

KRZYSZTOF ZARĘBSKI, STANISŁAW OKOŃSKI\*

WŁASNOŚCI MECHANICZNE SPIEKÓW METALI  
PO ODKSZTAŁCENIACH PLASTYCZNYCH  
I OBRÓBCE CIEPLNEJ

MECHANICAL PROPERTIES OF SINTERED METAL  
AFTER PLASTIC DEFORMATION  
AND HEAT TREATMENT

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych spieku z proszku PNC-60 poddanego odkształceniom plastycznym na zimno i wyżarzaniu rekrytalizującemu lub ponownemu spiekaniu. Wyznaczono zależności funkcyjne badanych własności od odkształcenia zastępczego osnowy spieku i temperatury obróbki cieplnej. Stwierdzono korzystny wpływ obróbki cieplnej na własności mechaniczne odkształconego spieku (znacznie wyższe wydłużenie i udarność oraz zbliżona lub wyższa wytrzymałość i granica plastyczności – w porównaniu ze spiekami o tej samej porowatości niepoddanym odkształceniom i obróbce cieplnej).

*Słowa kluczowe: spieki metali, obróbka plastyczna na zimno, obróbka cieplna, wyżarzanie, spiekanie, własności mechaniczne*

Abstract

The results of investigation of PM PNC-60 mechanical properties after cold plastic deformation and recrystallising annealing or double sintering was presented. These properties was obtained as a functions dependent on equivalent strain of matrix and heat treatment temperature. Heat treatment positive influence on sintered metal mechanical properties was stated (much higher impact resistance and unit elongation also nearing or higher tensile strength and yield strength – comparing to sintered metal with the same porosity, without deformation and heat treatment).

*Keywords: PM materials, cold plastic deformation, heat treatment, annealing, sintering, mechanical properties*

\* Mgr inż. Krzysztof Zarębski, dr hab. inż. Stanisław Okoński, prof. PK, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Własności kształtowanych plastycznie materiałów i wyrobów spiekanych z proszków metali zależą od składu chemicznego i struktury osnowy oraz od porowatości i kształtu pustek, a więc od rodzaju proszku i warunków, w jakich przeprowadzono: spiekanie, obróbkę plastyczną na zimno lub gorąco i obróbkę cieplną po odkształceniach plastycznych [1, 5–8].

Procesy obróbki plastycznej stosowane do wytwarzania wyrobów z materiałów spiekanych o strukturze porowatej wykorzystują połączone efekty: kształtowania, wzmocnienia osnowy spieku i podwyższenia jego gęstości (przy ujemnych wartościach naprężenia średniego  $\sigma_m < 0$ ) [4]. Efekty te występują w mniejszym lub większym stopniu w zależności od materiału, kształtu i porowatości wstępniaka oraz warunków termodynamicznych procesu. Obróbka plastyczna na gorąco pozwala uzyskać wysoką gęstość, drobnoziarnistą strukturę osnowy i zbliżony do kulistego kształt pustek, wymaga jednak stosowania atmosfer ochronnych i specjalnych metod nagrzewania. Podczas kształtowania plastycznego na zimno osnowa spieku ulega wzmocnieniu odkształceniowemu. Podobnie jak przy kształtowaniu na gorąco, można podwyższyć gęstość spieku, a ponadto mamy możliwość wytwarzania wyrobów gotowych o dokładnych wymiarach i gładkiej powierzchni.

Korzystnym efektem kształtowania plastycznego materiałów porowatych mogą również towarzyszyć zjawiska niepożądane. Przy kształtowaniu na zimno wstępniaków o dużej porowatości może dojść do powstania lokalnych mikropeknięć i szczelin na granicach spiekanych cząstek proszku, co powoduje niższe własności wytrzymałościowe przy rozciąganiu niż przy ściskaniu [3]. Obniżenie własności plastycznych i udatności może być również uznane za efekt niekorzystny.

Sposobem na usunięcie ww. niekorzystnych lub niepożądanych skutków odkształceń jest obróbka cieplna. Wyżarzanie lub ponowne spiekanie powinno spowodować rekryształizację osnowy, korzystną zmianę morfologii pustek i poprawę spójności na granicach spiekanych cząstek proszku. W efekcie należy się spodziewać:

- znacznego podwyższenia własności plastycznych w porównaniu ze spiekami odkształconymi na zimno o tej samej porowatości,
- osiągnięcia własności wytrzymałościowych zbliżonych lub wyższych niż dla spieków o tej samej porowatości niepoddanych odkształceniom plastycznym.

## 2. Zmiany własności mechanicznych spieków podczas odkształceń plastycznych na zimno i obróbki cieplnej

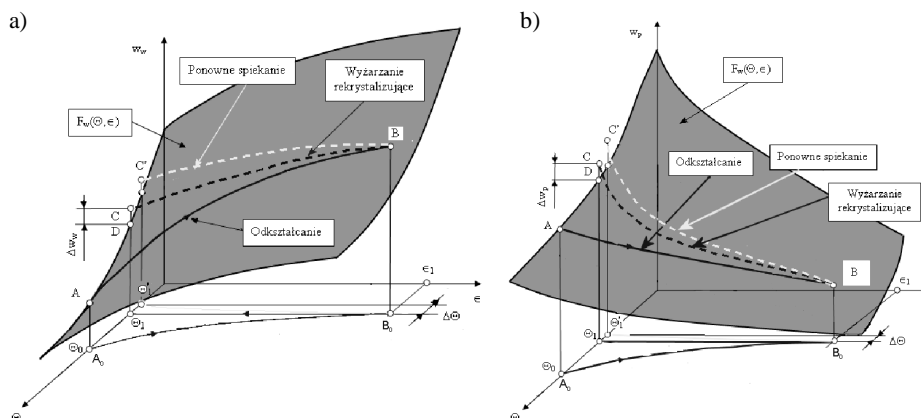
Charakter zmian własności mechanicznych spieków podczas ich odkształcania na zimno oraz następującej później obróbki cieplnej przedstawiono na rys. 1 w funkcji porowatości  $\Theta$  i odkształcenia zastępczego osnowy  $\epsilon$ . Podczas odkształceń plastycznych parametry  $\Theta$  i  $\epsilon$  ewoluują wzdłuż linii  $A_0B_0$ , przy czym parametr  $\epsilon$  osiąga wartość  $\epsilon_1$  (wybrano proces, dla którego  $\sigma_m < 0$ ,  $\Theta_1 - \Theta_0 < 0$ ). Odkształcanie powoduje zmianę własności wzdłuż linii  $AB$ , natomiast obróbka cieplna – od punktu  $B$  do  $C$ , o ile operacji tej nie towarzyszy istotna zmiana porowatości. Spiek o tej samej porowatości  $\Theta_1$  osiągniętej za pomocą prasowania i spiekania (bez późniejszego odkształcania i obróbki cieplnej) ma

pewną własność odpowiadającą punktowi  $D$ . Różni się ona od własności spieku o tej samej porowatości, odkształconego i poddanego obróbce cieplnej o  $\Delta w_w$  lub  $\Delta w_p$ . W czasie ponownego spiekania zachodzi zmiana porowatości (o  $\Delta\Theta$ ) i własności (od  $B$  do  $C'$ ). Krawędzie powierzchni  $F_w(\Theta, \epsilon)$  na płaszczyznach  $(\Theta, w_w)$  i  $(\Theta, w_p)$  oraz  $(\epsilon, w_w)$  i  $(\epsilon, w_p)$  przedstawiają – odpowiednio – zależności własności: spieku nieodkształconego od porowatości oraz osnowy od parametru  $\epsilon$ .

### 3. Badania własne

#### 3.1. Cel i metodyka badań

Prace doświadczalne miały na celu określenie łącznego wpływu odkształcenia zastępczego osnowy ( $\epsilon$ ) i temperatury ( $t$ ) obróbki cieplnej odkształconego na zimno spieku z proszku PNC-60 na jego strukturę i własności mechaniczne. Do wyznaczenia funkcji obiektu badań  $w_i = \{R_m, R_{p0,2}, A_5, KC\} = f_i(t, \epsilon)$  zastosowano program statyczny kompletny z następującymi poziomami czynników badanych:  $\epsilon = \{0,17, 0,30, 0,50\}$ ,  $t [^\circ\text{C}] = \{650, 750, 850, 1120\}$ <sup>1</sup> przy liczbie powtórzeń  $r = 2 - 3$ . Czynnikiem stałym (w przybliżeniu) była porowatość końcowa ( $\Theta_1 = 0,09 - 0,12$ ). Odkształcenia plastyczne spiekanych wyprasek realizowano za pomocą ściskania w warunkach zbliżonych do braku tarcia. Wykonano badania metalograficzne i fraktograficzne.



Rys. 1. Wpływ odkształcenia plastycznego na zimno oraz obróbki cieplnej na własności mechaniczne: a) wytrzymałościowe ( $w_w$ ) i b) plastyczne ( $w_p$ ) spieków metali

Fig. 1. Effect of cold plastic deformation and hot treatment on: a) strength properties ( $w_w$ ) and b) plastic properties ( $w_p$ ) of sintered metal

Aby uzyskać założone wartości parametrów  $\epsilon_1$  i  $\Theta_1$ , należało właściwie dobrać porowatości początkowe  $\Theta_0$  oraz odkształcenia rzeczywiste  $\epsilon = \ln(h/h_0)$ , gdzie  $h_0$  i  $h$  oznaczają wysokości: początkową i końcową ściskanej wypraski. Korzystano ze związków

<sup>1</sup> Wyzarzanie w  $1120^\circ\text{C}$  nazywamy ponownym spiekaniem.

$$\Theta_1 = 1 - \left[ \frac{\exp(-k\varepsilon)}{\exp(-k\varepsilon) + \frac{1 - (1 - \Theta_0)^k}{2 + (1 - \Theta_0)^k}} \right]^{\frac{1}{k}}; \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{3} \left| \int_{\Theta_0}^{\Theta_1} \frac{\sqrt{\beta(1+\alpha)}}{\alpha(1-\Theta)^2} d\Theta \right|$$

$$\alpha = \frac{1 - (1 - \Theta)^k}{2 + (1 - \Theta)^k}; \quad \beta = (1 - \Theta)^b$$

Równania powyższe dotyczą jednoosiowego stanu naprężenia, gdy obowiązuje warunek plastyczności:  $3J_2' + \alpha J_1'^2 - \beta \sigma_p(\varepsilon) = 0$  i stowarzyszone prawo płynięcia [2, 4], przy czym:  $\sigma_p(\varepsilon)$  – naprężenie uplastyczniające materiału osnowy,  $J_2'$  i  $J_1'$  – niezmienniki: drugi de-wiatora i pierwszy tensora naprężeń,  $\alpha$  i  $\beta$  – funkcje porowatości. Odształcenie zastępcze osnowy definiuje zależność:  $\sigma_{ij} d\varepsilon_i = \sigma_p(\varepsilon) (1 - \Theta) d\varepsilon$ , porowatość  $\Theta = 1 - m/(V\rho_L)$ , gdzie  $m$ ,  $V$  – masa i objętość próbki,  $\rho_L$  – gęstość osnowy (dla spieku z proszku PNC-60:  $k = 1,94$ ,  $b = 5,26$ ,  $\rho_L = 7,835 \text{ g/cm}^3$  [2]).

### 3.2. Przygotowanie materiału do badań i technika pomiarów

Do wykonania próbek wykorzystano proszek na bazie żelaza PNC-60 firmy Höganäs SA<sup>2</sup> zawierający 0,06% C i 0,6% P, który prasowano w pływającej matrycy, otrzymując kształtki prostopadłościenną o wymiarach  $60 \times 10 \times h_0$  mm. Wypraski spiekano w temperaturze 1120°C w atmosferze wodoru przez 1 h. Ściskanie z prędkością odształcenia ok.  $0,005 \text{ s}^{-1}$  wykonano na prasie AMSLER 100 D66<sup>3</sup> (stosowano przyrząd zapewniający równoległość kowadeł i przekładki z folii teflonowej, oddzielające od siebie powierzchnie próbek i kowadeł, które ponadto pokrywano smarem płynnym z dodatkiem grafitu). Czas wyżarzania lub ponownego spiekania w atmosferze wodoru wynosił 1 h. Część próbek (do badań porównawczych) pozostawiono bez odształceń lub po odształceniu nie stosowano obróbki cieplnej. Ostatecznie z wytworzonych kształtek wykonano standardowe próbki do badań własności mechanicznych (próbki walcowe pięciokrotne do jednoosiowego rozciągania o średnicy odcinka pomiarowego 5 mm wg PN 86/H-04937 i próbki bez karbu do badań udarności wg PN-EN 25754:1997). Próby rozciągania zrealizowano z prędkością przyrostu naprężenia 0,03 MPa/min na maszynie wytrzymałościowej EU20. Stosowano rejestrację komputerową wydłużenia i siły za pomocą autorskiego oprogramowania DasTP. Udarność badano z użyciem młota Charpy'ego 1H539 150 J firmy A. B. ALPHA. Obserwacje i zdjęcia mikrostruktury zostały wykonane z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Nikon Eclipse ME600P na zglądach metalograficznych trawionych 4% roztworem nitalu, zdjęcia przełomów udarnościowych – na mikroskopie skaningowym JEOL JSM 6460LV<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> Proszek PNC-60 otrzymano nieodpłatnie dzięki uprzejmości autoryzowanego przedstawiciela firmy Höganäs SA, Pana Sławomira Kozłowskiego, KOS – Technika.

<sup>3</sup> Dzięki uprzejmości Panów: mgr. inż. Henryka Mroza, kier. ZBZiK oraz inż. Tomasza Foszcza, kier. Pracowni Badań Fizycznych Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych w Krakowie.

<sup>4</sup> Dzięki uprzejmości Pana dr. inż. Piotra Putyry, Zakład Inżynierii Materiałowej Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie.

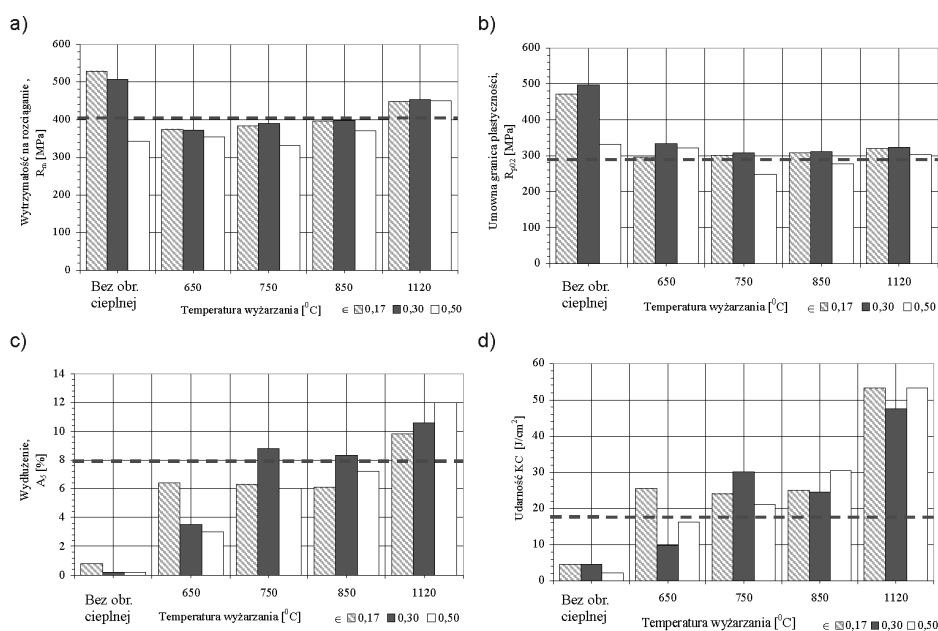
### 3.3. Wyniki badań

Porównanie własności mechanicznych spieków o tej samej (w przybliżeniu) porowatości przedstawiono na rys. 2 (przerwane linie oznaczają własności spieku bez odkształceń i obróbki cieplnej). Na fotografiach 1–3 pokazano przykładowe mikrostruktury i powierzchnie przełomów uzyskanych w próbach udarności. Funkcje obiektu badań  $f_i(t, \epsilon)$  przedstawiono na rys. 3 (aproxymacja wielomianami o postaci:  $f_i(t, \epsilon) = a_{00} + a_{10}t + a_{01}\epsilon + a_{11}t\epsilon + a_{02}\epsilon^2 + a_{12}t\epsilon^2 + a_{21}t^2\epsilon + a_{22}t^2\epsilon^2 + a_{50}t^5$ ).

### 3.4. Omówienie wyników badań i wnioski

Analiza danych zamieszczonych na rys. 2 pozwala na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- odkształcenie plastyczne na zimno spieku wywołało – w stosunku do spieku nieodkształconego o tej samej porowatości – wyraźny wzrost wytrzymałości i granicy plastyczności oraz znaczne obniżenie wydłużenia i udarności,
- podwyższanie temperatury wyżarzania niezależnie od wartości parametru  $\epsilon$  powoduje systematyczny wzrost wydłużenia i udarności,
- po wyżarzaniu w temperaturach 650–850°C dla  $\epsilon = 0,50$  wytrzymałość jest niższa w porównaniu ze spiekami bez odkształceń i obróbki cieplnej (przy tej samej porowatości); wyższe wartości otrzymuje się dopiero po ponownym spiekaniu (w 1120°C).

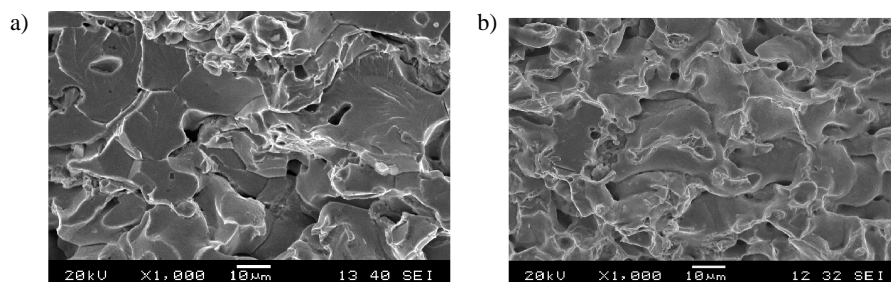


Rys. 2. Własności mechaniczne spieku z proszku PNC-60:  $\Theta_1 = 0,12 \pm 0,01$   
(dla 1120°C:  $\Theta_1 = 0,09 - 0,10$ )

Fig. 2. Mechanical properties of PM PNC-60:  $\Theta_1 = 0,12 \pm 0,01$   
(for 1120°C:  $\Theta_1 = 0,09 - 0,10$ )

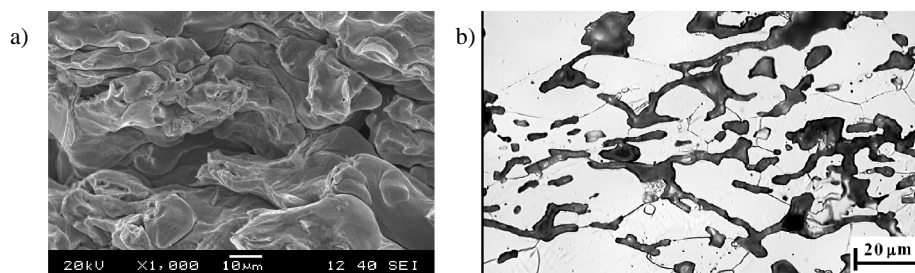
Widoczny (rys. 2 i 3) skomplikowany przebieg badanych zależności jest skutkiem różnorodności i złożoności zjawisk zachodzących w materiale spiekany podczas obróbki plastycznej i cieplnej. Wzmocnieniu odkształceniowemu może towarzyszyć obniżenie spójności na granicach spiekanych cząstek proszku, przez co napężenie uplastyczniające osnowy przy rozciąganiu jest niższe niż obliczone z krzywej wzmocnienia dla aktualnej wartości odkształcenia zastępczego. W czasie wyżarzania lub ponownego spiekania zachodzą jednocześnie i w różnym stopniu procesy zdrowienia, rekrytalizacji, rozrostu ziaren i tworzenia nowych połączeń pomiędzy cząstkami proszku, co w efekcie może spowodować zarówno podwyższenie, jak i obniżenie własności wytrzymałościowych spieku.

Powyższe uwagi znajdują potwierdzenie w wynikach badań metalograficznych i fraktograficznych. Przy małym odkształceniu spieku ( $\epsilon = 0,17$ , fot. 1a)) występuje mechanizm naruszenia spójności odpowiadający głównie pękaniu transkrystalicznemu oraz po granicach cząstek proszku. Wyżarzanie w  $850^{\circ}\text{C}$  (fot. 1b), 3a)) tworzy nowe połączenia między cząstkami proszku i pękanie przebiega w sposób ciągły. Przy  $\epsilon = 0,50$  (fot. 2a)) widoczne są wydłużone i oddzielone od siebie cząstki proszku, co świadczy o ich niskiej spójności po odkształceniu. Po wyżarzaniu (fot. 3b)) otrzymuje się strukturę z ziarnem równosiowym.



Fot. 1. Powierzchnie przełomu w próbie udarności (spiek z proszku PNC-60,  $\epsilon = 0,17$ ,  $\Theta_1 = 0,127$ ): a) bez obróbki cieplnej, b) po wyżarzaniu w  $850^{\circ}\text{C}$

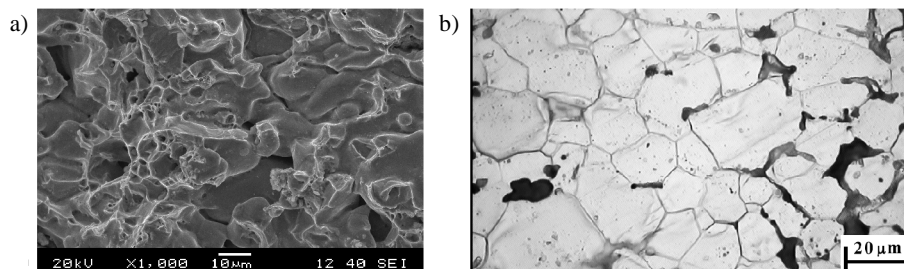
Photo 1. Fracture surfaces in impact-test (PM PNC-60,  $\epsilon = 0.17$ ,  $\Theta_1 = 0.127$ ): a) without heat treatment, b) after annealing in  $850^{\circ}\text{C}$



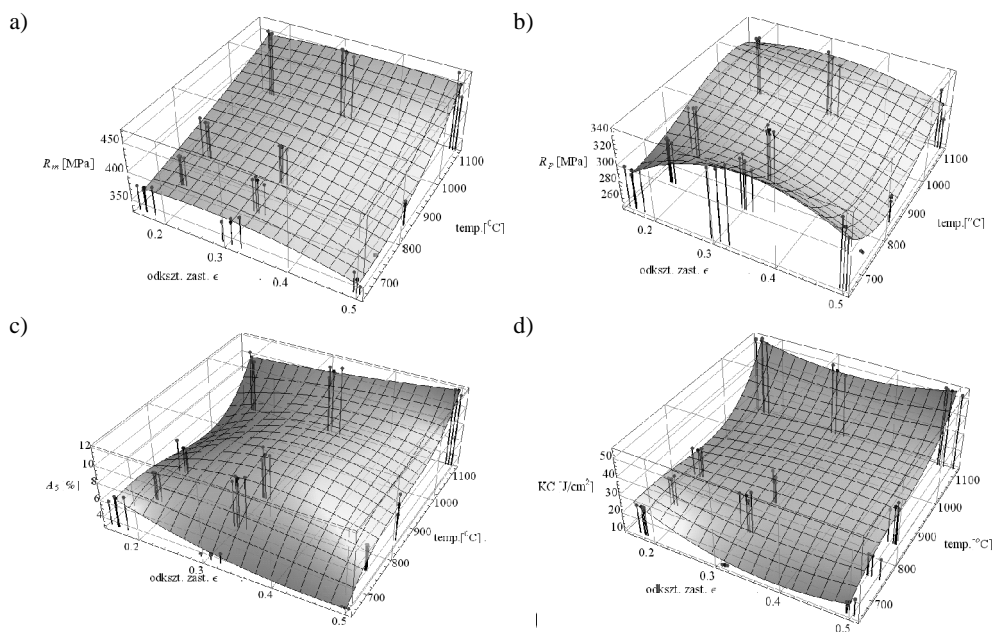
Fot. 2a) Powierzchnia przełomu w próbie udarności, b) mikrostruktura; spiek z proszku PNC-60,  $\epsilon = 0,50$ , bez obróbki cieplnej,  $\Theta_1 = 0,115$

Photo 2a) Fracture surface in impact-test, b) picture of microstructure; PM PNC-60,  $\epsilon = 0.50$ , without heat treatment,  $\Theta_1 = 0.115$





Fot. 3a) Powierzchnia przełomu w próbie udarności, b) mikrostruktura; spiek z proszku PNC-60,  $\epsilon = 0,50$ , wyżarzanie w  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $\Theta_1 = 0,113$   
 Photo 3a) Fracture surface in impact-test, b) picture of microstructure; PM PNC-60,  $\epsilon = 0.50$ , annealing in  $850^{\circ}\text{C}$ ,  $\Theta_1 = 0.113$



Rys. 3. Funkcje  $f_i(t, \epsilon)$  dla: a) wytrzymałości na rozciąganie, b) umownej granicy plastyczności, c) wydłużenia, d) udarności (spiek z proszku PNC-60,  $\Theta_1 = 0,09 - 0,12$ )  
 Fig. 3. Functions  $f_i(t, \epsilon)$  for: a) tensile strength, b) yield strength, c) unit elongation, d) impact resistance (PM PNC-60,  $\Theta_1 = 0.09 - 0.12$ )

Obróbka cieplna (wyżarzanie rekrytalizujące lub ponowne spiekanie) ma korzystny wpływ na własności mechaniczne odkształconego plastycznie na zimno spieku. Otrzymuje się znacznie wyższe wartości wydłużenia i udarności oraz zbliżone lub wyższe własności wytrzymałościowe w porównaniu ze spiekem o tej samej porowatości niepoddanym odkształceniom i obróbce cieplnej.

Otrzymane zależności funkcyjne opisujące zależności własności mechanicznych spieku od odkształcenia zastępczego osnowy i temperatury obróbki cieplnej pozwalają na prognozowanie własności badanego spieku i mogą być przydatne podczas projektowania procesów obróbki plastycznej i cieplnej.

#### Literatura

- [1] German R.M., *Powder Metallurgy of iron and steel*, John Wiley & Sons Inc., New York 1998.
- [2] Kiełkucki H., Okoński S., Polański Z., *Charakterystyki materiałowe kształtowanych plastycznie spieków metali*, Projekt KBN nr 7 T 08 D 00910/1996.
- [3] Kosoń-Schab A., *Własności mechaniczne odkształconych plastycznie spieków metali*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [4] Okoński S., *Podstawy plastycznego kształtowania materiałów spiekanych z proszków metali*, Monografia 153, Politechnika Krakowska, Kraków 1993.
- [5] Szczepanik S., *Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków i kompozytów*, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2003.
- [6] Zarębski K., Okoński S., Putyra P., *Wpływ odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne porowatych spieków metali*, *Archiwum Odlewnictwa* 21, Katowice 2006.
- [7] Zarębski K., Okoński S., Putyra P., *Mechanical properties of PNC-60 sintered metal after cold plastic deformation and heat treatment*, *Czasopismo Naukowe; Висник Хмельницького національного університету* №4 '2007, Kamieniec Podolski 2007.
- [8] Zarębski K., *Wpływ wielkości odkształcenia i temperatury wyżarzania na udarność spieku PNC-60*, Wydawnictwo Naukowe „Jakość w nauczaniu i przedsiębiorczości”, Chrzanów–Kraków 2008, 257-264.