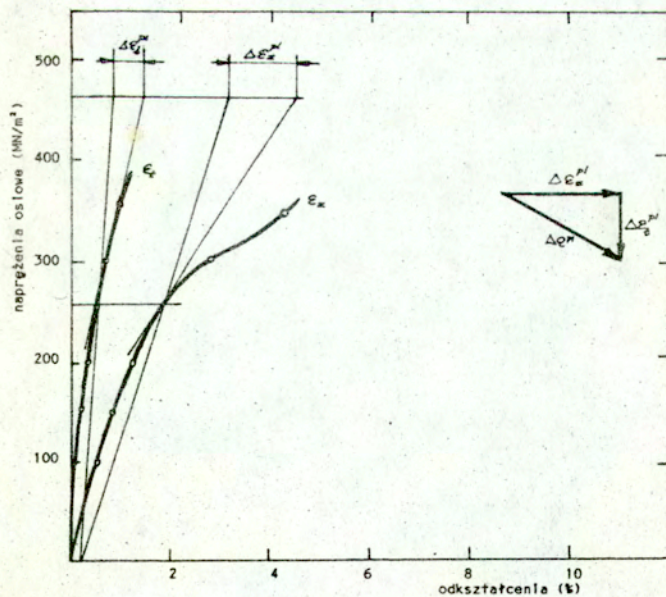
Rys. 5.5



Rys. 5.6



Rys. 5.7



Rys. 5.8

Streszczenie

Niniejsza praca ma charakter eksperymentalny a przeprowadzone w jej ramach badania można ogólnie określić jako badania wytrzymałościowe i mikroskopowe ciągliwych spieków żelaza.

Badania wytrzymałościowe prowadzone były dla różnych początkowych porowatości spieków i przy różnych stanach obciążenia, to jest dla osiowego rozciągania i ściskania oraz dla płaskiego stanu naprężenia. Doświadczenia te zmierzały do wyznaczenia zależności między naprężeniami i odkształceniami, do wyznaczenia początkowej powierzchni plastyczności oraz do określenia kierunków przyrostów odkształceń plastycznych.

Badania metalograficzne (mikroskopowe) pozwoliły określić aktualną strukturę i wartość porowatości spieku oraz ich zmiany w trakcie deformacji plastycznej. Obserwacje przejść próbek, dokonane elektronicznym mikroskopem skaningowym, dostarczyły informacji na temat mikrobudowy spieków żelaza i żelaza z miedzią.

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły w efekcie lepiej poznać własności ciągliwych spieków żelaza oraz dostarczyły danych niezbędnych przy formułowaniu równań konstytutywnych.