

INSTYTUT INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

PRACA DOKTORSKA

Temat pracy:

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE SPIEKÓW METALI PO ODKSZTAŁCENIU PLASTYCZNYM I OBRÓBCE CIEPLNEJ

Opracował: **mgr inż. Krzysztof Zarębski** Promotor: **dr hab. inż. Stanisław Okoński, prof. PK**

KRAKÓW, marzec 2009 r.

Promotorowi pracy Panu dr hab. inż. Stanisławowi Okońskiemu, prof. PK, serdecznie dziękuję za pomoc oraz cenne wskazówki przy realizacji tej pracy.

Szczególnie i wyjątkowo dziękuję moim najbliższym, małżonce Jadzi oraz dzieciom Jurkowi, Kasi, Agnieszce i Grzesiowi. Za cierpliwość. Wam dedykuję tą pracę.

SPIS TREŚCI

WSTĘP
1 ANALIZA ZAGADNIENIA NA PODSTAWIE LITERATURY
1.1 KIERUNKI ROZWOJU TECHNOLOGII SPIEKOWYCH
1.2 OBRÓBKA PLASTYCZNA MATERIAŁÓW ROZDROBNIONYCH I SPIEKANYCH9
1.3 WPŁYW ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO NA ZIMNO NA STRUKTURĘ I WŁAŚCIWOŚCI
MECHANICZNE MATERIAŁÓW SPIEKANYCH11
1.4 OBRÓBKA CIEPLNA I CIEPLNO - CHEMICZNA MATERIAŁÓW SPIEKANYCH
1.5 Podsumowanie i wnioski
2 TEZA PRACY
3 CEL I ZAKRES PRACY
4 BADANIA WŁASNE
4.1 UWAGI OGÓLNE
4.2 Koncepcja i algorytm badań
4.3 Metodyka i technika badań
4.4 Wyniki badań
Wyniki badań właściwości mechanicznych
Badania metalograficzne - analiza mikrostruktury
Badania fraktograficzne
Analiza ilościowa mikrostruktury60
5 ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ
Wpływ odkształcenia plastycznego na zimno na właściwości mechaniczne
Wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne odkształconych spieków68
Funkcje obiektu badań
6 WNIOSKI
DODATEK A75
DODATEK B
LITERATURA
WYKAZ NORM
WYKAZ PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH
SPIS ILUSTRACJI
SPIS TABEL

WSTĘP

Technologia spieków charakteryzująca się wysoką wydajnością oraz oszczędnością materiałów jest rozwojową metodą wytwarzania materiałów konstrukcyjnych i wyrobów użytkowych. Dodatkowo pozwala ona na tworzenie nowych materiałów, których wyprodukowanie tradycyjnymi sposobami hutniczymi nie jest możliwe. Projektowanie właściwości materiałów i wyrobów otrzymywanych w ramach tej technologii bazuje na podstawowym spostrzeżeniu, które można wyrazić jak następuje.

Właściwości spieku o porowatej strukturze są określone poprzez:

- właściwości materiału, z którego zbudowana jest osnowa spieku,
- porowatość i parametry stereologiczne pustek.

Właściwości osnowy są zdeterminowane przez jej skład chemiczny oraz cechy mikrostruktury, takie jak np. skład fazowy, średnia wielkość ziarna i spójność na granicach cząstek proszku. W tabeli 1 zestawiono główne czynniki wpływające na właściwości materiałów i wyrobów spiekanych z proszków metali oraz najważniejsze metody i środki technologiczne stosowane w celu ich otrzymywania.

Wytwarzanie spiekanych części maszyn o wysokich właściwościach wytrzymałościowych wymaga otrzymania gęstości zbliżonej do gęstości litego materiału, czyli możliwie małej porowatości. Stosuje się w tym celu różnorodne technologie przedstawione między innymi w pracach [12, 13, 57, 67, 79, 88, 98]. Wiele z nich wykorzystuje kształtowanie plastyczne jako jeden z etapów na drodze do uzyskiwania odpowiednich właściwości. Są to między innymi technologie, na które składają się następujące po sobie kolejno procesy: formowania proszku, wstępnego spiekania, kształtowania plastycznego na zimno lub gorąco oraz końcowej obróbki cieplnej (ponownego spiekania lub wyżarzania).

Obróbka plastyczna materiałów porowatych jest jedną z głównych metod uzyskiwania wyrobów o określonych właściwościach technologicznych i użytkowych, łącząc w sobie osiąganie żądanej dokładności wymiarowo-kształtowej z wymaganą wytrzymałością oraz plastycznością.

Podczas obróbki plastycznej na zimno spiekanych materiałów o porowatej strukturze wykorzystuje się występujące jednocześnie efekty:

- kształtowania,
- obniżenia porowatości,
- wzmocnienia odkształceniowego osnowy.

Tabela 1.

Czynniki oraz metody i środki technologiczne wpływające na właściwości materiałów i wyrobów wytwarzanych
z proszków metalu

Czynniki w właściwośc i wyrobów z proszk	/pływające na ci materiałów / spiekanych ców metali	Metody i środki technologiczne stosowane w celu uzyskiwania określonych właściwości spieków metali			
Właściwości osnowy spieku	Skład chemiczny	 Dobór składników mieszanki proszkowej Infiltracja Nawilżanie Obróbka cieplno-chemiczna Atmosfera spiekania 			
	Cechy mikrostruktury	 Warunki spiekania i chłodzenia po spiekaniu Obróbka cieplna Obróbka plastyczna półwyrobów spiekanych Ponowne spiekanie lub wyżarzanie zastosowane po obróbce plastycznej 			
Porowatość i morfologia pustek		 Dobór metod i warunków formowania kształtek z proszku Dobór składu chemicznego i ziarnowego, kształtu cząstek proszku oraz innych parametrów determinujących właściwości technologiczne mieszanek proszkowych (wpływające na przebieg procesów formowania i spiekania) Nowoczesne technologie formowania i spiekania proszków oraz kształtowania plastycznego spieków (CIP, HIP, PIM, prasowanie pulsacyjne i dynamiczne) Klasyczne procesy obróbki plastycznej proszków i spieków Ponowne spiekanie lub wyżarzanie po obróbce plastycznej 			

Otrzymywane wyroby cechuje dobra jakość technologiczna i użytkowa. Oczywiście, uzyskanie istotnego obniżenia porowatości wstępniaka (uformowanej i spiekanej kształtki), co warunkuje wysokie właściwości wytrzymałościowe, jest możliwe podczas odkształcania plastycznego tylko w warunkach ujemnego naprężenia średniego ($\sigma_m < 0$). Następuje wtedy zmniejszanie się wymiarów pustek, a nawet ich zamykanie i spajanie [25, 26, 36, 83 84]. Wymaga to odpowiedniego doboru rodzaju i warunków realizacji procesu kształtowania plastycznego.

Zastosowanie obróbki plastycznej na zimno jako metody podwyższania gęstości i wzmocnienia osnowy spieku ma jednak pewne ograniczenia, spowodowane możliwością obniżenia spójności na granicach cząstek proszku, zwłaszcza, jeśli odkształcenie dotyczy wstępniaków o dużej porowatości początkowej [48]. Ponadto odkształceniom trwałym na zimno towarzyszy spadek właściwości plastycznych spieku. Zniwelowanie tego rodzaju niekorzystnych skutków kształtowania plastycznego na zimno może być zrealizowane poprzez zastosowanie końcowej obróbki cieplnej w postaci ponownego spiekania lub wyżarzania (rekrystalizacji). Tak przeprowadzany proces jest znany pod nazwą *Double Press*

– *Double Sintering* [21, 20, 66, 67, 76] i wykorzystywany w produkcji odpowiedzialnych części maszyn, m.in. wyrobów dla motoryzacji. Problemem w tej technologii jest skurcz materiału mający miejsce podczas spiekania wysokotemperaturowego.

Do prawidłowego projektowania wyrobów oraz technologii obróbki plastycznej niezbędne jest wyznaczenie ilościowych i jakościowych związków między parametrami kształtowania plastycznego a wybranymi właściwościami mechanicznymi porowatych spieków metali [48]. Konieczne jest również poznanie wpływu ponownego spiekania lub wyżarzania na strukturę i właściwości spieków podanych uprzednio kontrolowanym odkształceniom plastycznym na zimno. Celowi temu jest poświęcona niniejsza praca.

1 Analiza zagadnienia na podstawie literatury

1.1 Kierunki rozwoju technologii spiekowych

Rozwój technologii spieków umożliwia ciągłe podwyższanie właściwości mechanicznych tworzyw konstrukcyjnych i wykonywanie wyrobów o coraz bardziej złożonych kształtach. Opracowywane i badane są nowe materiały konstrukcyjne, w tym materiały nanokrystaliczne, kompozyty i spieki na osnowie metalicznej umocnione twardymi cząstkami. Wyroby spiekane z proszków zajmują miejsce w szerokiej grupie wyrobów użytkowych. Metody metalurgii proszków są także coraz częściej stosowane w produkcji materiałów o specjalnym przeznaczeniu (materiały dla energetyki jądrowej, magnetyczne oraz biomateriały) [22, 74, 98]. Jeśli chodzi o spieki na osnowie żelaza, to największe znaczenie mają wyroby z proszków niskostopowych z dodatkami C, Cu, Ni, Mo a ostatnio też Cr, Mn i Si wytwarzane dla potrzeb motoryzacji.

Spośród kierunków badań, prowadzonych obecnie w wielu ośrodkach naukowych i mających na celu ulepszanie stosowanych w technologii spieków metod wytwarzania oraz tworzenie nowych, można wymienić następujące:

- Poprawienie właściwości technologicznych, jednorodności i czystości proszków. Opracowywane są nowe metody produkcji proszków, pozwalające na dokładniejszą kontrolę wielkości i kształtu cząstek, np. poprzez rozpylanie ciekłego metalu z zastosowaniem specjalnie opracowanych dysz [22, 74].
- Ograniczanie sił tarcia w procesach formowania. Do mieszanek proszkowych wprowadzane są substancje zmniejszające siły tarcia występujące między cząstkami proszku oraz na styku materiał narzędzie. Ułatwia to wypełnianie matryc o skomplikowanych kształtach oraz pozwala na obniżenie nacisków prasowania [8, 20, 21, 45]. Uzyskuje się kształtki o jednorodnej gęstości.
- Rozwój efektywnych metod formowania oraz kształtowania plastycznego proszków i spieków. Nowe sposoby formowania materiałów proszkowych powstały ze względu na konieczność wytwarzania wyrobów o złożonych kształtach. Mimo zastosowania nowoczesnych, sterownych komputerowo pras wielokrotnego działania oraz wielostemplowych narzędzi, nie można wykonywać pewnych elementów w jednej operacji. Problem ten w pewnym sensie rozwiązują następujące metody formowania materiałów proszkowych:

<u>formowanie wtryskowe</u> (*PIM – Powder Injection Molding*) pozwalające na uzyskiwanie wyrobów o praktycznie dowolnych kształtach [19, 28]; prowadzone prace nad tą metodą formownia dotyczą dalszej poprawy stopnia wypełnienia matrycy z wykorzystaniem wiedzy z zakresu przepływu cieczy,

<u>formowanie warstwowe</u> (*SLS* - *Selective Laser Sintering*), jedna z ostatnio rozwijanych technologii, polegająca na nakładaniu kolejnych warstw proszku i spiekaniu ich przy pomocy lasera; materiał układany jest warstwami i nagrzewany wiązką laserową, nie spieczony materiał jest zdmuchiwany, ruch głowicy laserowej sterowany jest komputerowo; pozwala to na wytwarzanie wyrobów o skomplikowanych kształtach i dużej dokładności wymiarowej (ze względu na niskie właściwości mechaniczne po laserowym spiekaniu wyroby te wymagają zwykle dodatkowego spiekania) [49, 50],

<u>wtryskiwanie strugi proszku do obracającej się formy (SF – Spray Forming</u>), metoda ta jest podobna do formowania wtryskowego z tym, że struga materiału w postaci ciekłej jest dodatkowo rozpylana i przyspieszana do dużej prędkości przy pomocy gazu, a kontrolowany ruch obrotowy formy gwarantuje równomierne rozłożenie warstwy materiału i jednorodną strukturę w całej objętości wyrobu (metoda ta stosowana jest do wytwarzania elementów cienkościennych: listew, rurek, rolek, a także wyrobów płaskich wymagających wysokiej dokładności wymiarowej oraz do produkcji elementów termoelektrycznych) [82].

 Dążenie do obniżenia nacisków prasowania, podwyższenia gęstości i jednorodności wyprasek. Działania te przyniosły także podwyższenie efektywności wytwarzania wyrobów o różnorodnych kształtach, z materiałów trudnoodkształcalnych lub o specjalnych właściwościach oraz spowodowały powstanie i rozwój wielu metod kształtowania plastycznego proszków i spieków, z których można wymienić następujące:

<u>prasowanie z wysokimi prędkościami</u> (dynamiczne), wykorzystujące energię spalania mieszanki wybuchowej (*CDC - Combustion Driven Compaction*) i kształtowanie przy pomocy szybkich młotów hydraulicznych (*HVC - High Velocity Compaction*); obydwie metody pozwalają na uzyskanie jednorodnej i dużej gęstości wyprasek (dla proszków na bazie żelaza – ok. 7,2÷7,4 [g/cm³]) [32, 39, 41],

<u>prasowanie z podgrzewaniem</u>, wykorzystujące zjawisko obniżenia granicy plastyczności stali ferrytycznych już w temperaturze nie przekraczającej 150 [°C]; ten sposób zagęszczania pozwala uzyskać porowatość wyprasek do około 0,03 i jest wspomagany stosowaniem w mieszankach różnorodnych substancji wiążących (lepiszczy), ułatwiających łączenie poszczególnych cząstek proszku [5, 29, 78, 80],

<u>prasowanie obwiedniowe</u>, stosowane dotychczas do kształtowania odkuwek z materiałów litych, okazało się również efektywną metodą obróbki plastycznej na zimno i gorąco spieków metali [83, 84],

<u>kucie w "plastycznej matrycy"</u>, stosowane do odkształcania materiałów proszkowych o niskiej plastyczności [16, 87],

<u>specjalne rodzaje wyciskania</u>, np. z ujemnym kątem matrycy, cykliczne wyciskanie spęczające [104] i inne,

<u>prasowanie pulsacyjne</u>, w którym stosuje się pulsujące ruchy elementów prasowników (stempli i/lub matryc) z częstotliwościami rzędu kilkunastu do kilkuset herców lub ultradźwiękowymi, zarówno podczas prasowania jak i wypychania wyprasek; w efekcie obniżenia sił tarcia otrzymuje się jednorodne wypraski, nawet przy dużej ich smukłości oraz zmniejszenie nacisków prasowania i wypychania; metoda wymaga stosowania specjalnych pras mechanicznych lub hydraulicznych, względnie odpowiedniego oprzyrządowania [58, 59, 62, 63, 64, 86],

prasowanie w polu elektromagnetycznym, stosowane przy produkcji magnesów anizotropowych [59, 60, 61],

metody prasowania izostatycznego HIP, CIP [20, 31, 74, 85, 86].

 Opracowywanie i rozwój nowych technologii spiekania. Nowe konstrukcje pieców pozwoliły na rozwój technik spiekania [10, 21, 67]. Można tu wymienić:

<u>spiekanie wysokotemperaturowe</u>, w którym podnosi się temperaturę spiekania o 100 \div 160 [°C] w porównaniu z tradycyjnym (dla proszków na bazie żelaza są to temperatury 1250 \div 1285 [°C]); w takich temperaturach następuje intensyfikacja procesów spiekania, co powoduje poprawę jednorodności, stopnia zagęszczenia oraz końcowych właściwości spieku (m.in. twardości i wytrzymałości zmęczeniowej); mechanizmy spiekania wysokotemperaturowego były oczywiście poznane i opisane wcześniej, lecz na przeszkodzie w ich wykorzystaniu stały, ostatnio rozwiązane, problemy konstrukcyjne pieców do spiekania materiałów proszkowych; należy dodać, że ten sposób spiekania może prowadzić do rozrostu ziarna w osnowie spieku - nad rozwiązaniem tego problemu prowadzone są dalsze badania [21, 77],

<u>spiekanie aktywowane</u>, które ma na celu podniesienie współczynnika dyfuzji w fazie stałej i wytworzenie fazy ciekłej na drodze chemicznej (poprzez dodawanie domieszek np. P, B, C, Co, Si, Cu, Mo, Ta, V i W) [21]; aktywacja procesów spiekania może odbywać się również metodami fizycznymi [10]; szczególnie interesujące efekty przynosi aktywacja przy pomocy pola elektrycznego (*FAST – Field Activation Sintering Technique*) [105].

- Ulepszanie właściwości osnowy spieku poprzez odpowiednią obróbkę cieplną lub cieplno - chemiczną. Nowe metody (*Sinter-hardening*) łączą proces hartowania z procesem spiekania. Odpowiednia modułowa konstrukcja pieców wyposażonych w konwekcyjne strefy chłodzące oraz wykorzystanie zamkniętego obiegu gazów chłodzących pozwala na przeprowadzanie hartowania wprost z temperatury spiekania.
- Opracowywanie i rozwój specjalnych, zaawansowanych metod produkcji nowych materiałów. Skład chemiczny materiałów i wyrobów spiekanych modyfikowany jest między innymi na drodze infiltracji podczas spiekania z fazą ciekłą (SILP Sintering by Infiltration of Loose, Powder), co pozwala na tworzenie nowych materiałów, dodawanie do osnowy spieków składników charakteryzujących się np. dużą twardością czy też odpornością na działanie wysokich temperatur. Do tych specjalnych technologii zalicza się nowe metody stopowania (łączenia, stapiania), w tym mechaniczną (MA -

Mechanical Alloying) i reaktywne w różnych fazach - stałych, ciekłych i przejściowych oraz przy zróżnicowanych wartościach temperatury i ciśnienia. Można tu również wymienić otrzymywanie stali szybkotnących metodą prasowania izostatycznego (tzw. proces ASEA – STORA) [30].

1.2 Obróbka plastyczna materiałów rozdrobnionych i spiekanych

Najczęściej stosowanymi procesami obróbki plastycznej materiałów rozdrobnionych i spiekanych są: kucie matrycowe na młotach i prasach, walcowanie, różne odmiany wyciskania, prasowanie izostatyczne, nagniatanie oraz kalibrowanie. W produkcji niektórych elementów przekładni zębatych (koła zębate stożkowe, zębatki pierścieniowe itp.) i innych części stosowane są specjalne procesy kuźnicze, jak np. kształtowanie na prasie z wahającą matrycą [6, 7, 9, 27, 32, 36, 37, 42, 46, 52, 67, 75, 106].

Procesy prowadzone na gorąco zapewniają dużą gęstość średnią oraz jednorodną i drobnoziarnistą strukturę w całej objętości kształtowanego materiału, a także korzystną morfologię pustek Należy dodać, że obróbka plastyczna na gorąco wymaga zazwyczaj stosowania atmosfer ochronnych i urządzeń do bezzgorzelinowego nagrzewnia wsadu (w celu ochrony spieków przed utlenianiem). Obróbka plastyczna na gorąco jest często jedynym sposobem kształtowania materiałów charakteryzujących się niską plastycznością w temperaturze pokojowej (stopy na osnowie FeAl i FeAl₃, materiałów należących do grupy faz międzymetalicznych) [90]. Jednym ze sposobów kształtowania takich materiałów jest kucie w "plastycznej matrycy" [16, 88].

Obróbka plastyczna spieków na zimno gwarantuje dokładność wymiarowo – kształtową i wysoką gładkość powierzchni, zapewniając wymaganą jakość technologiczną i użytkową wyrobów (tzw. dokładna obróbka plastyczna). Dodatkowo materiał osnowy podlega wzmocnieniu odkształceniowemu. Charakterystycznym dla stanu zgniotu zmianom ulegają struktura i właściwości osnowy spieku [40, 42, 46, 47, 65]. Ten sposób kształtowania nie wymaga stosowania atmosfer ochronnych oraz urządzeń do bezzgorzelinowego nagrzewania wstępniaków. Jednak – jak już wspomniano wcześniej – kształtowanie plastyczne na zimno niesie ze sobą niebezpieczeństwo obniżenia spójności granic cząstek proszku, powstawania mikropęknięć, szczelin i rozwarstwień, co jest szczególnie niebezpieczne przy produkcji wysoko obciążonych części maszyn [36, 46, 47, 48, 83, 84]. Dobre wyniki z punktu widzenia eliminacji tego rodzaju wad uzyskano stosując prasowanie z wahającą matrycą, podczas którego ma miejsce przemieszczanie się obszaru lokalnych odkształceń plastycznych zgodnie z ruchem górnej części matrycy [37].

Kucie spieków przeprowadza się różnymi metodami (w matrycach otwartych i zamkniętych, na młotach i prasach, na zimno i na gorąco), przy czym dąży się do uzyskania wysokiej gęstości odkuwek (z tego względu najczęściej stosuje się kucie w matrycach zamkniętych). Zakres kształtowanych materiałów jest bardzo szeroki, od spieków na bazie żelaza do stopów aluminium. Podczas projektowania odkuwek, przy doborze wymiarów i kształtu wstępniaków i przedkuwek, należy uwzględnić ściśliwość materiału, spowodowaną obecnością w jego strukturze pustek. Informacje dotyczące metod i technologii kucia spieków oraz struktury i właściwości odkuwek i spiekanych materiałów po kuciu można znaleźć m. in.

w [6, 7, 9, 27, 32, 54, 75, 89, 97, 106]. Prasowanie w matrycach zamkniętych jest jedną z podstawowych metod wytwarzania odkuwek z materiałów spiekanych, przy czym uzyskuje się końcową gęstość względną na poziomie $0.97 \div 0.98$ [108].

Często stosowaną metodą kształtowania plastycznego proszków i spieków metali jest wyciskanie. Proces ten charakteryzuje się stanem naprężeń ściskających w odkształcanym materiale i z tego względu stosowany jest do formowania wyrobów z proszków kruchych, o złej prasowalności i formowalności. Różne metody wyciskania materiałów proszkowych (na zimno i gorąco, z zastosowaniem lub bez stosowania plastyfikatorów) opisane są m. in. w [35, 76, 88].

Wyciskanie na gorąco jest podstawową metodą otrzymywania półwyrobów do dalszej obróbki mechanicznej lub plastycznej stopów na bazie aluminium. Właściwości wytrzymałościowe oraz odporność termiczna takich stopów jest wyższa od podobnych materiałów otrzymywanych w metalurgii tradycyjnej [89, 97]. Prowadzone były również badania procesów wyciskania z zastosowaniem dużych odkształceń oraz matryc o specjalnych kształtach. Procesy te umożliwiły tak znaczną konsolidację cząstek proszku (w wyniku spajania na zimno lub gorąco), że można było pominąć proces spiekania [91, 92, 104].

Walcowanie wzdłużne bywa stosowane zarówno do formowania kształtek (taśm) z proszku, jak i do odkształcania spiekanych wstępniaków. Badania procesu walcowania wzdłużnego spieku z proszku żelaza oraz właściwości tak otrzymanego materiału w porównaniu z materiałem litym (żelazo Armco) były przedmiotem pracy [36]. Autor wskazuje na możliwość uzyskiwania dużych gęstości materiału. Stwierdzono, że istnieje graniczna wartość gęstości, do której dochodzi się, walcując spiekane pasmo z małymi gniotami i stosując międzyoperacyjne wyżarzanie rekrystalizujące. Po przekroczeniu tej granicznej gęstości żelazo spiekane zachowuje się jak materiał lity i może być już walcowane bez wyżarzania między kolejnymi przepustami. Walcowany na zimno materiał spiekany posiada właściwości wytrzymałościowe zbliżone do materiału litego, natomiast jego wydłużenie względne jest o około 25% mniejsze.

Stosowana jest również powierzchniowa wykańczająca obróbka plastyczna spieków poprzez nagniatanie (najczęściej statyczne - toczne lub ślizgowe). Procesy nagniatania wywierają korzystny wpływ na stan warstwy wierzchniej materiałów spiekanych z proszków metali powodując zmniejszenie chropowatości powierzchni, podwyższenie gęstości, wzmocnienie osnowy oraz uzyskanie ostatecznych naprężeń ściskających w obrębie warstwy wierzchniej. Jakość użytkową wyrobów charakteryzuje m. in. wzrost wytrzymałości zmęczeniowej i odporności na zużycie ścierne. Procesy nagniatania były badane między innymi w [42, 71, 72, 73]. W pracach [42, 53] autorzy zwracają uwagę na możliwość stosowania po nagniataniu obróbki cieplno-chemicznej.

Ze względu na występujące w trakcie procesu spiekania zmiany wymiarowe kształtek często stosuje się kalibrowanie - wykańczającą obróbkę plastyczną, której celem jest

uzyskanie wymaganej dokładności wymiarowo - kształtowej i gładkości powierzchni⁽¹⁾. Kalibrowanie wyrobów spiekanych o 10 - 11 klasie dokładności IT pozwala na uzyskanie tolerancji mieszczących się w 6 - 7 klasie dokładności, natomiast ponowne kalibrowanie – w 5 - 6 klasie [68]. Różnorodne odmiany procesu kalibrowania przedstawione są m.in. w [57].

Prócz dogęszczania i kalibrowania do innych zabiegów wpływających na jednoczesne poprawienie właściwości mechanicznych i zwiększenie dokładności wymiarowej jest dogniatanie (odkuwek). W [93] wykazano wzrost wytrzymałości na rozciąganie i na zginanie oraz udarności połączone ze zmniejszeniem porowatości osiągnięte poprzez dogniatanie na zimno spieków o składzie chemicznym odpowiadającym niskostopowej stali do ulepszania cieplnego. Autorzy zbadali zależność osiąganego zmniejszenia porowatości spieku od nacisku jednostkowego, określając jednocześnie jego maksymalną wartość, powyżej której dogniatanie nie wpływa już na przyrost właściwości wytrzymałościowych.

Procesy obróbki plastycznej wraz z następującą po nich obróbką cieplną znajdują coraz częściej zastosowanie w produkcji wyrobów spiekanych o specjalnym przeznaczeniu, takich jak np. tuleje samosmarujących łożysk ślizgowych dla przemysłu lotniczego [99].

1.3 Wpływ odkształcenia plastycznego na zimno na strukturę i właściwości mechaniczne materiałów spiekanych

Kształtowane plastycznie na zimno spieki metali o strukturze porowatej doznają trwałych odkształceń plastycznych postaciowych i objętościowych, przy czym odkształcenia objętościowe są skutkiem zmian wymiarów pustek. Struktura i właściwości osnowy spieku są charakterystyczne dla stanu zgniotu (występuje wzrost właściwości plastycznych, zmiana orientacji granic ziarn i ich kształtu, powstanie tekstury itp.), analogicznie jak to się dzieje w przypadku materiałów litych. Wpływ istniejących w strukturze spieku pustek na przebieg procesu odkształcania można porównać z wpływem wtrąceń niemetalicznych i innych faz na ograniczenie ruchu dyslokacji oraz powstawanie mikropęknięć w materiałach litych [11, 15, 70, 96, 102].

Dobre właściwości mechaniczne spieku (uwarunkowane otrzymaniem niskiej porowatości, drobnoziarnistej struktury i korzystnej morfologii pustek) można otrzymać, stosując odkształcenia plastyczne na gorąco. Podobne efekty można osiągnąć również podczas obróbki plastycznej na zimno pod warunkiem, że uniknie się naruszenia spójności lub wystąpienia wad materiału w postaci szczelin i mikropęknięć. Wymaga to odpowiedniego doboru rodzaju i warunków procesu technologicznego, a w tym - porowatości początkowej odkształcanych wstępniaków. Ewentualne negatywne lub niepożądane skutki odkształceń plastycznych na zimno można usunąć, stosując ponowne spiekanie, które powoduje m.in. sferoidyzację pustek, poprawę spójności lub likwidację szczelin na granicach ziaren proszku

⁽¹⁾ Kalibrowanie jest procesem zbliżonym do nagniatania (statycznego ślizgowego), od którego różni się zakresem stosowanych gniotów oraz konstrukcją narzędzi (matryc), umożliwiających jednoczesną obróbkę całego przedmiotu, przy czym na poszczególnych powierzchniach mogą panować różne warunki odkształcania.

[67, 103]. Jeżeli stan zgniotu jest niepożądany - można zastosować klasyczną operację wyżarzania rekrystalizującego.

Projektowanie oraz efektywne stosowanie procesów obróbki plastycznej na zimno spieków metali wymaga poznania jednoczesnego wpływu porowatości i stopnia wzmocnienia osnowy na strukturę i właściwości kształtowanego materiału spiekanego. Wpływ porowatości na właściwości mechaniczne spieków z proszków metali jest dość dobrze zbadany [12, 13, 17, 18, 25, 52, 53, 54, 55, 66, 67, 68, 76, 77, 92]. Opisano także, głównie jakościowo, zmiany zachodzące w morfologii pustek oraz w osnowie spieku wskutek odkształceń plastycznych na zimno. Prawie nie spotyka się jednak prac, w których zmiany te byłyby określane ilościowo w funkcji poprawnie zdefiniowanego stopnia odkształcenia osnowy. Badania tego typu były przedmiotem prac [46, 48, 69], gdzie właściwości mechaniczne spieków wyznaczano doświadczalnie jako funkcje zależne od porowatości i odkształcenia zastępczego osnowy (parametru wzmocnienia). Wyniki badań zaprezentowane w pracy [48] wykazały znaczne obniżenie właściwości plastycznych odkształcanych na zimno spieków metali, przejawiające się między innymi spadkiem wydłużenia i udarności oraz obniżenie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu względem właściwości mierzonych przy ściskaniu. Sugeruje to niską spójność granic cząstek proszku, przez co wzmocnienie odkształceniowe osnowy nie może być w pełni wykorzystane. Tym samym wskazano na ograniczenia w stosowaniu odkształcania plastycznego na zimno w celu podwyższania właściwości wytrzymałościowych spieków metali. Przy odpowiednich wartościach odkształcenia zastępczego osnowy i dostatecznie małej porowatości poczatkowej ww. negatywne zjawiska nie zachodzą.

1.4 Obróbka cieplna i cieplno - chemiczna materiałów spiekanych

Opracowania naukowe i techniczne dotyczące obróbki cieplnej metalowych materiałów litych i jej wpływu na mikrostrukturę i właściwości są bardzo szerokie i opisują te zagadnienia w sposób szczegółowy dla różnorodnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w technice. Mało jest jednak opracowań dotyczących materiałów spiekanych. Dostępne prace zawierają najczęściej zbiory uzyskanych w drodze doświadczalnej parametrów obróbki cieplnej lub cieplno - chemicznej dla wybranych spieków metali. Zwłaszcza niewiele jest prac badawczych, mających na celu określenie wpływu obróbki cieplnej (ponownego spiekania lub wyżarzania) spieków poddanych wcześniej obróbce plastycznej na zimno na ich strukturę i właściwości.

Podobnie jak materiały lite, spieki metali poddawane są różnorodnym operacjom obróbki cieplnej i cieplno - chemicznej [20, 95], m.in.:

- wyżarzaniu wygrzewaniu powyżej temperatury zdrowienia i rekrystalizacji, z następującym potem powolnym chłodzeniem; celem operacji jest usunięcie resztkowych naprężeń wewnętrznych i rekrystalizacja osnowy spieku,
- węgloazotowaniu niskotemperaturowemu i wysokotemperaturowemu polegającemu na dyfuzyjnym nasycaniu warstwy wierzchniej obrabianego wyrobu jednocześnie węglem i azotem, w celu uzyskanie twardej i odpornej na ścieranie powierzchni,

- nawęglaniu w ośrodkach ciekłych lub gazowych, w celu wzbogacenia w węgiel warstwy wierzchniej, przy czym grubość warstwy nawęglonej zależy od gęstości spieku oraz czasu trwania procesu,
- normalizacji polegającej na nagrzaniu przedmiotu do temperatury 35 ÷ 50 [°C] powyżej temperatury przemiany eutektoidalnej i chłodzeniu w spokojnym powietrzu; normalizację przeprowadza się w celu uzyskania drobnego i jednorodnego ziarna w osnowie spieku,
- utwardzaniu wydzieleniowemu mającemu na celu utwardzenie osnowy spieku dyspersyjnymi cząstkami fazy wtórnej, wydzielonej z roztworu stałego (zazwyczaj po wcześniejszym przesycaniu),
- przesycaniu pozwalającemu uzyskać w temperaturze otoczenia jednofazową strukturę przesyconego roztworu stałego,
- hartowaniu tj. szybkiemu chłodzeniu nagrzanego materiału w celu uzyskania martenzytycznej struktury osnowy spieku, charakteryzującej się dużą twardością i wytrzymałością oraz niską plastycznością,
- hartowaniu z temperatury spiekania ("sinter hardening") zapewniającemu otrzymanie martenzytycznej lub bainitycznej struktury osnowy spieku; struktura bainityczna osnowy charakteryzuje się lepszymi właściwościami plastycznymi oraz wytrzymałością zmęczeniową w porównaniu ze strukturą martenzytyczną (kontrolowane chłodzenie odbywa się ośrodkach gazowych, często z zamkniętym obiegiem gazu),
- utlenianiu gazowemu polegającemu na wygrzewaniu spieków na bazie żelaza w atmosferze pary wodnej w temperaturze 480 ÷ 560 [°C]; ma to na celu wytworzenie na powierzchni spieku odpornej na utlenianie ciemno-szarej warstewki tlenku żelaza Fe₂O₃, co oprócz efektu dekoracyjnego wpływa na zwiększenie twardości i odporności korozyjnej,
- odpuszczaniu dodatkowej obróbce cieplnej po hartowaniu, polegającej na wydzieleniu nadmiaru węgla z martenzytu, przemianie austenitu szczątkowego oraz rekrystalizacji osnowy w celu polepszenia ciągliwości spieku, co odbywa się kosztem jego twardości,
- ponownemu spiekaniu, np. po uprzedniej obróbce plastycznej.

Różnorodne odmiany obróbki cieplnej oraz ich wpływ na strukturę i właściwości materiałów spiekanych omawiane są m. in. w [1, 20, 23, 34, 44, 51, 55, 68]. Ponieważ prace te w większości nie uwzględniają w analizie poziomu odkształceń plastycznych w osnowie spieku lub dotyczą ulepszania cieplnego, a tym samym nie wiążą się ściśle z tematem niniejszej pracy, – więc wyniki w nich zawarte będą omówione w skrócie. Należy podkreślić, że procesy obróbki cieplnej, a zwłaszcza cieplno – chemicznej spieków mają nieco odmienny przebieg niż dla materiałów litych – ze względu na porowatą strukturę.

Rekrystalizacja jest podstawowym procesem modyfikującym właściwości metali i ich stopów po odkształceniu plastycznym. W [10] przedstawiono zjawisko rekrystalizacji materiałów porowatych zachodzącej podczas spiekania. Wskazano na różnice między

rekrystalizacją materiałów litych i porowatych, wynikające z obecności pustek, co wiąże się z bardziej rozwiniętymi powierzchniami swobodnymi spiekanych cząstek. Siłą napędową procesu rekrystalizacji jest dążenie układu do osiągnięcia stanu równowagi o mniejszej całkowitej energii powierzchniowej granic ziaren. Autor stwierdza, że przebieg rekrystalizacji materiałów porowatych zależy głównie od wymiarów sprasowanych cząstek, co związane jest z wielkością porów, mających hamujący wpływ na przebieg procesu. Rekrystalizacji, prócz zmiany struktury, towarzyszą równocześnie takie zjawiska jak skurcz i redukcja tlenków.

Obróbka cieplna i cieplno - chemiczna spieków z proszków żelaza o gęstości powyżej 7,2 [g/cm³] przeprowadzana jest tak samo jak dla materiałów litych, częstokroć w piecach bez atmosfery ochronnej, co wynika z braku porowatości otwartej. Obróbka cieplna spieków poniżej tej gęstości wymaga specjalnych atmosfer ochronnych i redukujących, zapobiegających procesom utleniania oraz chłodzenia w oleju w zbiorniku, który często znajduje się w strefie grzania pieca. Należy dodać, że obecność porów wypełnionych gazem powoduje niższą przewodność cieplną, co wymusza konieczność stosowania bardziej intensywnego chłodzenia. Optymalną zawartością węgla w spiekach stalowych jest ilość odpowiadająca punktowi eutektoidalnemu, tj. 0,8% składu mieszanki, (oczywiście należy pamiętać o wpływie dodatków stopowych na położenie tego punktu) [1].

Obróbka cieplna materiałów porowatych - prócz wymienionych już ograniczeń wynikających z porowatej struktury obrabianego materiału - niesie ze sobą inne niedogodności. Przykładem może tu być wprowadzanie do mieszanek proszkowych składników pożądanych z punktu widzenia obróbki cieplnej, lecz mających negatywny wpływ na inne ich właściwości, np. prasowalność. Jest tak np. w przypadku wysokowytrzymałych manganowych stali konstrukcyjnych, wytwarzanych w technologii spiekowej (pewne związki manganu wprowadzane do mieszanek proszkowych w znacznym stopniu pogarszają ich prasowalność). W [87] autor przedstawia główne aspekty związane z produkcją stopowych konstrukcyjnych stali charakteryzujących się wysoką hartownością, a przeznaczonych do technologii obróbki cieplnej typu "*sinter - hardening*", polegającej na hartowaniu bezpośrednio z temperatury spiekania poprzez przyspieszone chłodzenie.

Właśnie obróbka cieplna typu "*sinter - hardening*" szczególnie interesuje wytwórców materiałów spiekanych na osnowie żelaza, co wynika z dążenia do ograniczania liczby operacji niezbędnych do otrzymania gotowego wyrobu. W [44, 51] autorzy opisują nowe mieszanki proszkowe stopowych stali chromowych na bazie proszku żelaza z dodatkami Ni, Si i Mo, charakteryzujące się wysoką hartownością, co pozwala na osiąganie po odpowiedniej obróbce cieplnej i cieplno - chemicznej dobrych właściwości mechanicznych spieków z tych mieszanek: wytrzymałości doraźnej i zmęczeniowej, twardości, udarności $(20 \div 30 \text{ [J/cm}^2\text{]})$ oraz wydłużenia $(2 \div 3\%)$ przy jednoczesnej wyjątkowo dużej stabilności wymiarowej podczas rozmaitych procesów termicznych. Dzięki zastosowaniu odpowiednich dodatków smarujących oraz środków ułatwiających łączenie cząstek proszku możliwe jest uzyskiwanie gęstości wyprasek rzędu 7,2 [g/cm³]. Według autorów unikalne połączenie właściwości umożliwia szerokie zastosowanie tych spieków zamiast elementów kutych czy spiekanych wytwarzanych w technologii DP/DS i utwardzanych indukcyjnie.

Stosowana dla tych materiałów obróbka cieplna jest typową obróbką "sinter - hardening" składającą się z operacji:

- spiekania prasowanej na gorąco kształtki przez 30 [min] w temperaturze 1150 [°C] w atmosferze 90%N₂/10%H₂ (% obj.),
- chłodzenia po spiekaniu w zakresie temperatury między 650 a 315 [°C] z odpowiednią prędkością (badany był również wpływ prędkości chłodzenia na końcowe właściwości materiału),
- ostatecznego wygrzewania odprężającego w temperaturze 205 [°C] w czasie 1 [h].

Możliwości przeprowadzania obróbki cieplnej kształtek ze stali chromowych połączonej ze spiekaniem w piecach próżniowych opisano w [23]. Przedstawiona obróbka cieplna łączy w sobie dwa procesy: spiekanie i hartowanie. Autorzy wskazują na możliwość użycia medium chłodzącego w postaci azotu. Zastosowanie do chłodzenia gazu o odpowiednim przepływie łączy się ze zmniejszeniem naprężeń hartowniczych i pozwala otrzymać żądaną strukturę martenzytyczną. Dodatkowo przy takim sposobie chłodzenia nie ma konieczności usuwania medium chłodzącego z porów otwartych, co jest niezbędne w przypadku stosowania oleju. Prezentowane są mikrostruktury oraz właściwości mechaniczne materiałów o różnym składzie chemicznym, poddanych spiekaniu w temperaturze 1120 [°C] lub wysokotemperaturowemu w temperaturze 1250 [°C]. Hartowanie odbywało się przy różnych prędkościach chłodzenia, co prowadziło do otrzymania różnorodnej zawartości bainitu w strukturze materiału. Autorzy wskazują na możliwości, jakie daje chłodzenie gazem przy dopasowaniu prędkości chłodzenia do składu chemicznego obrabianego materiału. Wykazano przydatność obróbki cieplnej, łączącej spiekanie z hartowaniem przy chłodzeniu gazem do produkcji wyrobów dla przemysłu motoryzacyjnego.

Różne odmiany obróbki cieplnej oraz ich wpływ na końcowe właściwości spieków mogących mieć zastosowanie w produkcji części wysoko obciążonych przekładni samochodowych omawiane są w [55]. Przygotowano dwa rodzaje mieszanek proszkowych stali stopowych o zawartości 0,85% Mo z tym, że jedna mieszanka zawierała 0,6% C a druga - oprócz dodatku 0,6% C – 2% domieszkę Ni. Materiał po sprasowaniu do gęstości $6,8 \div 6,9$ [g/cm³] był spiekany w temperaturze 1120 [°C] i kuty na gorąco w temperaturze 930 [°C] pod ciśnieniem 830 [MPa]. Następnie przeprowadzono 3 rodzaje obróbki cieplnej:

- wolne studzenie z temperatury kucia bez dalszej obróbki cieplnej,
- przyspieszone chłodzenie (hartowanie), z dodatkowym wygrzewaniem w temperaturze 200 [°C] (odpuszczaniem),
- austenityzację w temperaturze 900 [°C] po kuciu na gorąco w temperaturze 930 [°C], chłodzenie w oleju o temperaturze 80 [°C] i końcowe odpuszczanie w temperaturze 200 [°C].

Podano obszerne wyniki badań mikrostruktury i przełomów oraz właściwości mechanicznych.

W [34] autorzy poszerzają badania opisane wyżej o dodatkowe. Materiał po formowaniu, spiekaniu i kuciu na gorąco poddany został obróbce cieplno-chemicznej, polegającej na dwustopniowym nawęglaniu w próżni przez 3 [h] w temperaturze 980 [°C] w dwóch cyklach po 1,5 [h]. Pierwszym cyklem było intensywne nawęglanie przy wysokim potencjale węglowym, bliskim granicznej rozpuszczalności węgla w austenicie, decydujące o grubości warstwy nawęglonej. Drugim cyklem było wyżarzanie dyfuzyjne przy potencjale węglowym odpowiadającym wymaganiom stężenia powierzchniowego, służące do uzyskania łagodnych zmian stężenia przy przejściu z warstwy wierzchniej do rdzenia materiału. Po nawęglaniu próbki były chłodzone w azocie pod wysokim ciśnieniem, a następnie odpuszczane w temperaturze 200 [°C] przez 1 [h]. Autorzy podają wyniki standardowych badań zmęczeniowych zalecanych przez MPIF (*Metal Powder Industries Federation*) w teście *Rolling Contact Fatigue Testing*.

Badania połączonego wpływu obróbki plastycznej za pomocą kucia matrycowego na gorąco oraz obróbki cieplnej z wykorzystaniem ciepła procesu kucia na strukturę i właściwości mechaniczne spiekanej stali przedstawiono w [94, 100].

Podobnie jak wyroby utwardzane na drodze hartowania, które wymagają końcowej obróbki cieplnej w postaci odpuszczania, również elementy po wcześniejszej obróbce plastycznej na zimno mogą być poddane, jeśli to konieczne, ostatecznej obróbce cieplnej (w postaci ponownego spiekania lub wyżarzania), mającej na celu usunięcie ewentualnych niepożądanych lub negatywnych skutków odkształceń plastycznych. To, czy te negatywne skutki wystąpiły, a jeśli tak, to w jakim zakresie, zależne jest od następujących czynników:

- gatunku odkształcanego spieku,
- rodzaju i warunków realizacji procesu odkształcania,
- porowatości początkowej spieku,
- wielkości zastosowanego gniotu (odkształcenia).

Należy dodać, że podczas spiekania lub wyżarzania w zależności od temperatury i czasu trwania procesu gęstość spieku w mniejszym lub większym stopniu wzrasta.

1.5 Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony w skrócie przegląd aktualnego stanu wiedzy, dotyczący głównie zagadnień rozwoju technologii spieków oraz wpływu obróbki plastycznej i następującej po niej obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne wyrobów z proszków metali upoważnia do sformułowania następujących spostrzeżeń.

• Procesy obróbki plastycznej pełnią w technologii spieków szczególna rolę, służąc zarówno formowaniu półwyrobów z proszku, jak i kształtowaniu gotowych wyrobów ze spiekanych wstępniaków. Specyfika materiałów rozdrobnionych i spiekanych polega na tym, że są to ośrodki w różnym stopniu zdolne do nieodwracalnych odkształceń objętościowych i postaciowych. Jak wiadomo, korzystny efekt podwyższania gęstości można osiągnąć tylko w tych procesach odkształcania, dla których spełniony jest warunek: $\sigma_m < 0$ (ujemnego naprężenia średniego), zarówno globalnie jak i lokalnie. W przeciwnym przypadku (w obszarach, w których $\sigma_m > 0$) następuje wzrost porowatości, co może doprowadzić do naruszenia spójności podczas kształtowania. Nakłada to ograniczenia na rodzaje procesów obróbki plastycznej możliwe do efektywnego wykorzystania w kształtowaniu materiałów rozdrobnionych i spiekanych oraz determinuje warunki termodynamiczne tych procesów. Preferowane są oczywiście

procesy charakteryzujące się dużymi ujemnymi wartościami naprężeń średnich (różne odmiany prasowania izostatycznego, kucia w matrycach zamkniętych i wyciskania), gdyż zapewniają one istotny wzrost gęstości.

- Obróbka plastyczna na gorąco spiekanych półwyrobów przeprowadzana w odpowiednich warunkach termodynamicznych zapewnia niską porowatość, drobnoziarnistą strukturę i korzystną morfologię pustek. Wymaga jednak stosowania atmosfer ochronnych i/lub urządzeń do bezzgorzelinowego nagrzewania wsadu, aby uniknąć szkodliwego zjawiska utleniania spieków.
- Procesy kształtowania na zimno oprócz efektów kształtowania i podwyższania gęstości, zapewniają również wzmocnienie odkształceniowe osnowy spieku, co łącznie prowadzi do otrzymywania wyrobów o wysokiej wytrzymałości. Są to procesy proste w realizacji, gdyż zbędne staje się nagrzewanie i stosowanie atmosfer ochronnych, a ponadto mamy możliwość kształtowania wyrobów gotowych o wysokiej dokładności wymiarowo kształtowej i gładkości powierzchni. Procesy obróbki plastycznej na zimno w zastosowaniu do spieków metali maja jednak ograniczenia, istnieje bowiem niebezpieczeństwo obniżenia spójności na granicach cząstek proszku, a nawet powstawania wad wewnętrznych w postaci mikropęknięć i szczelin, aż do wystąpienia makroskopowego naruszenia spójności. Zjawiska tego rodzaju mogą się pojawić, gdy odkształceniu plastycznemu na zimno poddaje się spieki o dużej porowatości początkowej.
- Do usunięcia ewentualnych niepożądanych skutków obróbki plastycznej na zimno mogą służyć:
 - wyżarzanie rekrystalizujące, stosowane głównie w celu podwyższenia właściwości plastycznych, w zasadzie nie wpływające na porowatość,
 - ponowne spiekanie, w czasie którego zachodzi podwyższenie gęstości, sferoidyzacja pustek oraz poprawa spójności na granicach cząstek proszku; zabieg ten może – w określonych warunkach - eliminować wady w postaci mikropęknięć i szczelin.
- Obecnie znane są i stosowane w praktyce przemysłowej procesy typy DP/DS. Brak jest jednak w literaturze wyników badań wpływu ponownego spiekania na strukturę i właściwości spieków poddanych uprzednio kontrolowanym odkształceniom plastycznym, wywołującym określony poziom wzmocnienia osnowy⁽²⁾.

Na podstawie powyższych uwag można sformułować następujące wnioski, mające charakter wytycznych odnośnie celu, zakresu i metodyki badań własnych.

 Celowe jest zbadanie wpływu ponownego spiekania lub wyżarzania na strukturę i właściwości mechaniczne spieków poddanych kontrolowanym odkształceniom plastycznym na zimno, tzn. charakteryzujących się określonymi (znanymi) poziomami wartości odkształcenia zastępczego osnowy.



⁽²⁾ Poziom wzmocnienia osnowy jest określony przez podanie odkształcenia zastępczego (parametru wzmocnienia) osnowy \in . Ścisłą definicję tego parametru podano w Dodatku B (wzory (D8) i (D9)).

- Badania tego rodzaju pozwolą na ustalenie, w jakim stopniu ww. operacje obróbki cieplnej umożliwiają eliminację ewentualnych niepożądanych lub negatywnych skutków obróbki plastycznej na zimno.
- W celu określenia wpływu obróbki cieplnej na strukturę i właściwości odkształconych na zimno spieków metali należy przeprowadzić badania właściwości mechanicznych oraz badania metalograficzne i fraktograficzne przełomów próbek o różnych wartościach odkształcenia zastępczego osnowy i poddanych zróżnicowanej - co do wartości temperatury – obróbce cieplnej. Wymaga to odpowiedniego przygotowania próbek (proponowany sposób postępowania przedstawiono w dalszej części pracy).
- W badaniach doświadczalnych należy uwzględnić dwa czynniki badane temperaturę obróbki cieplnej (t) oraz odkształcenie zastępcze osnowy spieku (∈). Aby umożliwić porównanie właściwości i struktury spieków poddanych odkształceniom plastycznym i obróbce cieplnej (przy różnych wartościach czynników badanych t i \in) należy przeprowadzić badania w ten sposób, aby uzyskać jednakową porowatość końcową $(\Theta_k = \text{const})$. Wymaga to zastosowania odpowiedniej metodyki badań i przygotowania próbek.

Teza pracy 2

Na podstawie analizy zagadnienia oraz wyników przeprowadzonych wstępnych badań własnych sformułowano następującą tezę pracy.

Zastosowanie odpowiednich rodzajów i warunków obróbki cieplnej (wyżarzania lub ponownego spiekania) spowoduje usunięcie ewentualnych niepożądanych lub negatywnych skutków obróbki plastycznej na zimno spieków z proszków metali.

Efektem rekrystalizacji osnowy, zmiany morfologii pustek i poprawy spójności na granicach ziaren proszku będzie:

- podwyższenie właściwości plastycznych w porównaniu ze spiekami odkształconymi na zimno, mającymi tę samą porowatość,
- otrzymanie właściwości wytrzymałościowych na zbliżonym lub wyższym poziomie, niż dla spieków o tej samej porowatości nie poddanych odkształceniom plastycznym.



3 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest określenie wpływu warunków wyżarzania lub ponownego spiekania odkształconego na zimno porowatego spieku z wybranego gatunku proszku metalu na jego strukturę i właściwości mechaniczne.

Na podstawie wykonanych prac doświadczalnych, obejmujących badania metalograficzne i fraktograficzne oraz wyznaczanie właściwości mechanicznych podjęto próbę uzyskania ilościowej i jakościowej informacji, w jakim stopniu zabiegi wyżarzania lub ponownego spiekania przeprowadzone po odkształceniu plastycznym na zimno modyfikują strukturę oraz właściwości wytrzymałościowe i plastyczne badanych materiałów. Istotne jest zwłaszcza określenie przyrostu właściwości plastycznych w porównaniu ze spiekami odkształconymi oraz zmian właściwości wytrzymałościowych w porównaniu ze spiekami nie odkształconymi w funkcji odkształcenia zastępczego osnowy spieku i temperatury wyżarzania lub ponownego spiekania przy ustalonej porowatości. Odpowiednio opracowany program badań umożliwia śledzenie sekwencji zmian właściwości i cech struktury dla materiałów:

- spiekanych i odkształconych plastycznie na zimno,
- spiekanych, odkształconych plastycznie na zimno oraz poddanych wyżarzaniu lub ponownemu spiekaniu

względem materiałów bezpośrednio po spiekaniu, przy czym możliwe jest dokonywanie odpowiednich porównań dla spieków, mających tę samą (w granicach błędu) porowatość.

W efekcie można ocenić celowość i przydatność stosowania zabiegów wyżarzania lub ponownego spiekania w aspektach:

- nadania spiekom wymaganych dla materiałów konstrukcyjnych właściwości plastycznych,
- utrzymania właściwości wytrzymałościowych na odpowiednio wysokim poziomie.

4 Badania własne

4.1 Uwagi ogólne

Podczas odkształcenia plastycznego na zimno spieku o porowatej strukturze zachodzą równocześnie:

- zmiany porowatości Θ (wzrost, gdy naprężenie średnie $\sigma_m > 0$ lub spadek, gdy $\sigma_m < 0$),
- zjawisko wzmocnienia odkształceniowego osnowy.

Ponadto zmienia się morfologia pustek oraz może zachodzić zarówno spajanie i zamykanie porów, jak też niszczenie wytworzonej w czasie formowania kształtek i spiekania spójności na granicach cząstek proszku. Przebieg i intensywność powyższych zjawisk jest uzależniona od warunków odkształcania (panującego lokalnie lub globalnie stanu naprężenia i wartości odkształceń) oraz od porowatości początkowej i morfologii pustek. Jak już wspomniano wcześniej, skutki odkształceń plastycznych na zimno mogą być więc pożądane (wzmocnienie osnowy), jak też mieć negatywny wpływ na niektóre właściwości mechaniczne (spada udarność, wytrzymałość przy rozciąganiu może być mniejsza niż przy ściskaniu itp.). Powyższe spostrzeżenia zostały potwierdzone wynikami badań [48].

Procesy ponownego spiekania lub wyżarzania likwidują stan zgniotu w osnowie, lecz równocześnie poprawiają spójność na granicach ziaren proszku, a nawet – w wyższych temperaturach - powodują likwidację ewentualnych wad dwuwymiarowych (szczelin) oraz korzystne zmiany morfologii pustek (sferoidyzację), a także spadek porowatości.

Charakter zmian właściwości mechanicznych spieków metali w trakcie odkształceń plastycznych na zimno oraz podczas ich wyżarzania lub ponownego spiekania przedstawiono schematycznie na rysunkach 1 i 2.



Rys.1. Schemat wpływu odkształcenia plastycznego na zimno oraz wyżarzania lub ponownego spiekania na właściwości wytrzymałościowe (w_w) spieków metali.

Rysunek 1 pokazuje zmiany właściwości wytrzymałościowych (w_w) w funkcji porowatości Θ i odkształcenia zastępczego osnowy \in . Podczas odkształceń plastycznych spiekanego wstępniaka parametry $\Theta_i \in$ zmieniają się wzdłuż linii A₀B₀. Dla procesu, dla którego $\sigma_m < 0$ parametr \in osiąga wartość \in_1 , przy czym $\Theta_1 - \Theta_0 < 0$. Odkształcanie powoduje zmianę właściwości wytrzymałościowych wzdłuż linii AB na powierzchni F_w (Θ, \in), natomiast obróbka cieplna – od punktu B do C, o ile operacji tej nie towarzyszy istotna zmiana porowatości. Spiek o tej samej porowatości Θ_1 osiągniętej za pomocą prasowania i spiekania (bez późniejszego odkształcania i obróbki cieplnej) posiada pewną własność odpowiadającą punktowi D. Różni się ona od właściwości spieku o tej samej porowatości, odkształconego i poddanego obróbce cieplnej o Δw_w . W czasie ponownego spiekania zachodzi zmiana porowatości (o $\Delta \Theta$) i właściwości (od B do C'). Analogicznie następują zmiany właściwości plastycznych, co prezentuje schemat na rysunku 2. Krawędzie powierzchni $F_w(\Theta, \in)$ na płaszczyznach (Θ, w_w) i (Θ, w_p) oraz (\in, w_w) i (\in, w_p) przedstawiają odpowiednio zależności właściwości: spieku nie odkształconego od porowatości oraz osnowy od parametru \in .



Rys.2. Schemat wpływu odkształcenia plastycznego na zimno oraz wyżarzania lub ponownego spiekania na właściwości plastyczne (w_p) spieków metali.

4.2 Koncepcja i algorytm badań

Algorytm postępowania przy realizacji badań przedstawiono na rys. 3. Umożliwia on porównanie właściwości spieków:

- poddanych odkształceniu plastycznemu o znanej wartości parametru wzmocnienia osnowy,
- odkształconych i poddanych wyżarzaniu lub ponownemu spiekaniu

z właściwościami spieków nie odkształconych o tej samej porowatości.



Oznaczenia: τ , T – temperatura i czas spiekania, \in – odkształcenie zastępcze osnowy spieku (parametr wzmocnienia), ε – odkształcenie rzeczywiste spieku, γ – współczynnik gniotu, m – masa proszku lub kształtki, a_0 , l_0 , h_0 , a, l, h – odpowiednie wymiary kształtek, Θ_0 – porowatość początkowa, Θ_1 – porowatość końcowa po wyżarzaniu, Θ_1 ' – porowatość końcowa po ponownym spiekaniu, Θ_d – wynik pomiaru porowatości końcowej, OP - odkształcenie plastyczne na zimno, OC – wyżarzanie lub ponowne spiekanie, δ – dopuszczalna różnica porowatości przy porównywaniu wyników badań.

Rys.3. Schemat algorytmu badań.

4.3 Metodyka i technika badań

Charakterystyka obiektu badań. Obiekt badań przedstawiony na rys. 4 charakteryzują:

- wielkości wejściowe (czynniki badane):
 - odkształcenie zastępcze osnowy spieku (\in),
 - temperatura wyżarzania lub ponownego spiekania (t).
- wielkości wyjściowe (czynniki wynikowe):
 - wytrzymałość na rozciąganie (R_m),
 - umowna granica plastyczności (R_{p0,2}),
 - twardość (HB2,5/306/15),
 - wydłużenie względne (A₅),
 - udarność mierzona na próbkach bez karbu (KC).
- czynniki stałe:
 - rodzaj proszku i warunki spiekania kształtek,
 - czas i atmosfera wyżarzania lub ponownego spiekania,
 - porowatość końcowa.
- czynniki zakłócające:
 - niejednorodność porowatości kształtek po spiekaniu i odkształceniu.



Rys.4. Schemat obiektu badań.

Plan badań. Zastosowano plan statyczny dwuczynnikowy zdeterminowany kompletny. Poziomy wartości czynników badanych oraz stałych podano w tabeli 2. Przyjęto powtarzalność $r = 2 \div 3$ dla wszystkich układów pomiarowych.

Poziomy wartości cz	Poziomy wartości czynników badanych											
Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Parametr wzmocnienia ∈	0,17	0,17	0,17	0,17	0,30	0,30	0,30	0,30	0,49	0,49	0,49	0,49
Temperatura wyżarzania												
lub ponownego spiekania	650	750	850	1120*	650	750	850	1120*	650	750	850	1120*
Czynniki stałe												
Rodzaj proszku						F	PNC-60)				
	Τe τ	Temperatura spiekania τ [°C]					1120					
Warunki spiekania	C	zas sp	iekani	a T [h]		1	1					
	A	Atmosfera				v	wodór					
Wyżarzanie i ponowne spiekanie *: czas 1 [h], atmosfera: wodór												
Porowatości końcowe: $\Theta_1 = 0,12, \Theta_1 = 0,09$												

Poziomy wartości badanych i czynniki stałe.

Tabela 2.

Funkcje obiektu badań. Dla obiektu badań wg rys. 4 możliwe jest określenie funkcji typu:

$$\{w_{w}, w_{p}\} = f_{i}(t, \epsilon)$$

$$\tag{1}$$

lub:

$$\{\Delta \mathbf{w}_{\mathbf{w}}, \Delta \mathbf{w}_{\mathbf{p}}\} = \mathbf{g}_{\mathbf{i}}(\mathbf{t}, \epsilon) \tag{2}$$

w postaci wielomianowej, wykładniczej lub potęgowej. Symbole zmiennych zależnych są zgodne z rys. 1 i 2, przy czym:

$$w_{w} = \{R_{m}, R_{p0,2}, HB\}; w_{p} = \{A_{5}, KC\}$$
(3)

Materiał do badań. Jako materiał do badań wybrano spiek z proszku żelaza z dodatkiem fosforu (PNC-60) produkowany przez firmę Höganäs S.A. Mieszanka PNC-60

zawiera gąbczasty proszek żelaza o handlowej nazwie NC 100.24, do którego dodawane są rozdrobnione cząstki żelazofosforu. Cząstkę tego proszku zaprezentowano na rys. 5 [33]. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne proszku dostarczonego przez producenta są następujące:

- gęstość nasypowa 3,14 [g/cm³],
- sypkość 25 [s/50 g],
- strata wodorowa 0,19%

Analizę sitową zastosowanej mieszanki proszku PNC-60 zaczerpniętą ze świadectwa kontroli jakości zaprezentowano w tabeli 3.



Rys.5. Cząstka proszku PNC-60 [33].

Tabela 3.

Analiza sitowa proszku PNC-60

Wielkość cząstek proszku Udział [µm] [%] 0 > 212 150 - 212 2,1 106 - 150 26,4 75 - 106 30,4 45 - 75 22,9 < 45 18,2

Spieki z proszku PNC-60 charakteryzują się wysoką wytrzymałością połączoną z bardzo dobrą plastycznością zauważalną w postaci dużego wydłużenia podczas rozciągania. Spieki z tego materiału wyróżniają się dużym wzmocnieniem odkształceniowym, dodatkowo obecność podczas spiekania fazy ciekłej w postaci potrójnej eutektyki Fe₃P o temperaturze topnienia 1050 [°C], zmniejsza porowatość i poprawia jednorodność. Wpływa również korzystnie na procesy dyfuzyjne, poprawia jakość połączeń między cząstkami proszku i intensyfikuje proces spiekania. Występowanie fazy ciekłej, prowadząc do szybkiej

eliminacji oraz sferoidyzacji porów, powoduje jednak duży skurcz podczas spiekania, co utrudnia uzyskanie odpowiednich wymiarów. Charakterystykę tego spieku, zawierającą skład chemiczny, gęstość osnowy oraz funkcje porowatości i krzywą wzmocnienia osnowy podano w tab. 4 [43].

Tabela 4.



Przygotowanie próbek. Materiałem na próbki były kształtki prostopadłościenne o wymiarach $a_0 \ge a_0 \ge b_0$.



Rys.6. Kształtki przeznaczone na próbki do badań.

Wykonanie kształtek obejmowało kolejno:

- 1. Mieszanie proszku ze środkiem poślizgowym (Kenolybe P11, 0,5% wagowo).
- 2. Ważenie porcji proszku.
- 3. Prasowanie w pływającej matrycy.
- 4. Spiekane.
- 5. Kontrolowane odkształcenie plastyczne na zimno.
- 6. Wyżarzanie lub ponowne spiekanie.

Punkty 5 i 6 nie dotyczą próbek, które nie podlegają odkształceniom plastycznym i wyżarzaniu lub ponownemu spiekaniu. Dobór wysokości próbek, masy proszku, warunków odkształcania i innych parametrów przeprowadza się, wykorzystując metodykę przedstawioną w Dodatku B (częściowo opracowaną w [48]). Wymiar h₀ jest wysokością, gwarantującą uzyskanie żądanej porowatości końcowej Θ_1 i parametru wzmocnienia osnowy \in po odkształceniu plastycznym, natomiast wymiary a₀, l₀ i końcowa (po odkształceniu) wysokość h₁ umożliwiają wykonanie próbek udarnościowych oraz próbek walcowych do statycznej próby rozciągania (algorytm postępowania, zapewniający realizację opracowanej koncepcji i planu badań podano schematycznie na rys. 3 i opisano w Dodatku B).

Prasowanie proszku przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej EU40 w przyrządzie z pływającą matrycą.

Odkształcanie plastyczne spiekanych kształtek realizowane było poprzez ściskanie między polerowanymi kowadłami w przyrządzie zapewniającym ich równoległość (na prasie AMSLER 100 D66 z prędkością odkształcania rzędu 0,005 [s⁻¹]). W celu stworzenia warunków zbliżonych do braku tarcia stosowano przekładki z folii teflonowej oddzielające kształtki od powierzchni kowadeł, na które dodatkowo nanoszono smar płynny z dodatkiem grafitu. Odkształcenie $\varepsilon = \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right|$ dobrano stosownie do wymaganych w planie badań wartości odkształcenia zastępczego (parametr wzmocnienia osnowy) \in sposobem podanym w Dodatku B (zależność parametru wzmocnienia osnowy \in od odkształcenia $\varepsilon = \left| \varepsilon_{zz} \right| = \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right|$

przedstawiono na rys. D-19 i w tabeli D-2).

Wyżarzanie i spiekanie przeprowadzono w piecu z atmosferą ochronną.

Technika pomiarów. Pomiary porowatości przeprowadzane były po każdym etapie badań (rys. 3) metodą geometryczną, po uprzednim usunięciu błędów kształtu przez szlifowanie.

Badania twardości przeprowadzano na twardościomierzu Brinell-Vickers HPO-250 kulką o średnicy 2,5 [mm], pod obciążeniem 306 [N] w czasie 15 [sek], zgodnie z [3n].

Wytrzymałość na rozciąganie R_m , granicę plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenie względne A_5 wyznaczono w statycznej próbie rozciągania wg $[2n]^3$ i [7n] na maszynie wytrzymałościowej EU-20 (próbki walcowe pięciokrotne o średnicy początkowej 5 [mm]). Stosowano rejestrację komputerową wydłużenia oraz aktualnej siły obciążającej przy pomocy autorskiego oprogramowania DasTP $[4p]^4$.

Udarność mierzono na próbkach bez karbu łamanych na młocie udarowym Charpy'ego 1H539 firmy A. B. ALPHA o energii początkowej 150 [J], zgodnie z [6n].

Obserwacje i zdjęcia mikrostruktury zostały wykonane za pomocą mikroskopu optycznego Nikon Eclipse ME600P na zgładach metalograficznych trawionych 4% roztworem nitalu, zdjęcia przełomów udarnościowych – na mikroskopie skaningowym JEOL JSM 6460LV. Stosowano powiększenia obiektywu x50 oraz x100, co odpowiadało rzeczywistym polom obserwacji o powierzchni odpowiednio 0,059 [mm²] oraz 0,015 [mm²].

Ilościowa analiza struktury obejmowała określenie wielkości i kształtu ziaren osnowy spieku badanego materiału. W tym celu wyznaczenia tych parametrów wykorzystano fotografie zgładów metalograficznych. Obserwacji poddano losowo wybrane obszary o wielkości 700x500 pikseli, z którego każdy odpowiadał rzeczywistemu polu powierzchni zgładu o wielkości 0,012 [mm²]. Pomiarów stereologicznych struktury dokonano przy pomocy otwartego oprogramowania komputerowego do edycji, przetwarzania i analizy obrazu o nazwie *ImageJ* [5p]. Komputerowa obróbka fotografii zgładów została wykonana na podstawie zaleceń zawartych w [101].

Ocenę powierzchni ziarna wykonano metodą planimetryczną z zastosowaniem tzw. ramki bezpieczeństwa odrzucając przy zliczaniu powierzchnię cząstek przeciętych przez krawędź ramki. Błąd zastosowanej planimetrycznej metody pomiaru w zależności od ilości zliczonych ziarn obliczono na podstawie zaleceń podanych w [81].

Aby wykazać zmiany zachodzące w strukturze materiału po odkształcaniu plastycznym na zimno, a następnie wyżarzaniu w zróżnicowanej temperaturze określano zmianę kształtu ziarn osnowy stosując dwa następujące współczynniki kształtu:

współczynnik wydłużenia cząstki w stosunku do kuli, reprezentującej kształt regularny, definiowany według zależności (4); dla koła f₁=1 dla cząstek o innych kształtach f₁ > 1;

$$f_1 = \frac{a}{b} \tag{4}$$

gdzie: a, b – odpowiednio długość i szerokość najmniejszego prostokąta opisanego na cząstce, lub średnica Fereta i średnica Fereta do niej prostopadła,

³ Patrz wykaz norm na końcu pracy.

⁴ Patrz wykaz oprogramowania komputerowego na końcu pracy.

– współczynnik kolistości (okrągłości) definiowany wg zależności (5) dla koła $f_2 = 1$, pozostałych figur $f_2 < 1$ lub jego odwrotność określana jako pofałdowanie, dla koła

 $\frac{1}{f_2} = 1 \text{ dla innych figur } \frac{1}{f_2} > 1 \text{ (ten parametr jest mało wrażliwy na wydłużenie);}$ $f_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot F}{I^2}$ (5)

gdzie: F – pole powierzchni analizowanej cząstki, L – obwód analizowanej cząstki.

4.4 Wyniki badań

Oznaczenia próbek przedstawione w tabeli 5.

Tabela 5.

Oznaczenie próbek		Porowatość początkowa Θ ₀	Parametr wzmocnienia osnowy €	Temperatura wyżarzania t [°C]	Porowatość końcowa Θ_1, Θ_1	
	0	0,114÷0130		-	0,114÷0130	
К	1	0,176÷0,190	0	-	0,176÷0,190	
	2	0,220÷0,228		-	0,220÷0,228	
	3	0,315÷0,330		-	0,315÷0,330	
	0			-		
A 2	1		0,151÷0,183	650	0 123÷0 132	
	2	0,176÷0,190		750	0,125.0,152	
	3			850		
	4			1120	0,095÷0,098	
	0			-		
	1			650	0 111 • 0 125	
В	2	0,220÷0,228	0,291÷0,322	750	$0,111 \pm 0,123$	
	3			850		
	4			1120	0,090÷0,097	
	0			-		
С	1			650	0,109÷0,115	
	2	0,315÷0,330	0,484÷0,505	750		
	3			850		
	4			1120	0,082÷0,096	

Oznaczenia próbek i parametry obróbki plastycznej oraz obróbki cieplnej spieków PNC-60

Przykładowo, zgodnie z przyjętym oznaczeniem, próbka opisana jako B3 oznacza spiek odkształcony (odkształcenia zastępcze osnowy $\in = 0,29 \div 0,32$) poddany następnie wyżarzaniu w temperaturze 850 [°C].

Wszystkie wyniki badań: porowatości oraz właściwości mechanicznych przedstawione zostały jako średnie z przedziałami ufności $\pm t_{\alpha,f} \cdot s(\overline{x})$ dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,1$ ($s(\overline{x})$ - odchylenie standardowe średnich arytmetycznych, $t_{\alpha,f}$ - wartość krytyczna z rozkładu t Studenta).

Wyniki badań właściwości mechanicznych. W tabeli 6 zamieszczono wyniki badań właściwości mechanicznych spieków służących do przygotowania wstępniaków przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno oraz wyżarzania. Porowatość tych spieków została tak dobrana, by po zastosowaniu obróbki plastycznej o parametrach zgodnych z planem badań podanym w tabeli 2 otrzymać w efekcie końcowym spieki o porowatości $\sim 0,12$, z których część była poddawana zróżnicowanej obróbce cieplnej.

Tabela 6.

aczenie	Porowatość	Wytrzymałość na rozciąganie	Umowna granica plastyczności	Względne wydłużenie procentowe	Udarność	Twardość
Ozn	Θ_0	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]	KC [J/cm ²]	HB 2,5/306/15
K1	0,187 ± 0,003	293 ± 2	228 ± 4	$4,2 \pm 0,2$	20,0 ± 1,1	80 ± 2
K2	0,224 ± 0,005	245 ± 14	199 ± 15	3 ± 1	8,0 ± 1,5	75,5 ± 9,5
K3	0,325 ± 0,013	80±13	78 ± 16	0,3 ± 0,2	11,0 ± 4,8	44 ± 9

Właściwości mechaniczne spieków przed odkształceniem

Zamieszczona w dalszej części tabela 7 przedstawia wyniki badań właściwości mechanicznych spieków o porowatości porównywalnej ze spiekami odkształcanymi plastycznie, lecz otrzymanych w wyniku prasowania i jednokrotnego spiekania. Wyniki te posłużyły do określenia, jak połączona obróbka plastyczna na zimno oraz wyżarzanie spiekanych wstępniaków zmienia właściwości w porównaniu ze spiekami o tej samej porowatości, lecz bez późniejszego odkształcania i obróbki cieplnej.

Tabela 7.

i podudwanych tub nie obrobee elepinej (proba Ro).							
Porowatość	Wytrzymałość na rozciąganie	Umowna granica plastyczności	Względne wydłużenie procentowe	Udarność	Twardość		
Θ_1	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	$A_5 \left[\% ight]$	KC [J/cm ²]	HB 2,5/306/15		
$0,121 \pm 0,009$	402 ± 12	289 ± 9	8 ± 1	23,5 ± 5,9	104 ± 2		

Właściwości mechaniczne spieków nie odkształconych o porowatości porównywalnej do spieków odkształconych i poddawanych lub nie obróbce cieplnej (próbki K0).

Wyniki zaprezentowane w tabelach 6 i 7 obrazują charakterystyczną dla spiekanych materiałów porowatych zależność wszystkich badanych właściwości od porowatości – wraz ze zmniejszeniem porowatości spieku jego właściwości mechaniczne rosną. Wpływ

porowatości spieku PNC-60 na granicę wytrzymałości na rozciąganie (R_m), umowną granicę plastyczności ($R_{p0,2}$) oraz twardość Brinella (HB) pokazano na rys. 7, natomiast rys. 8 przedstawia wpływ porowatości na udarność (KC) oraz względne wydłużenie procentowe (A_5).



Rys. 7. Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie (R_m), umownej granicy plastyczności (R_{p0,2}) oraz twardości Brinella (HB) w zależności od porowatości spieku PNC-60 bez obróbki plastycznej i cieplnej (dane z tab. 6, 7).



Rys. 8. Średnie wartości udarności (KC) oraz umownej granicy plastyczności (A₅) w zależności od porowatości spieku PNC-60 bez obróbki plastycznej i cieplnej (dane z tab. 6, 7).

32

Wyniki badań właściwości mechanicznych spieków odkształconych plastycznie podano w tab. 8 \div 12 (podano również odkształcenie logarytmiczne wstępniaków ε).

Tabela 8.

Oznaczenie	Temp. obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Wytrzymałość na rozciąganie	Umowna granica plastyczności	Względne wydłużenie procentowe
	t [°C]	e	Θ_1, Θ_1 '	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
A0	Bez obróbki cieplnej	0,174 ± 0,011	0,127 ± 0,001	529 ± 14	471 ± 9	0,8±0,1
A1	650	0,163 ± 0,009	0,129 ± 0,007	374 ± 9	296 ± 9	6,4 ± 1,0
A2	750	0,174 ± 0,009	0,126 ± 0,005	383 ± 2	301 ± 4	$6,3 \pm 0,1$
A3	850	0,169 ± 0,014	0,125 ± 0,003	396 ± 10	308 ± 3	6,1 ± 1,1
A4	1120	0,166 ± 0,006	0,097 ± 0,002	448 ± 11	319 ± 10	$9,8 \pm 0,9$
Odk	ształcenie	logarytmiczne w	stępniaków ε	$= 0,23 \div 0,25$		

Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno.

Tabela 9.

aczenie	Temperatura obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Udarność	Twardość
Ozna	t [°C]	\in Θ_1, Θ_1		KC [J/cm ²]	HB 2,5/306/15
A0	Bez obróbki cieplnej	0,176 ± 0,001	$0,127 \pm 0,002$	4,5 ± 0,4	115,0±6,5
A1	650	$0,178 \pm 0,014$	$0,125 \pm 0,003$	25,6 ± 0,1	85,5 ± 2,5
A2	750	$0,175 \pm 0,012$	$0,126 \pm 0,002$	24,1 ± 5,5	85,5 ± 1,5
A3	850	0,171 ± 0,019	$0,126 \pm 0,001$	25,1 ± 3,5	88 ± 2
A4	1120	$0,165 \pm 0,021$	0,097 ± 0,003	53,3 ± 2,5	109 ± 6
Odkszt	ałcenie logaryt	miczne wstępnia	aków $\varepsilon = 0,23 \div$	0,25	

Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.

Oznaczenie	Temp. obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Wytrzymałość na rozciąganie	Umowna granica plastyczności	Względne wydłużenie procentowe
	t [°C]	E	Θ_1, Θ_1	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
B0	Bez obróbki cieplnej	0,308 ± 0,022	0,118 ± 0,009	506 ± 11	494 ± 14	0,2 ± 0,1
B1	650	0,308 ± 0,025	0,116 ± 0,009	376 ± 17	337 ± 8	3,7 ± 0,7
B2	750	0,305 ±0,017	0,117 ± 0,001	389 ± 8	308 ± 13	8,8±0,8
B3	850	0,303 ±0,011	0,116 ± 0,003	397 ± 3	312 ± 7	8,3 ± 1,3
B4	1120	0,306 ±0,002	0,093 ± 0,006	453 ± 7	323 ± 11	10,6 ± 1,4
Odks	ształcenie	logarytmiczne w	stępniaków e	$= 0,42 \div 0,45$		

Tabela 10. Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno

Tabela 11.

czenie	Temperatura obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Udarność	Twardość			
Ozna	t [ºC]	\in Θ_1, Θ_1'		KC [J/cm ²]	HB 2,5/306/15			
B0	Bez obróbki cieplnej	0,314 ± 0,008	$0,115 \pm 0,002$	4,6 ± 1,8	123 ± 10			
B1	650	0,311 ± 0,012	$0,123 \pm 0,005$	9,8 ± 0,9	$91,0 \pm 0,5$			
B2	750	$0,302 \pm 0,019$	$0,118 \pm 0,006$	30,1 ± 5,3	$86,5 \pm 2,5$			
B3	850	$0,303 \pm 0,005$	$0,116 \pm 0,002$	$24,5\pm6,5$	$85,5 \pm 2,5$			
B4	1120	$0,302 \pm 0,026$	$0,090 \pm 0,004$	47,6 ± 4,6	110 ± 2			
Odks	Odkształcenie logarytmiczne wstępniaków $\varepsilon = 0,42 \div 0,45$							

Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.

Tabela 12.

naczenie	Temp. obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Wytrzymałość na rozciąganie	Umowna granica plastyczności	Względne wydłużenie procentowe
Ozi	t [°C]	E	Θ_1, Θ_1	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅ [%]
C0	Bez obróbki cieplnej	0,492 ± 0,016	0,113	342 ± 140	331 ± 136	0
C1	650	0,497 ± 0,014	$0,111 \pm 0,002$	354 ± 32	321 ± 31	3,0
C2	750	$0,490 \pm 0,004$	0,113	331 ± 1	248 ± 1	5,9±0,2
C3	850	0,499 ± 0,001	0,111	370 ± 13	277 ± 10	7,2±3,5
C4	1120	0,497 ± 0,013	0,092 ± 0,008	449 ± 58	303 ± 51	11,7±0,7
Odks	ztałcenie lo	ogarytmiczne wste	rnniaków ε – 07	$6 \div 0.78$		

Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno

czne wstępniakow e ug

Tabela 13.

Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.

Oznaczenie	Temperatura obróbki cieplnej	Parametr wzmocnienia osnowy	Porowatość końcowa	Udarność	Twardość
	t [°C]	E	Θ_1, Θ_1 '	KC [J/cm ²]	HB 2,5/306/15
C0	Bez obróbki cieplnej	0,492 ± 0,009	$0,112 \pm 0,004$	2,0 ± 1,2	$111,5 \pm 20,5$
C1	650	$0,497 \pm 0,011$	0,111 ± 0,003	$16,1 \pm 4,3$	78 ± 10
C2	750	$0,493 \pm 0,017$	$0,111 \pm 0,002$	$21,3\pm0,7$	72 ± 11,5
C3	850	$0,492 \pm 0,012$	$0,110\pm0,002$	$30,1\pm4,5$	$79,5 \pm 15$
C4	1120	$0,490 \pm 0,024$	$0,090 \pm 0,012$	$53,3 \pm 1,5$	110 ± 7
Odkształcenie logarytmiczne wstępniaków $\varepsilon = 0,76 \div 0,78$					

Zaprezentowane w tabelach od 6 do 13 wyniki poszczególnych właściwości mechanicznych badanych spieków przed i po kształtowaniu plastycznym przedstawiono w postaci punktów na przestrzennch wykresach w układzie współrzędnych W = $f(\Theta, \epsilon)$ i zamieszczono w Dodatku A na rys. D-11 ÷ D-15. Niebieskie linie na tych wykresach łączą porowatości początkowe i końcowe po odkształceniu plastycznym na zimno.

Wyniki przedstawione punktami na ścianie zerowego odkształcenia wykresów przestrzennych (rys. D-11 ÷ D-15, Dodatek A), pozwoliły wyznaczyć klasyczne zależności $W = f(\Theta)$, pokazane dalej na rys. 9 do 23.



Rys. 9. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,151\div0,183$) na tle wykresu zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m=725,8 (1-\Theta)^{4,52}$ [MPa].



Rys. 10. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,291 \div 0,322$) na tle wykresu zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m = 725,8 (1-\Theta)^{4,52} [MPa].$


Rys. 11. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m = 725,8 (1-\Theta)^{4,52} [MPa].$



Rys. 12. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60($\epsilon = 0,151 \div 0,183$) na tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}=473,5 (1-\Theta)^{3,68}[MPa].$



Rys. 13. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,291 \div 0,0,322$) na tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}=473,5 (1-\Theta)^{3,68}[MPa].$



Rys. 14. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}=473,5 (1-\Theta)^{3,68}$ [MPa].



Rys. 15. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC odkształconego na zimno spieku PNC- $60 \ (\epsilon = 0, 151 \div 0, 183)$ na tle wykresu zależności $KC(\Theta)$ opisanej równaniem: $KC = 53, 4 (1 - \Theta)^{5, 49} [J/cm^2].$



Rys. 16. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,291 \div 0,0,322$) na tle wykresu zależności KC(Θ) opisanej równaniem: $KC=53,4 (1-\Theta)^{5,49}[J/cm^2].$





Rys. 17. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu zależności KC(Θ) opisanej równaniem: $KC=53,4 (1-\Theta)^{5,49}[J/cm^2].$



Rys. 18. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na twardość Brinella odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,151\div0,183$) na tle wykresu zależności HB(Θ) opisanej równaniem: HB=152,6 (1- Θ)^{3,04}.







Rys. 20. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na twardość Brinella odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0.484 \div 0.505$) na tle wykresu zależności HB(Θ) opisanej równaniem: HB=152,6 (1- Θ)^{3,04}.



Rys. 21. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,151\div0,183$) na tle wykresu zależności $A_5(\Theta)$ opisanej równaniem: $A_5=20,0 (1-\Theta)^{7,70}[\%].$



Rys. 22. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,291 \div 0,0,322$) na tle wykresu zależności $A_5(\Theta)$ opisanej równaniem: $A_5=20,0 (1-\Theta)^{7,70}[\%].$



Rys. 23. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu zależności $A_5(\Theta)$ opisanej równaniem: $A_5=20,0 (1-\Theta)^{7,70}[\%].$

Na wykresach z rys. $9 \div 23$, na tle zależności $W = f(\Theta)$ umieszczone zostały punkty pokazujące wpływ odkształcenia plastycznego na zimno oraz obróbki cieplnej przez wyżarzanie lub ponowne spiekanie odkształconych spieków na poszczególne właściwości.

Efekt wyżarzania odkształconych plastycznie na zimno spieków obrazują rys. 24 ÷ 28. Czerwone przerywane linie naniesione na tych wykresach przedstawiają wartość danej właściwości dla spieku o tej samej porowatości, lecz osiągniętej na drodze jednokrotnego spiekania "zielonej" wypraski, czyli dla próbek K0. Pozwala to określić łączny wpływ obróbki plastycznej o różnym stopniu zastosowanego odkształcenia oraz zróżnicowanej temperatury wyżarzania lub ponownego spiekania na właściwości badanego spieku. Jak już wcześniej wspomniano, ponowne spiekanie wpływa na obniżenie porowatości.

Na rys. 24 przedstawiono wykres pokazujący wpływ obróbki plastycznej oraz połączony wpływ kształtowania na zimno z następującą po nim obróbki cieplnej na granicę wytrzymałości na rozciąganie.

Wytrzymałość na rozciąganie materiału poddanego obróbce plastycznej na zimno przy odkształceniu zastępczym osnowy spieku \in : 0,15 ÷ 0,18 i 0,29 ÷ 0,32 (próbki A0 i B0) rośnie i jest wyższa niż dla spieku o tej samej porowatości, ale uzyskanej na drodze prasowania i jednokrotnego spiekania (próbki K0). Spieki, dla których \in = 0,48 ÷ 0,51 (próbki C0) posiadają wytrzymałość niższą od spieków, które nie były odkształcane.



Rys. 24. Wytrzymałość na rozciąganie spieku PNC-60. Porowatość $\Theta_l = 0,11 \div 0,13$ (dla $\tau = 1120 [^{\circ}C]: \Theta_l' = 0,082 \div 0,098$).

Wyżarzanie odkształconych spieków powoduje obniżenie wytrzymałości, która dla każdej temperatury, prócz temperatury odpowiadającej ponownemu spiekaniu (próbki A4, B4, C4), ma wartość niższą od spieków nieodkształcanych – K0. Spieki dwukrotnie spiekane osiągają wytrzymałość o zbliżonej wartości, zawsze wyższej od próbek K0, przy czym nie zauważono tutaj istotnego wpływu wielkości zastosowanego odkształcenia. Spiekane wstępniaki poddane największemu odkształceniu niezależnie od temperatury wyżarzania mają niższą wytrzymałość od pozostałych materiałów.

Rys. 25 prezentuje połączony wpływ kształtowania na zimno i obróbki cieplnej na umowną granicę plastyczności. Odkształcenie na zimno każdego rodzaju spieków powoduje wzrost umownej granicy plastyczności, która jest wyższa niż dla spieków K0. Najwyższy wzrost zanotowano dla spieków B0, a najmniejszy, podobnie jak to miało miejsce w przypadku granicy wytrzymałości na rozciąganie, dla materiału C0.



Rys. 25. Umowna granica plastyczności spieku PNC-60. Porowatość $\Theta_1 = 0,11 \div 0,13$ (dla t = 1120 [°C]: Θ_1 ' = 0,82 ÷ 0,098).

Wyżarzanie spieku A0 wykazuje pewną charakterystyczną prawidłowość. Wysokie wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności osiągnięte w wyniku wzmocnienia odkształceniowego i zmniejszenia porowatości podczas kształtowania plastycznego na zimno, ulegają wyraźnemu obniżeniu podczas wyżarzania w temperaturze 650 [°C]. Podnoszenie temperatury wyżarzania przynosi niewielki, ale ciągły i stopniowy wzrost granicy plastyczności, który zachodzi aż do temperatury ponownego spiekania, przy czym zabieg spiekania wpływa dodatkowo na obniżenie porowatości. Podobną cechę wykazuje obróbka cieplna materiału B0, przy czym granica wytrzymałości wykazuje identyczną tendencję wzrostu od temperaturze 750 [°C] i rośnie dopiero po podniesieniu temperatury do 850 [°C] oraz 1120 [°C].



Rys. 26. *Udarność spieku PNC-60. Porowatość* $\Theta_{l} = 0,11 \div 0,13$ (*dla* $t = 1120 [^{\circ}C]$: $\Theta_{l} = 0,82 \div 0,098$).

Diagram na rys. 26 prezentuje połączony wpływ obróbki plastycznej i obróbki cieplnej na udarność badanych spieków. Po obróbce plastycznej na zimno jest ona bardzo niska, najniższa dla próbek C0, o największym stopniu odkształcenia. Po obróbce cieplnej wyniki udarności próbek typu A i C wykazują wzrost, przy czym próbki A1 osiągają wartość przewyższającą udarność próbek nieodkształconych (K0) i mimo zwiększania temperatury wyżarzania (próbki A2 i A3) utrzymuje się ona na zbliżonym poziomie.

Inaczej wpływa obróbka cieplna na próbki C, których udarność zwiększa się stopniowo wraz ze wzrostem temperatury wyżarzania osiągając wartość przewyższającą udarność próbek K0 dopiero w temperaturze 850 [°C] – próbki C3.

Wpływ zwiększania temperatury wyżarzania na spieki B jest odmienny. Wartość wyższą od udarności próbek nie poddawanych obróbce plastycznej i cieplnej osiągają spieki w temperaturze 750 [°C] – próbki B2, natomiast w temperaturze 850 [°C] zanotowano obniżenie udarności, która jednak w dalszym ciągu jest wyższa niż dla spieków K0.

Niezależnie od stopnia odkształcenia udarność spieków po ponownym spiekaniu (próbki A4, B4 i C4), jest prawie dwukrotnie wyższa niż dla spieków nieodkształconych – K0, przy czym spieki te mają niższą porowatość.

Podobnie do udarności przedstawiają się wyniki badań względnego wydłużenia procentowego materiałów spiekanych poddanych obróbce plastycznej i obróbce cieplnej zaprezentowane na diagramie z rys. 27.



Rys. 27. *Względne wydłużenia procentowe spieku PNC-60. Porowatość* $\Theta_1 = 0,11 \div 0,13$ (*dla* $t = 1120 [^{\circ}C]$: $\Theta_1' = 0,82 \div 0,098$).



Rys. 28. *Twardość Brinella spieku PNC-60. Porowatość* $\Theta_{l} = 0,11 \div 0,13$ (*dla* $t = 1120 [^{\circ}C]$: $\Theta_{l} = 0,82 \div 0,098$).

Na rys. 28 przedstawiono wyniki pomiarów twardości Brinella. Stwierdzono wzrost twardości Brinella po odkształceniu na zimno do wartości przewyższającej twardość spieków K0, przy czym wzrost ten jest najmniejszy dla spieków poddanych największemu odkształceniu (C0). Obróbka cieplna w temperaturze 650, 750 i 850 [°C] powoduje obniżenie twardości, do poziomu niższego niż dla spieków K0. Dopiero ponowne spiekanie w 1120[°C] podwyższa twardość, lecz spiek ten ma niższą porowatość od spieków wyżarzanych w niższej temperaturze.

Badania metalograficzne - analiza mikrostruktury. Mikrostruktury spieków przeznaczonych do obróbki plastycznej (K1, K2, K3), o porowatości odpowiednio: 0,198, 0,224 i 0,315 charakteryzują się zróżnicowanym kształtem i wielkością porów (rys. 29a, 30a i 31a).

Spiekane wstępniaki poddane obróbce plastycznej na zimno wykazują charakterystyczną dla procesu kształtowania na zimno zmianę kształtu zarówno porów jak i cząstek proszku. Zachodzące zmiany są tym większe, im wyższa jest wartość zastosowanego odkształcenia. Pustki są zamykane a ich kształt jest wyraźnie wydłużony w kierunku największego odkształcenia. Podobnie, ziarna osnowy spieku mają kształt wydłużony, a duże wartości odkształcenia powodują, że część z nich ulega rozdrobnieniu. Najbardziej widoczne jest to na strukturze spieku odkształconego do $\in = 0,486$, co odpowiada wartości odkształcenia rzeczywistego $\varepsilon = 0,756$ (rys. 29b, 30b i 31b).

Wyżarzanie kształtowanych na zimno spieków w temperaturze 650 [°C] (spieki A1, B1, C1) doprowadziło do charakterystycznej dla procesu rekrystalizacji przebudowy mikrostruktury. W osnowie wyżarzonego spieku nie są już widoczne ziarna o kształcie wydłużonym, pojawiły się natomiast ziarna o mniejszych rozmiarach i kształcie zbliżonym do regularnego (rys. 29c, 30c i 31c). Potwierdziła to również przeprowadzona analiza ilościowa mikrostruktury przedstawiona w dalszej części pracy. W obszarach materiału, które pozbawione są pustek ziarna mają większy rozmiar, natomiast w okolicy występowania porów ziarna są małe, co świadczy o hamującym wpływie obecności porów na normalny wzrost ziaren. Część pustek zachowała jeszcze formę wydłużoną, co wskazuje na to, że ta temperatura wyżarzania była zbyt niska do tego, by zaszły zjawiska charakterystyczne dla procesów spiekania i zgrzania zamkniętych podczas odkształcenia plastycznego porów.

Podniesienie temperatury wyżarzania do 750 [°C] spowodowało naturalny wzrost wielkości ziaren osnowy spieku (materiał A2, B2, i C2). Zdjęcia mikrostruktur spieków A2 i B2 o odkształceniu $\varepsilon = 0,233$ i $\varepsilon = 0,416$ wykazują w osnowie obecność ziaren o podobnej wielkości i równomiernym kształcie bez śladów odkształcenia (rys. 29d, 30d i 31d). Spiek o największym odkształceniu, C2 ($\varepsilon = 0,782$, rys. 31d) charakteryzuje się obecnością zarówno ziaren o mniejszej wielkości jak też ziaren o dużych rozmiarach

wskazujących na zachodzące w tej temperaturze zjawisko selektywnego wzrostu ziaren, charakterystyczne dla rekrystalizacji wtórnej. Przyczyną zachodzenia w materiałach litych rekrystalizacji wtórnej może być częściowe lub całkowite zahamowanie wzrostu ziarn podczas rekrystalizacji pierwotnej spowodowane między innymi obecnością faz na granicach [3, 14]. W osnowie spieku taką oczywistą przeszkodę, stojącą na drodze naturalnego wzrostu ziarn, stanowią pory.

Podwyższenie temperatury wyżarzania do 850 [°C] przyniosło dalszy naturalny wzrost wymiarów ziaren osnowy spieku – próbki A3, B3, C3. W osnowie spieków zauważalne są duże ziarna o wklęsłych granicach, które pochłaniają mniejsze już zrekrystalizowane ziarna (rys. 29e, 30e i 31e). Na fotografii mikrostruktury spieku C3, odkształconego do wartości $\epsilon = 0,505$ ($\epsilon = 0,782$), widoczne są charakterystyczne obszary z dużymi ziarnami otoczonymi cząstkami o mniejszym rozmiarze, których rozrost został zahamowany przez występujące na granicach pory (rys. 31e). O ile niewielka ilość porów widocznych na mikrofotografiach spieków wyżarzanych w temperaturze 750 [°C] ma kształt wydłużony, szczególnie w przypadku spieków C2, w mniejszym stopniu spieku B2, to jednak na tej podstawie nie można wnioskować o kierunku największego odkształcenia.

Ponowne spiekanie odkształconych plastycznie kształtek w temperaturze 1120[°C] spowodowało przebudowę mikrostruktury charakterystyczną dla procesów spiekania wysokotemperaturowego (próbki A4, B4, C4). Pory w dwukrotnie spiekanym materiale, niezależnie od wielkości zastosowanego odkształcenia, mają kształt zbliżony do sferoidalnego. Część porów o mniejszym wymiarze uległa zanikowi a pozostałe podległy procesowi koalescencji, w wyniku którego małe pustki ulegają zespoleniu a powstają pory o rozmiarze większym, przewyższającym często rozmiar największych porów przed spiekaniem. Ziarna, widoczne na fotografiach mikrostruktury materiału dwukrotnie spiekanego, mają większe wymiary w porównaniu z materiałem, który został poddany wyżarzaniu w niższych temperaturach (rys. 29f, 30f, 31f).





Rys. 29. Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu ($\epsilon = 0,170 \div 0,179$) poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej.



Rys. 30.*Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu* ($\epsilon = 0,291 \div 0,317$) poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej.



Rys. 31.Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu ($\epsilon = 0,486 \div 0,506$) poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej.

Badania fraktograficzne. Badania fraktograficzne przeprowadzone zostały na przełomach uzyskanych w próbach udarności na próbkach bez karbów. Wybrane fotografie powierzchni przełomów przedstawiono na rys. $32 \div 34$.





Materiał przed odkształceniem $\Theta_0 = 0,198$

c) Próbka A1



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,127, \in = 0,179, \epsilon = 0,246; t = 650 [^{\circ}C]$

e) Próbka A3



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,127, \in = 0,175, \epsilon = 0,241; t = 850 [^{\circ}C]$

b) Próbka A0



Materiał po odkształceniu $\Theta_1 = 0,127, \in = 0,177, \epsilon = 0,243$ d) Próbka A2



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,127, \in = 0,170, \epsilon_n = 0,233; t = 750 [^{\circ}C]$



Materiał po odkształceniu i ponownym spiekaniu Θ_1 ' = 0,095, \in = 0,170, ϵ = 0,228; t = 1120 [°C]



a) Próbka K2



Materiał przed odkształceniem $\Theta_0 = 0,234$

c) Próbka B1



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,125, \in = 0,307, \epsilon = 0,445; t = 650 [^{\circ}C]$ e) Próbka B3



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,113, \in = 0,305, \epsilon = 0,432; t = 850 [^{\circ}C]$

b) Próbka B0



Materiał po odkształceniu

 $\Theta_1 = 0,114, \in = 0,317, \epsilon = 0,446$ d) Próbka B2



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,123, \in = 0,291, \epsilon = 0,416; t = 750 [^{\circ}C]$ f) Próbka B4



Materiał po odkształceniu i ponownym spiekaniu Θ_1 ' = 0,092, \in = 0,295, ε = 0,423; t = 1120 [°C]

Rys. 33. Fotografie powierzchni przełomów przed i po odkształceniu ($\epsilon = 0,291 \div 0,317$) poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej.

54

a) Próbka K3



Materiał przed odkształceniem $\Theta_0 = 0.315$

c) Próbka C1



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,111, \in = 0,494, \epsilon = 0,758; t = 650 [^{\circ}C]$ e) Próbka C3





b) Próbka C0



Materiał po odkształceniu $\Theta_1 = 0,115, \in = 0,486, \epsilon = 0,756$ d) Próbka C2



Materiał po odkształceniu i wyżarzaniu $\Theta_1 = 0,111, \in = 0,505, \epsilon = 0,782; t = 750 [^{\circ}C]$



Materiał po odkształceniu i ponownym spiekaniu Θ_1 = 0,092, \in = 0,506, ε = 0,783; t = 1120 [°C]



55

Zmiany zachodzące w strukturze materiału wskutek odkształcenia plastycznego oraz następującej po nim obróbki cieplnej omówione zostały na przykładach, w których te zmiany są najbardziej charakterystyczne i widoczne ($\varepsilon = 0.76 \div 0.78$; $\varepsilon = 0.49 \div 0.51 - \text{próbki C}$).

Na rys. 35 przedstawiono fotografię powierzchni przełomu spieku o porowatości $\Theta_0 = 0,315$. Zdjęcie powierzchni przełomu ujawnia pęknięcia między widocznymi cząstkami proszku oraz w połączeniach między nimi. Ten sposób pękania jest charakterystyczny dla spieków o dużej porowatości, a trwałość połączeń między cząstkami proszku w przeważającym stopniu wpływa na ich wytrzymałość i plastyczność. Dla spieków o niskiej porowatości charakter pękania się zmienia i rozdział przechodzi najczęściej poprzez cząstki osnowy.

Na zdjęciu zaznaczono dwa charakterystyczne obszary; obszar A to przełom odpowiadający nielicznie występującemu przełomowi transkrystalicznemu, obszar B – pęknięcie po granicach cząstek proszku.



Rys. 35. Fotografia powierzchni przełomu spieku przeznaczonego do obróbki plastycznej – K3, $\Theta_0 = 0,315$.

Na rysunku 36 zamieszczono fotografię powierzchni przełomu próbki wykonanej z materiału po odkształceniu plastycznym na zimno – C0. Cząstki proszku mają wyraźnie wydłużony kształt w kierunku największego odkształcenia. Pory są ściśnięte i maja również kształt wydłużony. Potwierdza to zdjęcie struktury tego materiału (rys. 31b). Pomimo ściśnięcia porów nie doszło do ich trwałego zespolenia i materiał wykazuje małą spójność. Ponieważ przy wysokiej porowatości początkowej powstałe podczas spiekania wypraski połączenia między cząstkami w materiale miały małą powierzchnię, więc większość z nich została częściowo lub całkowicie zniszczona podczas odkształcenia. Stąd na obserwowanym przełomie dominujące jest kruche pękanie między powierzchniami poszczególnych cząstek proszku, z nielicznymi tylko strefami pękania przechodzącymi przez pojedyncze cząstki. Znalazło to potwierdzenie w wynikach właściwości mechanicznych (tabela 12 i 13): niskiej wartości udarności (KC = 2 [J/cm²]) i braku wydłużenia w statycznej próbie rozciągania. Na przedstawionym zdjęciu wyróżniono dwa obszary. Na powiększonym obszarze A wyraźnie widać charakterystyczny kształt cząstek proszku po odkształceniu plastycznym na zimno oraz naruszoną spójność między cząstkami. Obszar B to rzadko występująca w tym materiale, łupliwa powierzchnia zniszczenia przechodząca przez cząstkę proszku.



Rys. 36. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej. Próbka C0: $\Theta_l = 0,115$, $\epsilon = 0,486$, $\epsilon = 0,756$.

Rysunek 37 prezentuje zdjęcie powierzchni przełomu spieku C1, poddanego odkształceniu ($\in = 0,494$, $\varepsilon = 0,758$), a następnie wyżarzonego w temperaturze 650 [°C]. W dalszym ciągu przeważające jest pękanie po powierzchniach cząstek proszku Wyraźnym efektem rekrystalizacji jest pojawienie się obszarów o plastycznym charakterze pękania. W niektórych miejscach przełomu zaobserwować można ciągliwe odkształcenie nowo powstałych połączeń między cząstkami proszku – niewidocznych na przełomie niewyżarzonego materiału po obróbce plastycznej. Zmieniła się morfologia pustek. Część mniejszych porów uległa zespoleniu, natomiast te o większych wymiarach zachowały charakterystyczny, wydłużony kształt. Na fotografii powierzchni przełomu zaznaczono i pokazano w powiększeniu obszar A, w którym nastąpiło ciągliwe, plastyczne rozdzielenie połączenia między cząstkami proszku.



Rys. 37. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu w temp. 650 [°C]. Próbka C1: $\Theta_l = 0,111, \epsilon = 0,494, \epsilon = 0,758.$



Rys. 38. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu w temp. 750 [°C]. Próbka C2: $\Theta_l = 0,111, \epsilon = 0,505, \epsilon = 0,782.$

Fotografię powierzchni przełomu spieku C2 po odkształceniu ($\in = 0,505$, $\varepsilon = 0,782$) i wyżarzonego w temperaturze 750 [°C] pokazano na rys. 38. Fotografia ujawnia pojawiające się kolejne, nowe połączenia między cząstkami osnowy spieku (wyróżniony na fotografii obszar A). Przeważają dwa mechanizmy pękania: kruche pękanie po powierzchniach cząstek oraz mające najczęściej charakter ciągliwy rozdzielenie materiału w miejscach połączeń cząstek. Widoczne są również obszary pękania łupliwego transkrystalicznego.

Zauważalne, wraz ze zwiększaniem temperatury wyżarzania, zmiany zachodzące w mikrostrukturze oraz charakterze przełomu spieków uzasadniają wzrost właściwości plastycznych badanego materiału. Wpływ tych zmian na wytrzymałość jest złożony. Spadek wytrzymałości związany jest z procesami zachodzącymi podczas rekrystalizacji osnowy spieku, natomiast powstawanie nowych połączeń między cząstkami i zwiększanie się ich powierzchni czynnej wpływa na podniesienie właściwości wytrzymałościowych.

Na rys. 39 umieszczono fotografię przełomu spieku po odkształceniu ($\in = 0,495$, $\epsilon=0,769$) poddanego następnie wyżarzaniu w 850 [°C] – próbka C3.



Rys. 39. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu w temp. 850 [°C]. Próbka C3. $\Theta_l = 0,113, \epsilon = 0,495, \epsilon = 0,769.$

Wyżarzanie w 850 [°C] spowodowało zwiększenie się ilości nowych połączeń między cząstkami proszku i występujących tam lokalnych obszarów ciągliwego pękania.. Materiał wykazuje większą spójność, co znajduje potwierdzenie w wyższych wynikach zarówno właściwości wytrzymałościowych jak plastycznych.

Zdjęcie przełomu udarnościowego (próbka C4) po powtórnym spiekaniu w temperaturze 1120 [°C], poprzedzonym odkształceniem plastycznym ($\in = 0,506, \varepsilon = 0,783$) zaprezentowano na rys. 40. Zauważalne jest zwiększenie udziału stref o kruchym charakterze

pękania, zarówno po granicach cząstek (obszary A) jak i transkrystalicznego w obszarze cząstek (np. obszar B). Widoczne są również liczne strefy ciągliwego rozdziału w szyjkach łączących sąsiednie cząstki proszku. Prócz małych sferoidalnych porów zauważalne są również duże pory o nieregularnym kształcie.



Rys. 40. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i powtórnym spiekaniu w temp. 1120 [°C]. Próbka C4: Θ_1 ' = 0,092, ϵ = 0,506, ϵ = 0,783.

Analiza ilościowa mikrostruktury. W tabeli 14 zestawiono średnie wartości powierzchni ziarna, średnie średnice cząstek oraz wartości współczynników wydłużenia oraz pofałdowania określone dla spieków poddanych kształtowaniu plastycznemu oraz poddanemu lub nie obróbce przez wyżarzanie. Wyniki nie obejmują spieków dwukrotnie spiekanych, których porowatość po drugim spiekaniu jest niższa od porowatości spieków wyżarzanych w niższej temperaturze. W dalszej części zamieszczono wykresy obrazujące wpływ temperatury wyżarzania na kształt i wielkość cząstek wcześniej odkształconego spieku.

Tabela 14.

Temperatura obróbki cieplnej t [°C]	Wyznaczony parametr	Rzeczywista wartość plastycznego odkształcenia na zimno spiekanego		
		wstępniaka, $\varepsilon = \left \ln \frac{h_1}{h_0} \right $		
		0,23÷0,25	0,42÷0,46	0,76÷0,78
Bez obróbki cieplnej	Powierzchnia ziarna $\overline{a}[\mu m^2]$	133	126	54
	Średnica ziarna $\overline{d} [\mu m]$	11,5	11,2	7,3
	Współczynnik wydłużenia $f_1^{(*)}$	1,58	1,71	1,76
	Współczynnik kolistości $f_2^{(**)}$	0,56	0,49	0,49
650	Powierzchnia ziarna $\overline{a}[\mu m^2]$	51	23	43
	Średnica ziarna $\overline{d} [\mu m]$	7,1	4,8	6,6
	Współczynnik wydłużenia $f_1^{(*)}$	1,39	1,30	1,52
	Współczynnik kolistości $f_2^{(**)}$	0,64	0,62	0,60
750	Powierzchnia ziarna $\overline{a}[\mu m^2]$	74	94	102
	Średnica ziarna $\overline{d} [\mu m]$	8,6	9,7	10,1
	Współczynnik wydłużenia $f_1^{(*)}$	1,39	1,30	1,52
	Współczynnik kolistości $f_2^{(**)}$	0,60	0,66	0,58
850	Powierzchnia ziarna $\overline{a}[\mu m^2]$	292	142	164
	Średnica ziarna $\overline{d} [\mu m]$	17,1	11,9	12,8
	Współczynnik wydłużenia $f_1^{(*)}$	1,32	1,33	1,42
	Współczynnik kolistości $f_2^{(**)}$	0,57	0,53	0,59
^(*) parametr $f_1 = \frac{a}{b}$; ^(**) parametr $f_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot F}{L^2}$				

Parametry struktury spieku po odkształceniu plastycznym i wyżarzaniu

Przeprowadzone obserwacje i analiza stereologiczna materiału badawczego wykazała wyraźny wpływ temperatury wyżarzania odkształconych wcześniej spiekanych wstępniaków na wielkość ziaren osnowy spieku. Wskutek odkształcenia plastycznego ziarna zostają rozdrobnione, przy czym najmniejszą średnią wielkość ziarna zanotowano dla materiału po największym stopniu przerobu (odkształcenie rzeczywiste $\varepsilon = 0,76 \div 0,78$, co odpowiada wartości parametru wzmocnienia $\epsilon = 0,49 \div 0,51$). Zastosowanie wyżarzania w temperaturze 650 [°C] spowodowało odbudowę struktury i rozdrobnienie ziarna osnowy spieku. Jak pokazuje to wykres na rys. 41 dalsze podnoszenie temperatury wyżarzania wpływa na stopniowe zwiększanie ziaren osnowy spieku.



Rys. 41. Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wielkość ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu na zimno.



Rys. 42. Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wartość współczynnika pofałdowania ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu na zimno.



Rys. 43. Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wartość współczynnika wydłużenia ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu na zimno.

Wyznaczony współczynnik wydłużenia ziarn osnowy spieku wykazuje korelację z wielkością odkształcenia, przy czym największą wartość parametr ten przyjmuje dla najwyższej wartości odkształcenia plastycznego (rys. 43). Po wyżarzeniu w temperaturze 650 [°C] współczynnik wydłużenia f_1 przyjmuje wartości odpowiadające kształtowi cząstek zbliżonemu do regularnego. Współczynnik kolistości f_2 (lub pofałdowania $\frac{1}{f_2}$) nie wykazuje współzależności z wielkością odkształcenia i temperaturą następującego po nim wyżarzania (rys. 42).

W Dodatku A zamieszczono graficzną interpretację rozkładu wielkości ziarna w osnowie spieku po różnym stopniu odkształcenia w zależności od temperatury wyżarzania. Na rys.D-17 zamieszczono histogramy dla odkształcenia zastępczego $\in = 0,15 \div 0,18$, na rys. D-18 dla $\in = 0,29 \div 0,32$, a na rys. D-19 dla $\in = 0,48 \div 0,51$.

5 Analiza wyników badań

Wpływ odkształcenia plastycznego na zimno na właściwości mechaniczne

Wytrzymałość na rozciąganie R_m materiału poddanego obróbce plastycznej na zimno przy odkształceniu zastępczym osnowy spieku $\in = 0,17$ i $\in = 0,30$ jest wyższa niż dla spieków o tej samej porowatości, ale uzyskanej na drodze prasowania i jednokrotnego spiekania, przy czym wzrostowi odkształcenia towarzyszy jednoczesny nieznaczny spadek wartości R_m. Spieki poddane najwyższemu z założonego planu badań odkształceniu na zimno w stopniu, który odpowiada odkształceniu zastępczemu osnowy $\in = 0,49$ posiadają wytrzymałość na rozciaganie niższa od spieków, które nie były odkształcane. Tłumacza to przedstawione obserwacje mikrostruktury i powierzchni przełomów tych spieków. Odkształcanie na zimno wstępniaków o wysokiej porowatości (Θ_0 powyżej 0,3) powodowało naruszenie spójności części połączeń między cząstkami spieku. Obecność dużej ilości porów wpłynęła na zmniejszenie pola powierzchni przekroju poddanego naprężeniom podczas kształtowania, a to z kolei przyspieszyło inicjację i propagację pęknięć w materiale. Dodatkowo na obniżenie zdolności do przenoszenia wysokich obciążeń wpłynął nieregularny kształt pustek, będąc naturalnym koncentratorem naprężeń w odkształcanym materiale. Te wszystkie uwarunkowania strukturalne materiału przed i po kształtowaniu zdecydowały, że mimo wzmocnienia odkształceniowego zachodzącego w osnowie spieku przy dużym stopniu odkształcenia ($\varepsilon = 0.76 \div 0.78$), powodującego zwiekszenie właściwości wytrzymałościowych, spieki te posiadają w efekcie niską wytrzymałość mechaniczną przy naprężeniach rozciągających. Porównanie wyników badań wykazało, że w przypadku zastosowania najwyższego stopnia odkształcenia granica wytrzymałości na rozciąganie jest niższa niż dla spieków nieodkształconych.

Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ oraz twardość HB, inaczej niż wytrzymałość na rozciąganie, wraz ze wzrostem odkształcenia $z \in \cong 0,17$ do $\in \cong 0,30$ również rosną, by przy odkształceniu o $\in \cong 0,50$ spaść do wartości najniższej, podobnie jak w przypadku wytrzymałości.

Właściwości plastyczne (względne wydłużenie procentowe A₅ oraz udarność KC), po odkształceniu plastycznym na zimno znacząco spadają, osiągając przy tym bardzo niskie wartości.

Graficzna prezentacja wpływu wielkości odkształcenia na poszczególne właściwości mechaniczne zaprezentowana jest na wykresach na rys. $44 \div 48$.



Rys. 44. Wytrzymałość na rozciąganie (*R_m*) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia)



Rys. 45. Umowna granica plastyczności ($R_{p0,2}$) PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia).



Rys. 46. Udarność (KC) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia).





Rys. 48. Twardość Brinella (HB2,5/306/15) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianami 3 stopnia).

Wykresy na rys. 44 ÷ 48 wykazują zdecydowany wpływ stopnia odkształcenia połączony z porowatością początkową przeznaczonych do obróbki spiekanych wstępniaków na właściwości mechaniczne spieku po kształtowaniu plastycznym na zimno. Obróbka plastyczna na zimno z dużym stopniem odkształcenia spieków o wysokiej porowatości powoduje, że podczas plastycznego płynięcia dochodzi do zniszczenia wytworzonych podczas spiekania połączeń między cząstkami proszku, które mają decydujący wpływ na właściwości mechaniczne, a głównie na wytrzymałość na obciążenia udarowe i właściwości plastyczne.

Powyższe uwagi potwierdza porównanie teoretycznych i osiąganych, rzeczywistych wartości umownej granicy plastyczności dla zastosowanych w badaniach wielkości odkształcenia zastępczego osnowy spieku. Prezentuje to wykres na rys. 49⁵.

⁵ Sposób obliczenia teoretycznych wartości umownej granicy plastyczności podano w Dodatku B (przykład 6)



Rys. 49. Teoretyczne i rzeczywiste wartości umownej granicy plastyczności dla spieku PNC-60 o porowatości końcowej $\Theta_l = 0,11 \div 0,13$.

Wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne odkształconych spieków

Właściwości wytrzymałościowe, również twardość, podczas wyżarzania kształtowanych na zimno spieków spada, przy czym wytrzymałość na rozciaganie i twardość poniżej wartości odnoszących się do spieków o podobnej porowatości osiąganej w procesie jednokrotnego prasowania i spiekania. Podnoszenie temperatury wyżarzania w różnym stopniu wpływa na wartość poszczególnych właściwości wytrzymałościowych i dopiero ponowne spiekanie przynosi znaczący ich wzrost, ale wiążący się z jednoczesnym obniżeniem porowatości. Na właściwości obrabianego cieplnie, odkształconego wstępnie porowatego spieku metalu mają połączony wpływ wszystkie zjawiska związane z temperaturą wyżarzania, a więc zjawiska: zdrowienia, rekrystalizacji i rozrostu ziaren osnowy spieku, powstawanie nowych połączeń między cząstkami oraz zmiana wielkości i kształtu pustek. Otrzymane wyniki badań oraz obserwacje mikrostruktury wskazują, że wpływ tych zjawisk jest zróżnicowany i w zależności od stopnia zmian, jakie zaszły w osnowie spieku oraz w całej objętości obrabianego materiału, a także od zastosowanej temperatury, może wpływać zarówno na podwyższanie jak i obniżanie właściwości mechanicznych spieku.

Funkcje obiektu badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań właściwości mechanicznych wyznaczono funkcje obiektu badań typu $\{w_w, w_p\} = f_i(\in,t)$, w postaci wielomianowej. Odpowiednie funkcje, ich wykresy powierzchniowe i warstwicowe pokazano na rys. $50 \div 54$.



$$\begin{split} R_m = & 714.269 - 2723.53\epsilon + 5188.21\epsilon^2 - 0.963686t + 7.08841\epsilon t - 13.7854\epsilon^2 t \\ &+ 0.000638716\tau^2 - 0.00408429\epsilon t^2 + 0.00807359\epsilon^2 t^2 [MPa] \end{split}$$

Rys. 50. Funkcja $f_i(\epsilon,t)$ dla wytrzymałości na rozciąganie spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją.



$$\begin{split} R_{p0,2} = &-361.181 + 4220.04\epsilon - 3104.01\epsilon^2 + 1.25715t - 7.80423\epsilon t + 4.14314\epsilon^2 t \\ &-0.000600173t^2 + 0.00377641\epsilon t^2 - 0.00153567\epsilon^2 t^2 [MPa] \end{split}$$

Rys. 51. Funkcja $f_i (\epsilon, t)$ dla umownej granicy plastyczności spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją.



$$\begin{split} \text{KC} &= 774.479 - 4661.94\epsilon + 6234.23\epsilon^2 - 1.74328t + 10.5412\epsilon t - 14.1608\epsilon^2 t \\ &+ 0.000997561t^2 - 0.00582477\epsilon t^2 + 0.00787173\epsilon^2 t^2 [J/cm^2] \end{split}$$

Rys. 52. Funkcja $f_i(\epsilon,t)$ dla udarności spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją..



 $\begin{array}{l} A_5 = 190.561 - 1286.5\epsilon + 1747.07\epsilon^2 - 0.435302t + 3.00963\epsilon t - 4.13627\epsilon^2 t \\ + 0.000244255t^2 - 0.00166097\epsilon t^2 + 0.00230737\epsilon^2 t^2 [\%] \end{array}$

Rys. 53. Funkcja $f_i (\in, t)$ dla względnego wydłużenia procentowego spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją.




$$\begin{split} HB &= -\ 231.531\ +\ 2881.95\epsilon\ -\ 4299.29\epsilon^2\ +\ 0.627826t\ -\ 6.093\epsilon t\ +\ 8.92896\epsilon^2 t\\ &-\ 0.000291549t^2\ +\ 0.00315468\epsilon t^2\ -\ 0.00455759\epsilon^2 t^2 \end{split}$$

Rys. 54. Funkcja $f_i(\epsilon,t)$ dla twardości Brinella spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją.

6 Wnioski

Sformułowano następujące wnioski.

- Wykonane badania pozwoliły na ilościową ocenę zmian właściwości mechanicznych materiału spiekanego w funkcji czynników badanych (tj. odkształcenia zastępczego osnowy i temperatury obróbki cieplnej) oraz porównanie ze sobą odpowiednich właściwości: spieku nieodkształconego i spieku odkształconego plastycznie, a także spieku poddanego odkształceniom plastycznym i wyżarzaniu lub ponownemu spiekaniu przy tej samej porowatości.
- Poczynione obserwacje mikrostruktury materiału oraz otrzymane wyniki badań potwierdziły silny wpływ wartości zastosowanego odkształcenia plastycznego na zimno oraz początkowej porowatości przeznaczonych do kształtowania spiekanych wstępniaków na ich strukturę i właściwości mechaniczne.
- Wzmocnieniu odkształceniowemu osnowy spieku towarzyszy obniżenie spójności na granicach spiekanych cząstek proszku, przez co naprężenie uplastyczniające osnowy przy rozciąganiu jest niższe, niż obliczone z krzywej wzmocnienia dla aktualnej wartości odkształcenia zastępczego.
- W czasie obróbki cieplnej odkształconego uprzednio porowatego spieku metalu zachodzą jednocześnie i w różnym stopniu procesy zdrowienia, rekrystalizacji, rozrostu ziaren i tworzenia nowych połączeń pomiędzy cząstkami proszku, co w efekcie może spowodować zarówno podwyższenie jak i obniżenie właściwości wytrzymałościowych spieku.
- Uzyskane wyniki potwierdziły sformułowaną tezę pracy. Zastosowanie po odkształceniach plastycznych na zimno obróbki cieplnej powoduje, że otrzymujemy spiek charakteryzujący się podwyższonymi właściwościami plastycznymi, przy czym jego właściwości wytrzymałościowe kształtują się na zbliżonym lub wyższym poziomie w porównaniu ze spiekami nieodkształconymi o tej samej porowatości.
- Należy zwrócić uwagę na wysokie wartości udarności spieków odkształconych i obrabianych cieplnie. Wynosiły one odpowiednio: 30 [J/cm²] (wyżarzanie poniżej temperatury spiekania, $\Theta_1 = 0,110$) oraz ponad 50 [J/cm²] (ponowne spiekanie, Θ_1 ' = 0,090).
- Otrzymane na podstawie przeprowadzonych badań funkcje obiektu w postaci: $\{w_w, w_p\} = f_i \ (t, \epsilon), \text{ gdzie: } w_w = \{R_m, R_{p0,2}, HB\} \ i \ w_p = \{A_5, KC\}, \text{ pozwalają na}$ przewidywanie łącznego wpływu odkształcenia zastępczego osnowy i temperatury obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne spieku.



DODATEK A

W Dodatku przedstawiono wybrane krzywe rozciągania, krzywe wzmocnienia osnowy spieków po zróżnicowanej obróbce plastycznej i cieplnej oraz graficzną interpretację otrzymanych wyników badań właściwości mechanicznych oraz badań ilościowych mikrostruktury spieków z materiału PNC-60. Dodatkowe wyjaśnienia dotyczące sposobu wyznaczania krzywych wzmocnienia osnowy zamieszczono w Dodatku B.



Rys. D-1. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 o różnej porowatości Θ_0 *w układzie współrzędnych: naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne);* $\sigma = f(\varepsilon)$.

75





Rys. D-2. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych: naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne); $\sigma = f(\varepsilon)$.



Rys. D-3. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno $(0,159 \le \epsilon \le 0,180)$, poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w układzie współrzędnych naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne); $\sigma = f(\epsilon)$.



Rys. D-4. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno $(0,302 \le \epsilon \le 0,316)$, poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w układzie współrzędnych naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne); $\sigma = f(\epsilon)$.



Rys. D-5. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno $(0,486 \le \epsilon \le 0,501)$, poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w układzie współrzędnych naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne); $\sigma = f(\epsilon)$.



Rys. D-6. Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno i ponownym spiekaniu w temp. 1120 [°C] w układzie współrzędnych: naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste (logarytmiczne); \sigma = f(\varepsilon).



Rys. D-7. Wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spieków PNC-60 (0,159 $\leq \epsilon \leq 0,180$ *), poddanych po odkształceniu plastycznym na zimno zróżnicowanej obróbce cieplnej, aproksymowane funkcjami potęgowymi.*



Rys. D-8. Wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spieków PNC-60 (0,302 $\leq \epsilon \leq 0,316$ *), poddanych po odkształceniu plastycznym na zimno zróżnicowanej obróbce cieplnej, aproksymowane funkcjami potęgowymi.*



Rys. D-9. Wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spieków PNC-60 (0,486 $\leq \epsilon \leq 0,501$ *), poddanych po odkształceniu plastycznym na zimno zróżnicowanej obróbce cieplnej, aproksymowane funkcjami potęgowymi.*



Rys. D-10. Wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno i ponownym spiekaniu w temp. 1120 [°C] aproksymowane funkcjami potęgowymi.



Rys. D-11. Wytrzymałość na rozciąganie R_m spieków PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych $\Theta \in$.



Rys. D-12. Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ spieków PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych $\Theta \in$.



Rys. D-13. Udarność KC spieków PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych Θ - ϵ .



Rys. D-14. Twardość Brinella HB 2,5/306/15 spieków PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych $\Theta \in$.



Rys. D-15. Względne wydłużenie procentowe A_5 spieków *PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych* $\Theta \in$.



Rys. D-16. Liczebność poszczególnych klas wielkości ziarna dla spieku PNC-60 - materiał odkształcony $\epsilon = 0,15 \div 0,18$; *a) bez obróbki cieplnej; b) obróbka w 650* [°*C*]; *c) obróbka w 750* [°*C*]; *d) obróbka w 850* [°*C*].



88





ВРК **BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ**



Rys. D-18. Liczebność poszczególnych klas wielkości ziarna dla spieku PNC-60 - materiał odkształcony \in =0,48 ÷ 0,51; a) bez obróbki cieplnej; b) obróbka w 650 [°C]; c) obróbka w 750 [°C]; d) obróbka w 850 [°C].



DODATEK B

1. Podstawowe definicje i równania

Definiowana					
lub obliczana	Wzór, równanie, oznaczenia, uwagi				
wielkość					
Gęstość	$\Delta M = V_{p} \Delta M = V_{p}$	(D1)			
i porowatość	$\rho = \lim_{\Delta V} \Theta = \lim_{\Delta V} \rho = \rho_L(1-\Theta) \rho = \frac{1}{\rho_L} = 1-\Theta$ $\Delta V \rightarrow \delta V \Delta V \rightarrow \delta V$				
	ρ – gestość, Θ – porowatość, ρ^* - gestość względna, ρ_L –				
	gęstość litego materiału (osnowy spieku), ΔM - masa				
	zawarta w objetości ΔV , ΣV_p - suma objetości pustek				
	w objętości ΔV , δV - elementarna objętość utożsamiana				
	z cząstką ośrodka ciągłego				
Gęstość osnowy	$\rho_{\rm L} = \sum p_{\rm i} \rho_{\rm i}$	(D2)			
spieku	i				
	p_i , ρ_i - udziały (masowe) i gęstości poszczególnych				
	składników stopowych osnowy				
Wartości średnie	$\rho_{\star} = \frac{M}{M}$ $\rho_{\star}^* = \frac{\rho_{sr}}{M}$ $\Theta_{\star} = 1 - \rho_{\star}^*$	(D3)			
gęstości	$ \begin{array}{ccc} \rho_{\text{sr}} & -\overline{V} & \rho_{\text{sr}} & -\overline{\rho_L} \\ \end{array} \end{array} \qquad \qquad$				
i porowatości	M i V - masa i objętość spieku				
Równanie ciągłości $1 \text{ dV} = 1 \text{ dP} = 1 \text{ d\Theta}$					
	$C_{kk} = V_{i,i} = \frac{1}{V} \frac{1}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{dt} = \frac{1}{1-\Theta} \frac{1}{dt}$				
	e _{kk} - pierwszy niezmiennik tensora prędkości odkształcenia				
	e _{ij} , v _i - wektor prędkości płynięcia				
Gęstość	$\rho = \rho_0 e^{-\varepsilon_{kk}}$ $\Theta = 1 - (1 - \Theta_0) e^{-\varepsilon_{kk}}$	(D5)			
i porowatość	ρ_0 i Θ_0 – gestość i porowatość poczatkowa (dla $\varepsilon_{ii} = 0$). ε_{kk} -				
jednorodnego spieku	pierwszy niezmiennik tensora odkształceń (w mierze				
poddanego	Hencky'ego)				
plastycznemu					
Warunek	$f = f(\mathbf{I}' - \mathbf{I} - \mathbf{Q} - \mathbf{Q}) - 2\mathbf{I}' + \mathbf{Q}\mathbf{I}^2 - \mathbf{R}\mathbf{T}^2(\mathbf{q}) = 0$	(D6)			
plastyczności (typu	$1 = 1(J_2, J_1, \Theta, \epsilon) = 3J_2 + \omega J_1 - \rho O_p(\epsilon) = 0$	(20)			
Greena)	J_2 - drugi niezmiennik dewiatora naprężeń S_{ij} , J_1 - pierwszy				
niezmiennik tensora naprężen σ_{ij} , $\alpha = \alpha(\Theta)$, $\beta = \beta(\Theta)$ $\sigma_p(\epsilon)$ (krzywa wzmocnienia materiału osnowy) - funkcje materiałowa wyznaczana doświadagalnia ϵ paramet					
					matchatowe wyznaczane uoswiauczanie, \in - parametri wzmocnienia (odkształcenie zastencze) osnowy spieku
Niezmienniki		(D7)			
$J_2' i J_1 i składowe \qquad J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \qquad J_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij} = \sigma_{kk} \qquad S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{2} J_1 \delta_{ij}$					
dewiatora naprężeń δ_{ij} – symbol Kroneckera					

Definicje i równania zestawione w tab. D.1 zaczerpnięto z prac [45,66].

Tabela D.1



Definicia	$dW = \sigma_{ed} d\varepsilon_{e} = (1 - \Theta)\sigma_{e} (\epsilon) d\epsilon$	(D8)	
odkształcenia	$ uw - v_{ij}uz_{ij} - (1 - \Theta)v_p \in Ju \in $		
zastenczego	$\epsilon = \int d\epsilon$		
(narametru	Czynnik 1 - Θ wyraża fakt, że praca właściwa odkształceń		
wzmocnienia	plastycznych (W) dyssypuje się w objętości materiału		
osnowy)	osnowy (nie powstają nowe pustki).		
Stowarzyszone	df ((D10)	
prawo płynięcia	$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\delta T}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda (3S_{ij} + 2\alpha J_1 \delta_{ij})$	(D10) (D11)	
	$\sigma_{ij} = \frac{2\beta\sigma_{p}(\epsilon)}{3d \in (1 - \Theta)} \left(d\epsilon_{ij} + \frac{1 - 2\alpha}{6\alpha} d\epsilon_{kk} \delta_{ij} \right)$		
	dλ – dodatni mnożnik		
Odkształcenie zastępcze (parametr	$d \in = \frac{2\sqrt{\beta}}{\sqrt{2}} \sqrt{d\epsilon_{int}^2 + \frac{(d\epsilon_{kk})^2}{12}}$	(D12)	
wzmocnienia	$\sqrt{3}(1-\Theta)$ V 12 α		
osnowy)	$d\epsilon_{int}$ - drugi niezmiennik dewiatora przyrostu odkształcenia		
	$d\overline{\epsilon}_{ij}$		
Drugi niezmiennik		(D13)	
dewiatora przyrostu	$d\varepsilon_{\rm int} = \sqrt{\frac{1}{2}} d\overline{\varepsilon}_{ij} d\overline{\varepsilon}_{ij} \qquad d\overline{\varepsilon}_{ij} = d\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} d\varepsilon_{kk} \delta_{ij}$		
odkształcenia	12 5		
i jego			
składowe			
Charakterystyka	$\sigma \neq 0$ $\sigma = \sigma_{\infty} = 0$ $L = \sigma$ $L = \frac{1}{\sigma^2}$	(D14)	
stanu naprężenia	$\sigma_{zz} + \sigma_{rr} + \sigma_{00} + \sigma_{rr} + \sigma_{00} + \sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma$		
1 oukształcenia w jednoosjowych	$d\varepsilon_{zz} \neq 0$, $d\varepsilon_{xx} = d\varepsilon_{yy} \neq 0$, $d\varepsilon_{kk} = d\varepsilon_{zz} + 2d\varepsilon_{xx}$,		
i jednorodnych	$d\epsilon_{m} - d\epsilon_{m}$		
stanach napreżenia	$d\varepsilon_{int} = \frac{ u \varepsilon_{xx} - u \varepsilon_{zz} }{\sqrt{2}}$		
(rozciaganie lub	$\sqrt{2}$		
ściskanie	$\mathbf{v}^* = -\frac{\mathrm{d}\varepsilon_{xx}}{\mathrm{d}\varepsilon_{xx}} = \frac{1-2\alpha}{\mathrm{d}\varepsilon_{xx}}$		
w kierunku z)	$d\varepsilon_{zz} = 2(1+\alpha)$	(D15)	
	v* - współczynnik odkształcenia poprzecznego (Poissona)		
	$\sigma_{zz} = \pm \sqrt{\frac{\beta}{1+\alpha}} \sigma_{p} (\epsilon)$		
	znak "+" – przy rozciąganiu, "-" – przy ściskaniu	(D16)	
Parametr	$\left \Theta \right _{\Omega(1-1)}$	(D17)	
wzmocnienia	$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{\beta(1+\alpha)}} d\Theta$		
osnowy przy	$3 \left \frac{J}{\Theta_0} \alpha (1 - \Theta)^2 \right $		
jednoosiowym			
ściskaniu lub			
rozciąganiu			
Przyrosty	da da dl $1-2\alpha$	(D18)	
odkształceń	$d\varepsilon_{xx} = d\varepsilon_{yy} = \frac{1}{a} = \frac{1}{b} = -\frac{1}{6\alpha(1-\Theta)}d\Theta$		
przy jednoosiowym	$dh 1+\alpha$		
ściskaniu lub	$d\varepsilon_{zz} = \frac{du}{h} = \frac{1+d}{3\alpha(1-\Theta)}d\Theta$	(D19)	
rozciąganiu	11 JU(1-U)		

Wymiary końcowe ściskanej lub rozciąganej kształtki	$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{l_0} = \exp\left[-\int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{1-2\alpha}{6\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right]$	(D20)
	$\frac{h}{h_0} = \exp\left[\int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{1+\alpha}{3\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right]$ a, l, h – szerokość, długość i wysokość kształtki, indeks "0" oznacza wartości początkowe	(D21)
Charakterystyka	$\sigma_{zz} < 0, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} < 0, J_1 = \sigma_{zz} + 2\sigma_{xx},$	
stanu naprężenia i odkształcenia	$I' = \frac{1}{2} (\sigma - \sigma)^2$	
podczas prasowania	$3^{2} - 3^{(0)} = 3^{(0)$	(D22)
w zamkniętej	$d\varepsilon_{zz} < 0$, $d\varepsilon_{zz} = d\varepsilon_{zz} = 0$, $d\varepsilon_{tk} = d\varepsilon_{zz}$, $d\varepsilon_{int} = -\frac{d\varepsilon_{zz}}{c}$	
matrycy (stan	χ^2	
jednorodny, bez	$y_{f} = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} = \frac{\sigma_{yy}}{1 - 2\alpha}$	
z – kierunek	$\overset{\Psi}{=} \sigma_{zz} \sigma_{zz} 1+4\alpha$	(D23)
prasowania	ψ - współczynnik nacisku bocznego	
	$\sqrt{\beta(1+4\alpha)}\sigma_{\rm p}(\in)$	
	$\sigma_{zz} \equiv -\frac{3\sqrt{\alpha}}{3\sqrt{\alpha}}$	(D24)
Bieżąca wysokość	$1 - \Theta_0$	(D25)
prasowanej kształtki	$h = h_0 \frac{1}{1 - \Theta}$	
Parametr	$1 \left \frac{\Theta}{c} \sqrt{\beta(1+4\alpha)} \right $	(D26)
wzmocnienia	$\epsilon = \frac{1}{3} \int \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{\alpha} (1 - \Theta)^2} d\Theta$	
osnowy przy	$ \Theta_0 \vee \cdots \vee \nabla \rangle$	
y zamknietej		
w Zanikinętej matrycy (stan		
iednorodny bez		
tarcia)		

Charakterystyka	
stanu naprężenia $\sigma_{xx} = 0, \sigma_{yy} < 0, \sigma_{zz} < 0, J_2 = \frac{1}{3} (\sigma_{yy}^2 - \sigma_{yy} \sigma_{zz} + \sigma_{zz}^2)$	
i odkształcenia $d\varepsilon_{xx} > 0$, $d\varepsilon_{yy} = 0$, $d\varepsilon_{zz} < 0$, $d\varepsilon_{kk} = d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{zz}$,	
podczas prasowania $1 \sqrt{1 + 2}$ in $1 \sqrt{1 + 2}$	$(\mathbf{D}27)$
$d\varepsilon_{int} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{d\varepsilon_{xx}^2 - d\varepsilon_{xx}} d\varepsilon_{zz} + d\varepsilon_{zz}^2$	(D27)
odkształcenia. (stan jednorodny, bez $d\epsilon_{xx} = -\frac{1-2\alpha}{6\alpha} d_{kk}$	
tarcia), płaszczyzna $1+4\alpha$	(D28)
$d\varepsilon_{zz} = \frac{1}{6\alpha} d\varepsilon_{kk}$	(D20)
płaskiego stanu $\sigma_{yy} = \frac{1-2\alpha}{1-2\alpha} = v^*$	(D29)
odkształcenia, $\sigma_{zz} = 2(1+\alpha)^{-1}$	(D30)
z - kierunek $\frac{d\varepsilon_{xx}}{d\varepsilon_{xx}} = -\frac{1-2\alpha}{2}$	
prasowania $d\varepsilon_{zz} = 1 + 4\alpha$	(D31)
$2\sqrt{\beta(1+\alpha)}\sigma_{p}(\epsilon)$	(201)
$O_{zz} = -\frac{1}{\sqrt{3(1+4\alpha)}}$	
$\sqrt{\beta}(1-2\alpha)\sigma_n(\epsilon)$	(D32)
$\sigma_{yy} = -\frac{\sqrt{1+\alpha}}{\sqrt{3(1+\alpha)(1+4\alpha)}}$	
$\sqrt{5(1+\omega)(1+1\omega)}$	
	(D33)
Przyrosty odkształceń $d\varepsilon_{xx} = \frac{dl}{dt} = -\frac{1-2\alpha}{c(1-\alpha)}d\Theta$	(D34)
w płaskim stanie $1 - 6\alpha(1-\Theta)$	
odkształcenia $d\epsilon_{zz} = \frac{dh}{h} = \frac{1+4\alpha}{(1-\alpha)}d\Theta$	
$h = 6\alpha(1-\Theta)$	(D35)
Wymiary kształtki l $\begin{bmatrix} \Theta & 1-2\alpha \\ 0 & 1-2\alpha \end{bmatrix}$	(D36)
prasowanej $\frac{1}{1_0} = \exp \left[-\frac{1}{9} \frac{1}{6\alpha(1-\Theta)}\right]^{\frac{1}{2}}$	
odkształcenia	
$\left \frac{h}{h} = \exp \right \int \frac{1+4\alpha}{6\alpha(1-\Theta)} d\Theta$	
	(D37)
Parametr $1 = \int_{1}^{\Theta} \sqrt{\beta(1+4\alpha)(1+\alpha)}$	(D38)
wzmocnienia $\epsilon = \frac{1}{3} \int_{\Omega} \frac{1}{\sqrt{3}\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta$	

2. Funkcje materiałowe. Funkcje materiałowe mają postać:

$$\alpha(\Theta) = \frac{1 - (1 - \Theta)^{k}}{2 + (1 - \Theta)^{k}} \qquad \beta(\Theta) = (1 - \Theta)^{b} \qquad \sigma_{p}(\varepsilon) = C \varepsilon^{n}$$
(D39)

gdzie k, b, C i n są stałymi doświadczalnymi. W obliczeniach wykorzystano bazę danych, zawierającą ww. stałe wyznaczone dla 11 gatunków spieków w [40].

3. Praca odkształcenia

3.1. Praca właściwa odkształcenia (na jednostkę objętości spieku). Dla przedstawionych w tab. D.1 przypadków odkształceń jednorodnych pracę właściwą odkształcenia W (na jednostkę objętości spieku) można określić z (D8), (D17), (D26), (D38) i (D39) :

- dla jednoosiowego ściskania:

$$W = -\frac{C}{3^{n+1}} \int_{\Theta_0}^{\Theta} \left| \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right|^n \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)} d\Theta$$
(D40)

- dla prasowania w zamkniętej matrycy:

$$W = -\frac{C}{3^{n+1}} \int_{\Theta_0}^{\Theta} \left| \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{\sqrt{\beta(1+4\alpha)}}{\sqrt{\alpha}(1-\Theta)^2} d\Theta \right|^n \frac{\sqrt{\beta(1+4\alpha)}}{\sqrt{\alpha}(1-\Theta)} d\Theta$$
(D41)

- dla płaskiego stanu odkształcenia:

$$W = -\frac{C}{3^{n+1}} \int_{\Theta_0}^{\Theta} \left| \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{\sqrt{\beta(1+4\alpha)(1+\alpha)}}{\sqrt{3}\alpha(1-\Theta)^2} \, d\Theta \right|^n \frac{\sqrt{\beta(1+4\alpha)(1+\alpha)}}{\sqrt{3}\alpha(1-\Theta)} \, d\Theta$$
(D42)

3.2. Praca odkształcenia na jednostkę objętości osnowy W_m. Przyrost pracy d W_m określa wzór wynikający z (D8):

$$dW_{m} = \frac{dW}{1 - \Theta} = \sigma_{p}(\epsilon) d\epsilon$$
(D43)

a więc po scałkowaniu

$$W_{m} = \int_{0}^{\epsilon} \sigma_{p}(\epsilon) d\epsilon = \frac{C}{n+1} \epsilon^{n+1}$$
(D44)

gdzie $\sigma_p(\in)$ wyraża się jak w (D39).

3.3. Całkowita praca odkształcenia L. Całkowita praca odkształcenia L wynosi:

$$\mathbf{L} = \mathbf{W}\mathbf{V} = \mathbf{W}\mathbf{V}_0 \frac{1 - \Theta_0}{1 - \Theta} = \mathbf{W}\mathbf{a}_0 \mathbf{l}_0 \mathbf{h}_0 \frac{1 - \Theta_0}{1 - \Theta}$$
(D45)

gdzie objętość początkową kształtki V_0 oblicza się z jej wymiarów początkowych a_0 , l_0 i h_0 . Dla kształtek walcowych (ściskanych lub prasowanych w zamkniętej matrycy) o średnicy d_0 :

$$L = WV = WV_0 \frac{1 - \Theta_0}{1 - \Theta} = W \frac{\pi d_0^2 h_0}{4} \frac{1 - \Theta_0}{1 - \Theta}$$
(D45)

3.4. Związki pomiędzy porowatością i odkształceniem. W przypadku jednoosiowego ściskania podstawiając do (D19) funkcję α z (D39) otrzymujemy:

$$d\varepsilon_{zz} = \frac{d\Theta}{\left[1 - (1 - \Theta)^k\right](1 - \Theta)}$$
(D46)

lub dla gęstości względnych ($\rho^* = 1 - \Theta$, $d\rho = -d\Theta$):

$$d\varepsilon_{zz} = -\frac{d(\rho^*)}{\left[1 - (\rho^*)^k\right]\rho^*}$$
(D47)

Całkowanie (D46) przy warunku początkowym: dla $\rho^* = \rho_0^*$: $\varepsilon_{zz} = 0$ daje:

$$\rho^* = \left[1 + \frac{1 - (\rho_0^*)^k}{(\rho_0^*)^k} \exp(k\epsilon_{zz})\right]^{-\frac{1}{k}}$$
(D48)

Ostateczny wynik dla porowatości jest następujący:

$$\Theta = 1 - \left[\frac{\exp(-k\varepsilon_{zz})}{\exp(-k\varepsilon_{zz}) + \frac{1 - (1 - \Theta_0)^k}{(1 - \Theta_0)^k}} \right]^{\frac{1}{k}}$$
(D49)

Odpowiedni związek dla prasowania w zamkniętej matrycy bez tarcia wynika wprost z (D25): $\Theta = 1 - (1 - \Theta_0) \exp(-\epsilon_{zz})$ (D50)

Podobne do (D48) równanie można również wyprowadzić dla płaskiego stanu odkształcenia. Ma ono jednak dość skomplikowaną postać i wygodniej jest posługiwać się równaniem (D35), które całkuje się numerycznie.

4. Przykłady liczbowe

Przykład 1. Dobór porowatości początkowej i odkształcenia ε_{zz} dla kształtki ściskanej jednoosiowo w kierunku z. Dla spieku z proszku PNC-60 (k = 1,94, b = 5,26) należy dobrać porowatość początkową Θ_0 i odkształcenie ε_{zz} w ten sposób, aby otrzymać porowatość końcową $\Theta_1 = 0,120$ i parametr wzmocnienia osnowy $\in = 0,300$.

Rozwiązanie: Porowatość początkową wyznacza się, określając metodą kolejnych przybliżeń dolną granicę całkowania w (D17), przy której całka osiąga założoną wartość:

$$0,300 = \frac{1}{3} \left| \int_{\Theta_0}^{0.12} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right|$$
(D51)

co daje: $\Theta_0 = 0,2263$; następnie, w celu określenia wysokości h kształtki po ściskaniu, oblicza się współczynnik gniotu γz (D21):

$$\gamma = \frac{h_1}{h_0} = \exp\left[\int_{0,2263}^{0,12} \frac{1+\alpha}{3\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right] = 0,625$$
(D52)

Odkształcenie ε_{zz} wynosi:

 $\varepsilon_{zz} = \ln \gamma = \ln(0.625) = -0.427$ (D53)

Stosując analogiczne rachunki, można stabelaryzować (w interesującym nas obszarze) wartości Θ_0 , γ i ϵ_{zz} jako funkcje porowatości Θ i odkształcenia zastępczego \in (tab. D.2).

Na rysunku D-19 przedstawiono zależność pomiędzy odkształceniem zastępczym osnowy \in , odkształceniem rzeczywistym (logarytmicznym) ε oraz względnym procentowym ε_c w jednoosiowym stanie naprężeń

					Tabela D.2
Θ					
		0,16	0,12	0,08	
		$\Theta_0 = 0,2461$	$\Theta_0 = 0,1824$	$\Theta_0 = 0,1203$	
	0,2	$\gamma = 0,736$	$\gamma = 0,761$	$\gamma = 0,783$	
		$\epsilon_{zz} = -0,307$	$\epsilon_{zz} = -0,273$	$\epsilon_{zz} = -0,245$	
		$\Theta_0 = 0,3082$	$\Theta_0 = 0,2263$	$\Theta_0 = 0,1480$	
€ (0,3	$\gamma = 0,612$	$\gamma = 0,625$	$\gamma = 0,683$	
		$\epsilon_{zz} = -0,491$	$\epsilon_{zz} = -0,427$	$\epsilon_{zz} = -0,376$	
		$\Theta_0 = 0,3899$	$\Theta_0 = 0,2825$	$\Theta_0 = 0,1828$	
	0,4	$\gamma = 0,490$	$\gamma = 0,548$	$\gamma = 0,596$	
		$\epsilon_{m} = -0.714$	$\epsilon_{m} = -0.601$	$\epsilon_{m} = -0.518$	



(∆⊖ pomiędzy punktami: 0,01)

Rys. D-19. Zależność pomiędzy odkształceniem zastępczym osnowy \in , odkształceniem rzeczywistym (logarytmicznym) ε oraz względnym ε_c w jednoosiowym stanie naprężeń dla spieku PNC-60.

97

Przykład 2. Obliczanie pracy odkształcenia. Dla spieku z proszku PNC-60 ($\sigma_p(\epsilon) = 1173\epsilon^{0,201}$ [MPa]) należy określić wartości W i W_m przy jednoosiowym ściskaniu dla odkształceń zastępczych i porowatości jak w tab. D.2.

Rozwiązanie: Stosujemy (D40) i (D44). Wyniki podano w tab. D.3.

Tabela	D.3
--------	-----

∈	Wm	W [MPa]			
	[MPa]	Θ			
		0,16	0,12	0,08	
0,2	141	114	120	127	
0,3	230	180	192	204	
0,4	325	245	266	286	
C = 1173 [MPa], n = 0,201					
$W_{m} = \int_{0}^{\epsilon} \sigma_{p}(\epsilon) d\epsilon = \frac{C}{n+1} \epsilon^{n+1} $ [MPa]					
$W = -\frac{C}{3^{n+1}} \int_{\Theta_0}^{\Theta} \left \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right ^n \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)} d\Theta $ [MPa]					
C = 1173 [MPa], $n = 0,201$					

Przykład 3. Dobór porowatości początkowych i odkształceń próbek do ponownego spiekania. Dla spieku z proszku PNC-60 (k = 1,94; b = 5,26) należy dobrać porowatość początkową Θ_0 i odkształcenie ε_{zz} (przy jednoosiowym ściskaniu w kierunku osi z) w ten sposób, aby otrzymać parametr wzmocnienia osnowy \in = 0,300 oraz - po ponownym spiekaniu - porowatość końcową Θ_1 = 0,120. Podczas spiekania występuje spadek porowatości o ok. 0,01.

Rozwiązanie: Postępuje się jak w Przykładzie 1 z tym, że należy uwzględnić zmianę porowatości podczas ponownego spiekania. Zatem porowatość po odkształceniu Θ' musi być większa od założonej porowatości końcowej Θ_1 o wielkość $\Delta \Theta = \Theta' - \Theta_1 = 0,01$, a więc $\Theta' = 0,130$. Równanie (D51) przyjmuje postać:

$$0,300 = \frac{1}{3} \left| \int_{\Theta_0}^{\Theta_0^- = 0,130} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right|$$
(D54)

a więc Θ_0 ' = 0,2464. Współczynnik gniotu wynosi:

$$\gamma = \frac{h'}{h_0} = \exp\left[\int_{0,2464}^{0,130} \frac{1+\alpha}{3\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right] = 0,643$$
(D55)

Odkształcenie ε_{zz} :

$$\varepsilon_{zz} = \ln \gamma = \ln(0.643) = -0.442$$
 (D56)



Przykład 4. Wyznaczanie teoretycznej wartości umownej granicy plastyczności. Dla próbki ze spieku odkształconego na zimno obliczyć teoretyczną wartość umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}^{t}$ dla następujących danych:

- spiek PNC-60 (k = 1,94; b = 5,26; n = 0,201; C = 1173[MPa]),
- odkształcenie zastępcze osnowy spieku: $\in = 0,170$,
- porowatość spieku: $\Theta_1 = 0,120$,
- promień odcinka pomiarowego próbki: r₀ = 2,5[mm].

Rozwiązanie: Należy uwzględnić zmianę porowatości podczas rozciągania do wartości odkształcenia rzeczywistego $\varepsilon_{zz} = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)$, gdzie $\left(\frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\%\right) = 0,2\%$. Dla porowatości początkowej przed rozciąganiem $\Theta = 0,120$, ze związku między porowatością a odkształceniem (D49) obliczamy porowatość $\Theta_{0,2}$ spieku po odkształceniu o $\varepsilon_{zz} = \ln(1+0,002) = 0,001998$:

$$\Theta_{0,2} = 1 - \left[\frac{\exp(-1.94 \cdot 0.001998)}{\exp(-1.94 \cdot 0.001998) + \frac{1 - (1 - 0.12)^{1.94}}{(1 - 0.12)^{1.94}}} \right]^{\frac{1}{1.94}} = 0.120387$$
(D57)

Całkując (D17) w granicach od Θ do $\Theta_{0,2}$ obliczamy przyrost parametru wzmocnienia osnowy $\Delta \in_{0,2}$:

$$\Delta \in_{0,2} = \frac{1}{3} \left| \int_{0,120}^{0,120387} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right| = 0,00155768$$
(D58)

Następnie ze związku (D16) znajdujemy wielkość naprężenia σ_{zz} :

$$\sigma_{zz} = \sqrt{\frac{\beta(\Theta_{0,2})}{1 + \alpha(\Theta_{0,2})}} \sigma_p(\varepsilon) = \sqrt{\frac{\beta(\Theta_{0,2})}{1 + \alpha(\Theta_{0,2})}} 1173(\varepsilon + \Delta \varepsilon_{0,2}) = 565,379 \text{ [MPa]}$$
(D59)

gdzie: dla obliczonej porowatości $\Theta_{0,2}$ funkcje materiałowe przyjmują wartości: $\alpha(\Theta_{0,2}) = 0,0792542$ i $\beta(\Theta_{0,2}) = 0,509301$). Dla naprężeń jednoosiowych rzeczywisty promień r walcowej kształtki obliczamy odpowiednio przekształcając i całkując zależność (D20).

$$r = r_0 \exp\left[-\int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{1-2\alpha}{6\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right] = 2.5 \exp\left[-\int_{0,120}^{0,120387} \frac{1-2\alpha}{6\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right] = 2.49806 \text{ [mm]}$$
(D60)

Umowną granicę plastyczności obliczamy wykorzystując związki (D61):

$$R_{p0,2}^{t} = \frac{P_{0,2}}{F_{0}}; \quad \sigma_{p0,2}^{t} = \sigma_{zz} = \frac{P_{0,2}}{F}$$
(D61)

gdzie: $P_{0,2}$ – siła odpowiadająca umownej granicy plastyczności, F_0 – pole powierzchni początkowej, F – rzeczywiste pole powierzchni przekroju kształtki.

Ostatecznie teoretyczna wartość umownej granicy plastyczności R^t_{p0,2} wynosi:

$$R_{p0,2}^{t} = \sigma_{zz} \frac{r^{2}}{r_{0}^{2}} = 565,379 \frac{2,49806^{2}}{2,5^{2}} = 564,502 [\text{MPa}]$$
(D62)

5. Budowa krzywej wzmocnienia osnowy spieku na podstawie wyników próby rozciągania

Krzywą wzmocnienia osnowy spieku buduje się we współrzędnych \in - σ_p na podstawie znanej zależności siły P od wydłużenia ΔL odcinka pomiarowego próbki o długości początkowej L_0 i porowatości początkowej Θ_0 (w zakresie odkształceń równomiernych). Kolejno oblicza się wartości:

• odkształceń logarytmicznych ε_{zz} ze wzoru:

$$\varepsilon_{zz} = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \tag{D63}$$

 porowatości Θ i odkształceń zastępczych ∈ z (D49) i (D18) oraz rzeczywistych promieni r kołowego przekroju odcinka pomiarowego próbki przez całkowanie równania, będącego odpowiednikiem (D17):

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{r}} = -\frac{1-2\alpha}{6\alpha(1-\Theta)}\mathrm{d}\Theta \tag{D64}$$

co daje:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 \exp\left[-\int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{1-2\alpha}{6\alpha(1-\Theta)} d\Theta\right]$$
(D65)

(r₀ jest wartością początkową r),

• naprężeń rzeczywistych:

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{\pi r^2}$$
(D66)

• naprężeń uplastyczniających osnowy spieku z (D16):

$$\sigma_{\rm p} = \sqrt{\frac{1+\alpha}{\beta}} \,\sigma_{\rm zz} \tag{D67}$$

Literatura

- 1 Adamczak S., Aleksanderek F.: Wytwarzanie części maszyn z proszków metali, WNT, Warszawa 1964
- 2 Atkinson H. V., Davies S.: Fundamental aspects of hot isostatic pressing, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 31, Number 12, 1 December 2000
- 3 Blicharski M.: Wstęp do inżynierii materiałowej, WNT, Warszawa 2001.
- 4 Bocchini G.: The new iron base powders for advanced automotive PM applications, PM Auto '96, Int. Conference on Powder metallurgy for Automotive Parts, Isfahan (Iran), 1996
- 5 Bocchini G.: The warm compaction process basic, advantages and limitations, SAE Technical Paper 980334,
- 6 Bockstiegel G., Bjork U.: The influence of preform shape on material flow, residual porosity and occurrence of flaws in hot - forged powder compacts. Powder Metallurgy 17, 33, 1974
- 7 Bockstiegel G.: Some technical and economical aspects of P/M hot forging. Högänas Iron Powder Information PM 73.7, Högänas AB 1973
- 8 Brown J. D., Castle G. S., Chagnon F., Inculent I. I.: Electrostatic Lubrication of Moulds, IDEE Industry Application Society, Annual Meeting, New Orleans 1997
- 9 Brown M. T., Jones P. K.: Experimental and practical aspects of the powder forging process. Int. J. Powder 6, 4, 1970
- 10 Bukat A., Rutkowski W.: Teoretyczne podstawy procesów spiekania, Wydawnictwo Śląsk 1974
- 11 Cottrell A. H.: Własności mechaniczne materii, PWN, Warszawa 1970
- 12 Cyunczyk A.: Podstawy inżynierii spieków metalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000
- 13 Cyunczyk A.: Techniki wytwarzania. Technologia spieków. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1972]
- 14 Dobrzański L.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002
- 15 Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z.; Obróbka plastyczna. Techniki wytwarzania, PWN, Warszawa 1986
- 16 Fludzińska K., Szczepanik S., Ratuszek W.: Określenie wpływu parametrów zagęszczania na gorąco wyprasek z proszków Ni i Al. Na ich gęstość i własności mechaniczne, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 17 Frydrych H.: Zależność wytrzymałości na zginanie od wybranych parametrów charakteryzujących struktury spieków. Materiały VII Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Akademia Górniczo - Hutnicza, Kraków 1988



- 18 Galanty M.: Weryfikacja doświadczalna wybranych właściwości odkształcanych metalicznych materiałów porowatych, Rudy i Metale Nieżelazne. 2002 R. 47 nr 5
- 19 German R. M., Powder Injection Molding, Design.& Applications, User's Guide, 2003
- 20 German R. M.: Powder Metallurgy of iron and stall, John Wiley & Sons, Inc, New York 1998
- 21 German R. M.: Sintering theory and practice, Wiley-Interscience, New York, 1996.
- 22 German, R. M.: "Powder Injection Molding, MPIF, Princeton, USA, 1990
- 23 Girardini L., Molinari A., Locatelli G., Tonini G.: Vacuum heat treatment of components for automotive application, La metalurgia Italiana, 2/2006
- 24 Gronostajski J. Procesy dynamiczne i statyczne towarzyszące obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze, Obróbka plastyczne Tom XXII, Zeszyt 2 (1984)
- 25 Grosman Karczmarek., Łukowski J.: Model i opis matematyczny przebiegu procesu zagęszczania w warunkach oddziaływania dużych ciśnień i odkształceń. Materiały VI Konferencji Metalurgii proszków, Wrocław 1984
- 26 Grosman Karczmarek., Łukowski J.: Wpływ odkształcenia i naprężeń na przebieg procesów zamykania i spajania wad wewnętrznych. Zeszyty naukowe AGH, Mechanika 1090, 9, Kraków 1986
- 27 Guest T.L., Negm M., Davies R.: Metal flow and densification in the die-forging of porous performs. Powder Metallurgy 16, 32, 1973
- 28 Gulsoy, O. Vayvay, O. Salman S. a new technology in production of aerospace components: powder injection molding (PIM), Proceedings of International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Nov. 2003
- 29 Hanejko F.G., Luk S. H., Rawlings A. J. Hale T. J.: Application of high performance bindertreated materiale, International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materiale Las Vegas 1998
- 30 Hansel G., Bryjak E., Stolors G., Granicki J.: Przeróbka plastyczna kobaltowej stali szybkotnącej otrzymanej technologią metalurgii proszków. Materiały IV Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Zakopane 1975
- 31 Hausner H., Roll K. H., Johnson P. K.: New method for the consolidation of metal powders, Perspectives In Powder Metallurgy, Volume 1, Plenum Press, New York 1967
- 32 Hendrickson A. A., Mahmeier P. M., Smith D. W.: "Impact forging of sintered stall preforms, Vol. 43 No.4 Powder Metallurgy 2000
- 33 Höganäs Handbook for Sintered Components, vol. 1, Material and Powder Properties, Höganäs AB (1977)
- 34 Jandeska W., Slattery R., Hanejko F., Rawlings A., King P.; Rolling Contact Fatigue Performance Contrasting Surface Densified, Powder Forged, and Wrought material, International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Montréal 2004



- 35 Johnson M., Argryris R., McGee T.: a new extrusion method for consolidation of powders, Journal of the JSTP. Vol.45 no.520 2004-2005
- 36 Kaczmarek L.: Własności żelaza spiekanego i prasowanego materiału litego po obróbce plastycznej na zimno. Zeszyty Naukowe AGH, Mechanika 1090, 9, Kraków 1986
- 37 Karpiński T., Ogrodnik J.: Analiza zagęszczania materiałów porowatych w procesie dogniatania na zimno wahającą matrycą na przykładzie spieków żelaza, Materiały IV Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Zakopane 1975
- 38 Kazior J.: Wpływ spiekania z równoczesną obróbką cieplno-chemiczną na zmianę fizykomechanicznych własności spieków, Praca doktorska, Politechnika Krakowska 1985
- 39 Kiełkucki H.: Doświadczalne i teoretyczne podstawy dynamicznego prasowania proszków. Syntetyczna informacja o pracach wykonanych w ramach CPBP 02.04. Centralny Program Badań Podstawowych 02.04: Teoretyczne podstawy technologii maszyn oraz konstrukcji obrabiarek, urządzeń technologicznych i narzędzi. Politechnika Wrocławska, 1988 - 1990
- 40 Kiełkucki H., Okoński S.: Badania procesów wyciskania proszków i spieków metali etap i i II, Sprawozdania nr M-2/DS/97 i M2/74/DS/98, Instytut Materiałoznawstwa i Technologii Metali, Politechnika Krakowska, Kraków 1997 – 98
- 41 Kiełkucki H., Okoński S.: Jakość wyrobów z proszków metali prasowanych dynamicznie. Materiały i Krajowej Konferencji Naukowej: Materiałoznawstwo - Odlewnictwo - Jakość. Politechnika Krakowska, 1997
- 42 Kiełkucki H., Okoński S.: Wzrost gęstości i wzmocnienie warstwy wierzchniej po nagniataniu tocznym materiału spiekanego. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej: Obróbka materiałów. Stan obecny i kierunki rozwoju OM 2000, Politechnika Krakowska, Kraków 2000
- 43 Kiełkucki H., Okoński S., Polański Z.: Charakterystyki materiałowe kształtowanych plastycznie spieków metali.", Projekt KBN nr 7 T 08 D 00910/1996.
- 44 King P., Lindsley B., Marucci M, Narasimhan K. High Density Processing of Cr-Si-Ni-Mo Containing Steels, International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Euro PM2005 Prague
- 45 Kondoh M., Okajima H.: High density powder compaction using die wall lubrication Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials,2002
- 46 Kosoń A., Okoński S.: Wpływ porowatości i wzmocnienia na udarność spieku z proszku Fe ASC 100.29 Materiały XXX Szkoły Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo - Hutnicza, Kraków - Ustroń Jaszowiec 2002
- 47 Kosoń A., Okoński S.: Wpływ porowatości i wzmocnienia na własności wytrzymałościowe spieków metali, Materiały XXIX Szkoły Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo -Hutnicza, Kraków - Wisła 2001
- 48 Kosoń-Schab A.: Własności mechaniczne odkształconych plastycznie spieków metali. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2005



- 49 Kruth J.P., Mercelis P., Froyen L., Rombouts M., Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting, 15th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2004
- 50 Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., "Lasers and materials in selective laser sintering, Assembly automation, 2003
- 51 Lindsley B., James W. B. Sinter Hardening Response Of a Cr-Si-Ni-Mo Containing Steel, International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Euro PM2005 Prague
- 52 Łukowski J., Chabrowski H., Narbutt T.: Wybrane aspekty prasowania na zimno spieków z proszków metali. Metalurgia Proszków 2, 1983
- 53 Łukowski J., Pawlicki J., Łukaszczyk S., Narbutt T., Polak B.: Kształtowanie na zimno odkuwek ze spieków na osnowie krajowych proszków żelaza Materiały VII Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Akademia Górniczo - Hutnicza, Kraków 1988
- 54 Łukowski J.: Kształtowanie plastyczne materiałów porowatych, Politechnika Śląska, Zeszyt Naukowy nr 1157, Gliwice 1992
- 55 Marucci M., Rawlings A.; Full Density Properties of Low Alloy Steels International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Montréal 2004
- 56 Missol W.: Spiekane części maszyn. Wyd. Śląsk, Katowice 1978
- 57 Missol W.: Spiekane części maszyn; wytwarzanie własności dobór materiałów, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1978
- 58 Moszumański R.: Badania procesu prasowania pulsacyjnego proszków i spieków na bazie żelaza. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo - Hutniczej, seria: Mechanika, nr 4, 1986
- 59 Moszumański R.: Doświadczalne i teoretyczne podstawy procesu prasowania proszków w warunkach obciążeń pulsacyjnych i w polu magnetycznym. Syntetyczna informacja o pracach wykonanych w ramach CPBP 02.04. Centralny Program Badań Podstawowych 02.04: Teoretyczne podstawy technologii maszyn oraz konstrukcji obrabiarek, urządzeń technologicznych i narzędzi. Politechnika Wrocławska, 1986 – 1990
- 60 Moszumański R.: Permanent magnets Sm Sr type modified to work at elevated temperature. Materiały konferencyjne: Powder Metallurgy, Iguacu (Brazylia), 1999
- 61 Moszumański R.: Prasowane magnesy stałe do pracy w podwyższonej temperaturze. Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej: Problemy jakości stymulatorem rozwoju technologii bezodpadowych, t. III. Fotobit, Kraków, 1999
- 62 Moszumański R., Okoński S., Polański Z., Wojciechowski L., Woźny Z.: Prasy do wyrobów z proszków. Materiały Narady Naukowo - Technicznej Komitetu Metalurgii Proszków. Politechnika Krakowska, 1985
- 63 Moszumański R., Polański Z.: Prasa automatyczna PXP 1.00 podstawowe urządzenie technologiczne gniazda obróbki wyrobów z proszków. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo -Hutniczej, seria: Mechanika, nr 4, 1986



- 64 Moszumański R., Polański Z., Woźny Z.: Pulsating technology for powder products. Materiały seminarium z zakresu rozwoju i zastosowań metalurgii proszków w przemyśle maszynowym. Mińsk, 1985
- 65 Moyer K. H.: The effect of density on impact properties of iron P/M forgings, Metals Engineering Quarterly, 1972
- 66 Nowacki J.: Spiekane metale i kompozyty, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005
- 67 Nowacki J.: Spieki metali w budowie maszyn, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1997
- 68 Nowacki J.; Spiekane metale i kompozyty z osnową metaliczną, WNT, Warszawa 2005
- 69 Okoński S.: Podstawy plastycznego kształtowania materiałów spiekanych z proszków metali, Monografia 153, Politechnika Krakowska, Kraków 1993.
- 70 Okoński S., Ścierski M.: Prognozowanie pękania ciągliwego spieków metali podczas obróbki plastycznej, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 71 Olszewski W.: Możliwości wykorzystania efektów zgniotu warstwy wierzchniej spiekanych części maszyn. Metalurgia Proszków 3 4, 1982
- 72 Olszewski W.: Nagniatanie Powierzchniowe spiekanych części maszyn. Materiały V Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Poznań 1979
- 73 Olszewski W.: Wpływ nagniatania tocznego na charakterystykę warstwy wierzchniej otworów w elementach spiekanych z proszku żelaza. Wyd. Politechnika Warszawska, Warszawa 1980
- 74 Orban R.L., New research directions in polder metallurgy, Romanian Reports in Physics V.56, No.3 P.505-516, 2004
- 75 Pręgowski J., Ufnal W.: Rotary cold repressing a new economical method of P/M precision forging production. Materiały VII Konferencji Metalurgii Proszków w Polsce, Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków 1988
- 76 Rutkowski W.: Projektowanie właściwości wyrobów spiekanych z proszków i włókien, PWN, Warszawa 1977
- 77 Rutz H. G., Rawlings A. J., Cimino T. M.: Advanced properties of high density ferrous powder metallurgy materials, PM2 TEC '95, Seattle 1995
- 78 Rutz, H.G., Hanejko, F.G., Engström, U., Johansson, B., Properties of Diffusion Bonded Alloys Processed to High Densities, Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials-1995, Metal Polder Industries Federation, Princeton, NJ
- 79 Rutz, H.G., Hanejko, F.G., High Density Processing of High Performance Ferrous Materials, Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials - 1994, Vol.5, pp 117-133, Metal Powder Industries Federation, Princeton
- 80 Rutz, H.G., Hanejko, F.G., Luk, S.H., "Warm Compaction Offers High Density at Low Cost, Metal Powder Report, Elsevier Advanced Technology, Oxford, United Kingdom



- 81 Ryś J.: Stereologia materiałów. Fotobit Design, Kraków 1995.
- 82 Schilz J., Riffel M.: Plasma spray forming as a novel production method for thermoelectric materials, 15th International Conference on Thermoelectrics, Pasadena 1996
- 83 Stolarz S., Piszczek T., Czepelak M., Mickiewicz T.: Spiekane materiały na osnowie żelaza wytwarzane metodą dogęszczania obwiedniowego, Część II. Metalurgia Proszków, rok XXVIII, 1995
- 84 Stolarz S., Piszczek T., Czepelak M., Mickiewicz T.: Spiekane materiały na osnowie żelaza o wysokiej gęstości wytwarzane metodą dogęszczania obwiedniowego, Część I. Metalurgia Proszków, rok XXIX, 1996
- 85 Sułkowski A.: Doświadczalne i teoretyczne podstawy pulsacyjno izostatycznego prasowania proszków. Syntetyczna informacja o pracach wykonanych w ramach CPBP 02.04. Centralny Program Badań Podstawowych 02.04: Teoretyczne podstawy technologii maszyn oraz konstrukcji obrabiarek, urządzeń technologicznych i narzędzi. Politechnika Wrocławska, 1987 -1990
- 86 Sułkowski A.: Wpływ pulsacji na uzyskane własności prasowanych izostatycznie wyrobów z proszków. Metalurgia Proszków, nr 3 4, 1993
- 87 Sułowski M.; Sintered manganese steels, Archives off Metallurgy and Materiale, Volume 51, 2006
- 88 Szczepanik S..: Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków i kompozytów, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2003
- 89 Szczepanik S.: Selected problems of forming in semi-solid state of PM preforms and composites on Al.-Si-Cu-Mg alloy matrix, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 90 Szczepanik S.: Wpływ kucia na gorąco na własności i strukturę stopów Fe-Al. Otrzymanych metodą metalurgii proszków, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 91 Szczepanik S., Lehnert W.: Wpływ struktury na plastyczność materiałów otrzymanych przez przeróbkę plastyczną proszków na osnowie aluminium. Materiały XII Konferencji Sprawozdawczej Metalurgia' 98, wyd. Akapit, Kraków 1998
- 92 Szczepanik S., Śleboda T.: Wpływ warunków odkształcania na gęstość i strukturę materiałów otrzymanych z proszków stopów Al Cu. Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej: Problemy jakości stymulatorem rozwoju technologii bezodpadowych, t. II: Metalurgia proszków. Jakość, Kraków 1999
- 93 Szczepanik S., Wiśniewski B.: Wpływ dogniatania na zimno na własności spieku żelaza, Rudy i Metale Nieżelazne, 2004 r. 49 nr 2
- 94 Szczepanik S., Wiśniewski B., Wójtowicz T.: Struktura i wybrane własności spiekanej stali niskostopowej o zawartości 0,25% C poddanej obróbce cieplno-plastycznej, Rudy i Metale Nieżelazne, 2004 r. 49 nr 9

- 95 Szewieczek D.: Obróbka cieplna materiałów metalowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998
- 96 Ścierski M.; Kryteria pękania ciągliwego spieków metali, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2005
- 97 Tokuoka T., Kaji T., Nishioka T., Ikegaya A.: Development of High-Strength, Heat-Resistant Aluminum Alloy Made by Powder Forging Process, SEI technical review, no. 61, Jan. 2006
- 98 White D.G.: Advances In Polder Metallurgy and Particulate Materials, Metal Polder Industries Federation, Edmonton, USA 2002, Part 1, p. 1-12]
- 99 Wiśniewska-Weinert H., Leszczyński V., Frąckowiak E.: Zastosowanie metalurgii proszków do wytwarzania łożysk ślizgowych modyfikowanych nanocząstkami MoS₂, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 100 Wiśniewski B., Szczepanik S., Krawiarz J.: Badania wpływu obróbki cieplnej połączonej z operacja kucia matrycowego spiekanej stali na jej strukturę i własności, Polska Metalurgia w latach 2002-2006, Komitet Metalurgii PAN, Kraków 2006
- 101 Wojnar L., Kurzydłowski K.J., Szala J.: Praktyka analizy obrazu. Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002.
- 102 Wyath O. H., Dev-Hughes O.: Wprowadzenie do inżynierii materiałowej, metale, ceramika i tworzywa sztuczne, WNT, Warszawa 1978
- 103 Zarębski K., Okoński S., Putyra P.: Wpływ odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne porowatych spieków metali; III Międzynarodowa Krajowa Konferencja nt. Jakość i innowacyjność w procesach wytwarzania, Kraków, 2006
- 104 Zasadziński J., Richert J., Libura W.: The structure and properties of P/M materials formed in a new method without sintered, Proc. 1992 Powder Metallurgy World Congress, vol.4, San Francisco 1992
- 105 Zavaliangos A., Zhang J. Thermoelectric phenomena in field activation Sintering, International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas 2003
- 106 Дорофеев В. Ю., Лозовой В. И.: Некоторые особенности уплотнения порошкового материала при горячей штамповке с элементами экструзии. Порошковая Металлургия 3, 1985
- 107 Скороход В. В.: Порошковая Металлургия. Киев, Наук. Думка 1977
- 108 Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А., Трухан Ю. В., Шуляков Ю. М.: Феноменологические теории прессования порошков. Киев, Наук. Думка 1982

Wykaz norm

1n PN-EN ISO 2738:2001

Spiekane materiały metaliczne z wyjątkiem węglików spiekanych -- Przepuszczalne spiekane materiały metaliczne - Oznaczanie gęstości, zawartości oleju i porowatości otwartej

2n PN-86/H-04937

Spiekane materiały ceramiczne. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia względnego.

3n PN EN ISO 4498:2007

Metalurgia Proszków, Spiekane materiały metaliczne z wyjątkiem węglików spiekanych -Pomiar twardości pozornej materiałów o zasadniczo jednorodnej twardości na przekroju

4n PN-78/H-04938

Badania wyrobów z proszków metali - Oznaczanie gęstości pozornej twardości i wytrzymałości na zginanie spiekanych wyrobów ciernych

5n PN-EN ISO 3252:2002

Metalurgia proszków - Terminologia

- 6n PN-EN 25754:1997 Spiekane materiały metaliczne z wyjątkiem węglików spiekanych Próbka bez karbu do próby udarności
- 7n PN-EN 10002-1:2004

Metale - Próba rozciągania -- Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia

Wykaz programów komputerowych

- 1p Microsoft Excel 2002, Microsoft Corporation 1985 2001,
- 2p Mathematica. Enhanced Version 2.2.1 for Microsoft Windows, 1993 Wolfram Research, Inc.
- 3p Statistica for Windows, wersja 5.5 A,Copyright[®] for the Polish translation 1997 98, StatSoft Polska
- 4p DasTP Oprogramowanie systemu akwizycji danych pomiarowych, autor. Krzysztof Zarębski 2004/2005
- 5p ImageJ oprogramowanie Open Source do edycji, przetwarzania i analizy obrazów, autor Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA
Spis ilustracji

(rysunki w tekście)

Rys. 1.	Schemat wpływu odkształcenia plastycznego na zimno oraz wyżarzania lub
	ponownego spiekania na właściwości wytrzymałościowe (ww) spieków metali21
Rys. 2.	Schemat wpływu odkształcenia plastycznego na zimno oraz wyżarzania lub
	ponownego spiekania na właściwości plastyczne (w _p) spieków metali22
Rys. 3.	Schemat algorytmu badań
Rys. 4.	Schemat obiektu badań
Rys. 5.	Cząstka proszku PNC-60 [33]
Rys. 6.	Kształtki przeznaczone na próbki do badań
Rys. 7.	Srednie wartości wytrzymałości na rozciąganie (R _m), umownej granicy
	plastyczności (R _{p0,2}) oraz twardości Brinella (HB) w zależności od porowatości
-	spieku PNC-60 bez obróbki plastycznej i cieplnej (dane z tab. 6, 7)32
Rys. 8.	Srednie wartości udarności (KC) oraz umownej granicy plastyczności (A_5) w
	zależności od porowatości spieku PNC-60 bez obróbki plastycznej i cieplnej
D	(dane z tab. 6, 7)
Rys. 9.	Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie
	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,151 \div 0,183$) na tle wykresu
	zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m=725,8 (1-\Theta)^{4,52}$ [MPa]36
Rys. 10.	. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie
	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,291 \div 0,0,322$) na tle wykresu
	zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m=725,8 (1-\Theta)^{4,52}$ [MPa]36
Rys. 11.	. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na wytrzymałość na rozciąganie
	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu
	zależności $R_m(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_m=725,8 (1-\Theta)^{4,52}$ [MPa]37
Rys. 12.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę
	plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60($\in = 0,151 \div 0,183$) na
	tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}$ =473,5 (1-
	$(\Theta)^{3,68}$ [MPa]
Rys. 13.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę
	plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,291 \div 0,0,322$) na
	tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}$ =473,5 (1-
	Θ) ^{3,68} [MPa]
Rys. 14.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na umowną granicę
	plastyczności odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,484 \div 0,505$) na
	tle wykresu zależności $R_p(\Theta)$ opisanej równaniem: $R_{p0,2}$ =473,5 (1-
	Θ) ^{3,68} [MPa]
Rys. 15.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC
-	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,151 \div 0,183$) na tle wykresu
	zależności KC(Θ) opisanej równaniem: KC=53.4 (1- Θ) ^{5,49} [J/cm ²]39
Rys. 16.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC
•	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0.291 \div 0.0.322$) na tle wykresu
	zależności KC(Θ) opisanej równaniem: KC=53.4 (1- Θ) ^{5,49} [J/cm ²]
Rys. 17.	. Wpływ wyżarzania oraz dwukrotnego spiekania na udarność KC
<i>j r</i>	odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\epsilon = 0.484 \div 0.505$) na tle wykresu
	zależności KC(Θ) opisanej równaniem: KC=53 4 (1- Θ) ^{5,49} [I/cm ²] 40

Rys. 18. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na twardość Brinella	
odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,151 \div 0,183$) na tle wykresu	
zależności HB(Θ) opisanej równaniem: HB=152,6 (1- Θ) ^{3,04}	40
Rys. 19. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na twardość Brinella	
odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,291 \div 0,0,322$) na tle wykresu	
zależności HB(Θ) opisanej równaniem: HB=152,6 (1- Θ) ^{3,04}	41
Rys. 20. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na twardość Brinella	
odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,484 \div 0,505$) na tle wykresu	
zależności HB(Θ) opisanej równaniem: HB=152,6 (1- Θ) ^{3,04}	41
Rys. 21. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie	
procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,151 \div 0,183$) na tle	
wykresu zależności A ₅ (Θ) opisanej równaniem: A ₅ =20,0 (1- Θ) ^{7,70} [%]	42
Rys. 22. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie	
procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,291 \div 0,0,322$) na	
tle wykresu zależności $A_5(\Theta)$ opisanej równaniem: $A_5=20,0$ $(1-\Theta)^{7,70}$ [%]	42
Rys. 23. Wpływ wyżarzania oraz ponownego spiekania na względne wydłużenie	
procentowe odkształconego na zimno spieku PNC-60 ($\in = 0,484 \div 0,505$) na tle	
wykresu zależności A ₅ (Θ) opisanej równaniem: A ₅ =20,0 (1- Θ) ^{7,70} [%]	43
Rys. 24. Wytrzymałość na rozciąganie spieku PNC-60. Porowatość $\Theta_1 = 0.11 \div 0.13$	
$(dla \tau = 1120 [^{\circ}C]: \Theta_1 = 0.082 \div 0.098).$	44
Rvs. 25. Umowna granica plastyczności spieku PNC-60. Porowatość $\Theta_1 = 0.11 \div 0.13$	
$(dla t = 1120 [^{\circ}C]; \Theta_1 = 0.82 \div 0.098)$	45
Rvs. 26. Udarność spieku PNC-60. Porowatość $\Theta_1 = 0.11 \div 0.13$ (dla t = 1120 [°C]:	
$\Theta_1' = 0.82 \div 0.098$	46
Rys. 27. Wzgledne wydłużenia procentowe spieku PNC-60. Porowatość	10
$\Theta_1 = 0.11 \div 0.13$ (dla t = 1120 [°C]: Θ_1 ' = 0.82 ÷ 0.098).	47
Rys 28 Twardość Brinella spieku PNC-60 Porowatość $\Theta_1 = 0.11 \pm 0.13$ (dla	
$t = 1120 \ [^{\circ}C]: \Theta_1 = 0.82 \div 0.098).$	47
Rvs. 29. Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu ($\epsilon = 0.170 \div 0.179$)	
poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej	50
Rvs. 30.Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu ($\in = 0.291 \div 0.317$)	
poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej	51
Rys. 31.Fotografie mikrostruktur spieków przed i po odkształceniu ($\in = 0.486 \div 0.506$)	
poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej	52
Rys. 32. Fotografie powierzchni przełomów spieków przed i po odkształceniu	
$(\in = 0,170 \div 0,179)$ poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej	53
Rys. 33. Fotografie powierzchni przełomów przed i po odkształceniu	
$(\in = 0.291 \div 0.317)$ poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej	54
Rys. 34. Fotografie powierzchni przełomów spieków przed i po odkształceniu (\in =	
$0,486 \div 0,506$) poddanych lub nie dalszej obróbce cieplnej.	55
Rys. 35. Fotografia powierzchni przełomu spieku przeznaczonego do obróbki	
plastycznej – K3, $\Theta_0 = 0.315$	56
Rys. 36. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej. Próbka CO:	
$\Theta_1 = 0.115, \epsilon = 0.486, \epsilon = 0.756$	57
Rys. 37. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu	
w temp. 650 [°C]. Próbka C1: $\Theta_1 = 0,111, \in = 0,494, \epsilon = 0,758$	58
Rys. 38. Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu	
w temp. 750 [°C]. Próbka C2: $\Theta_1 = 0,111, \in =0,505, \epsilon = 0,782$	58

Rys. 39.	Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i wyżarzaniu w temp. 850 [°C]. Próbka C3. $\Theta_1 = 0,113, \epsilon = 0,495, \epsilon = 0,76959$
Rys. 40.	Fotografia powierzchni przełomu spieku po obróbce plastycznej i powtórnym spiekaniu w temp. 1120 [°C]. Próbka C4: Θ_1 ' = 0.092. $\epsilon = 0.506$. $\epsilon = 0.783$ 60
Rys. 41.	Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wielkość ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu na zimno
Rys. 42.	Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wartość współczynnika pofałdowania ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu
	na zimno
Rys. 43.	Wpływ temperatury wyżarzania na średnią wartość współczynnika wydłużenia ziaren osnowy spieku poddanego wcześniejszemu odkształceniu na zimno63
Rys. 44.	Wytrzymałość na rozciąganie (R _m) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia) b) umowna granica
	plastyczności (R _{p0,2}), c) udarność (KC)
Rys. 45.	Umowna granica plastyczności (R _{p0,2}) PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia)65
Rys. 46.	Udarność (KC) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia)
Rys. 47.	Względne wydłużenie procentowe (A ₅) spieku PNC-60 w funkcji
	odkształcenia zastępczego, (aproksymacja wielomianem 3 stopnia)66
Rys. 48.	Twardość Brinella (HB2,5/306/15) spieku PNC-60 w funkcji odkształcenia
D 40	zastępczego, (aproksymacja wielomianami 3 stopnia)
Kys. 49.	PNC-60 o porowatości końcowej $\Theta_1 = 0.11 \pm 0.13$ 68
Rvs 50	Funkcia f: $(\in t)$ dla wytrzymałości na rozciaganie spieku PNC-60 oraz wykres
Ry5. 50.	warstwicowy powierzchni opisanej ta funkcja
Rys. 51.	Funkcja $f_i (\in, t)$ dla umownej granicy plastyczności spieku PNC-60 oraz
	wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją70
Rys. 52.	Funkcja $f_i (\in, t)$ dla udarności spieku PNC-60 oraz wykres warstwicowy powierzchni opisanej ta funkcja
Rys. 53.	Funkcja $f_i (\in, t)$ dla względnego wydłużenia procentowego spieku PNC-60 oraz
-	wykres warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją72
Rys. 54.	Funkcja $f_i (\in, t)$ dla twardości Brinella spieku PNC-60 oraz wykres
	warstwicowy powierzchni opisanej tą funkcją73

(rysunki w dodatkach)

Rys. D-1.	Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 o różnej porowatości Θ_0 w układzie współrzędnych: naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste
	(logarytmiczne): $\sigma = f(\varepsilon)$
Rys. D-2.	Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych: naprężenie umowne – odkształcenie
	rzeczywiste (logarytmiczne); $\sigma = f(\varepsilon)$
Rys. D-3.	Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym
	na zimno (0,159 $\leq \epsilon \leq 0,180$), poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w
	układzie współrzędnych naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste
	(logarytmiczne); $\sigma = f(\varepsilon)$
Rys. D-4.	Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym
	na zimno $(0,302 \le \epsilon \le 0,316)$, poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w
	układzie współrzędnych naprężenie umowne – odkształcenie rzeczywiste
	(logarytmiczne); $\sigma = f(\varepsilon)$
Rys. D-5.	Wybrane krzywe rozciągania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym
5	na zimno $(0.486 \le \le 0.501)$, poddanych zróżnicowanej obróbce cieplnej, w
	układzie współrzednych napreżenie umowne – odkształcenie rzeczywiste
	(logarytmiczne): $\sigma = f(\varepsilon)$
Rvs D-6	Wybrane krzywe rozciagania spieków PNC-60 po odkształceniu plastycznym
11,51 2 01	na zimno i ponownym spiekaniu w temp 1120 [°C] w układzie współrzednych:
	napreženje umowne – odkształcenje rzeczywiste (logarytmiczne): $\sigma = f(\varepsilon)$ 80
Rvs D-7	Wybrane krzywe wzmocnienia osnowy snieków PNC-60 (0.159 $< \epsilon < 0.180$)
Kys. D-7.	w yorane krzywe wzmoeniema osnowy spieków r $(0,10) \le e \le 0,100)$, poddanych po odkształceniu plastycznym na zimno zróżnicowanej obróbce
	cianlasi anroksymowana funkciami notegowymi
	Webrane krzywa wzmacznie zanowy szielyćw DNC (0 (0 202 z z z 0 216)
Kys. D-8.	wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spiekow PNC-60 (0,502 $\leq \epsilon \leq 0,510$),
	poddaných po odksztateľnu plastyczným na zimno zroznicowanej obrobce
	ciepinej, aproksymowane lunkcjami polęgowymi
Rys. D-9.	wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spiekow PNC-60 (0,486 $\leq \epsilon \leq 0,501$),
	poddaných po odkształceniu plastyczným na zimno zroznicowanej obrobce
D D 10	ciepinej, aproksymowane funkcjami potęgowymi
Kys. D-10.	wybrane krzywe wzmocnienia osnowy spiekow PNC-60 po odksztateniu
	piastycznym na zimno i ponownym spiekaniu w temp. 1120 [C]
Dwg D 11	aproksymowane runkcjann polęgowymi
Kys. D-11.	w ytrzymatość na rozciąganie R _m spieków PNC -60 przed i po odksztatceniu
D D 12	plastycznym na zimno w układzie wspołrzędnych $\Theta \in \mathbb{C}$
Rys. D-12.	Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ spiekow PNC -60 przed i po
D D 10	odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych Θ - \in
Rys. D-13.	Udarnosc KC spieków PNC -60 przed i po odkształceniu plastycznym na
5 5 4 4	zimno w układzie współrzędnych Θ - \in
Rys. D-14.	Twardość Brinella HB 2,5/306/15 spieków PNC -60 przed i po odkształceniu
	plastycznym na zimno w układzie współrzędnych Θ-∈86
Rys. D-15.	Względne wydłużenie procentowe A5 spieków PNC -60 przed i po
	odkształceniu plastycznym na zimno w układzie współrzędnych Θ - \in 87
Rys. D-16.	Liczebność poszczególnych klas wielkości ziarna dla spieku PNC-60 - materiał
	odkształcony $\in = 0,15 \div 0,18$; a) bez obróbki cieplnej; b) obróbka w 650 [°C];
	c) obróbka w 750 [°C]; d) obróbka w 850 [°C]

Rys. D-17. Liczebność poszczególnych klas wielkości ziarna dla spieku PNC-60 - mater	riał
odkształcony $\in =0,29 \div 0,32$; a) bez obróbki cieplnej; b) obróbka w 650 [°C	'];
c) obróbka w 750 [°C]; d) obróbka w 850 [°C]	89
Rys. D-18. Liczebność poszczególnych klas wielkości ziarna dla spieku PNC-60 - mater	riał
odkształcony $\in =0.48 \div 0.51$; a) bez obróbki cieplnej; b) obróbka w 650 [°C	ː];
c) obrobka w 750 [$^{\circ}$ C]; d) obrobka w 850 [$^{\circ}$ C]	90
Rys. D-19. Zależność pomiędzy odkształceniem zastępczym osnowy \in , odkształceniem	
naprężeń dla spieku PNC-60	ie 97

Spis tabel

Tabela 1.	Czynniki oraz metody i środki technologiczne wpływające na właściwości materiałów i wyrobów wytwarzanych z proszków metalu	5
Tabela 2.	Poziomy wartości badanych i czynniki stałe.	25
Tabela 3.	Analiza sitowa proszku PNC-60	26
Tabela 4.	Charakterystyka spieku z proszku PNC-60 [43]	27
Tabela 5.	Oznaczenia próbek i parametry obróbki plastycznej oraz obróbki cieplnej spieków PNC-60	30
Tabela 6.	Właściwości mechaniczne spieków przed odkształceniem	31
Tabela 7.	Właściwości mechaniczne spieków nie odkształconych o porowatości porównywalnej do spieków odkształconych i poddawanych lub nie obróbce cieplnej (próbki K0).	31
Tabela 8.	Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno	33
Tabela 9.	Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.	33
Tabela 10.	Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno	34
Tabela 11.	Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.	34
Tabela 12.	Wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności oraz względne wydłużenie procentowe spieków odkształconych plastycznie na zimno	35
Tabela 13.	Udarność oraz twardość Brinella spieków odkształconych plastycznie na zimno.	35
Tabela 14.	Parametry struktury spieku po odkształceniu plastycznym i wyżarzaniu	61



Specjalne podziękowania

Dla Pana SŁAWOMIRA KOZŁOWSKIEGO

z firmy KOS -Technika autoryzowanego przedstawiciela firmy Höganäs AB, dzięki którego uprzejmości użyty do badań proszek PNC 60 otrzymano nieodpłatnie.

Dla Pana dr inż. ADAMA TABORA

za umożliwienie publikacji i prezentacji wyników badań na wielu gremiach naukowych, również międzynarodowych, za pomoc w zdobywaniu środków finansowych oraz zakup i udostępnienie karty pozyskiwania danych.

Dla Panów:

mgr inż. **HENRYKA MROZA**, oraz inż. **TOMASZA FOSZCZA** z Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych w Krakowie za dostęp do

prasy i umożliwienie wykonania próbek do badań.

Dla Pana dr inż. PIOTRA PUTYRY

z Zakładu Inżynierii Materiałowej Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, za wykonanie zdjęć na mikroskopie skaningowym.

Dla **wszystkich koleżanek i kolegów,** pracowników Instytutu Inżynierii Materiałowej i CSiOSJ, bez których pomocy ta praca nie mogłaby powstać.