

dr inż. Jarosław SAMOLCZYK  
Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

# Wyznaczanie naprężeń własnych w wyrobach metalowych metodą rentgenowską

## *Determination of stresses in metal products by the x-ray method*

### **Streszczenie**

Rentgenograficzne metody pomiaru makronaprężeń są powszechnie stosowane w badaniach, nie tylko próbek polikrystalicznych, lecz również w częściach maszyn. Omówiono zagadnienia naprężeń własnych materiałów polikrystalicznych. Pokazano zasady pomiaru naprężeń własnych przy zastosowaniu goniometru typu EG 4/201 w klasycznej dyfraktometrycznej tzw. *metodzie  $\sin^2\psi$* . Na podstawie zapisów dyfrakcyjnych obliczono wartości naprężeń własnych. Przebiegi naprężeń własnych są zgodne pod względem charakteru jak i wartości, z przebiegami wyznaczonymi przez innych autorów.

### **Abstract**

*X-ray methods of macrostress measurement are widely applied not only for polycrystalline samples but also for parts of machines. In this paper principles of internal stress measurement using EG 4/201 goniometer and  $\sin^2\psi$  method have been described. Internal stresses have been calculated based on diffractogram patterns. The results obtained in this work are in good agreement with those obtained by others.*

**Słowa kluczowe:** odkształcenie, makronaprężenia, metoda  $\sin^2\psi$ , rentgenowskie stałe sprężystości, profile linii dyfrakcyjnych

**Key words:** strain, macrostresses,  $\sin^2\psi$  method, X-ray elastic constants, profiles of diffraction lines

## **1. WSTĘP**

Rentgenowskie metody pomiarów naprężeń są powszechnie stosowane w badaniach naukowych, kontroli technicznej materiałów i wyrobów oraz ekspertyzach naukowo-technicznych. Jest to związane z postępem w dziedzinie aparatury (automatyzacja, wspomaganie komputerowe) i zwiększeniem możliwości interpretacji dyfraktogramów.

W wielu procesach technologicznych: obróbce mechanicznej, obróbce plastycznej, odlewaniu, obróbce cieplnej i cieplno-chemicznej, spawaniu i zgrzewaniu, wytwarzaniu powłok dyfuzyjnych i cienkich warstw, montażu lub eksploatacji maszyn i urządzeń technicznych powstają różne stany naprężeń, w istotny sposób zmieniające wytrzymałość materiału. Mogą to być zmiany korzystne lub niekorzystne wpływające

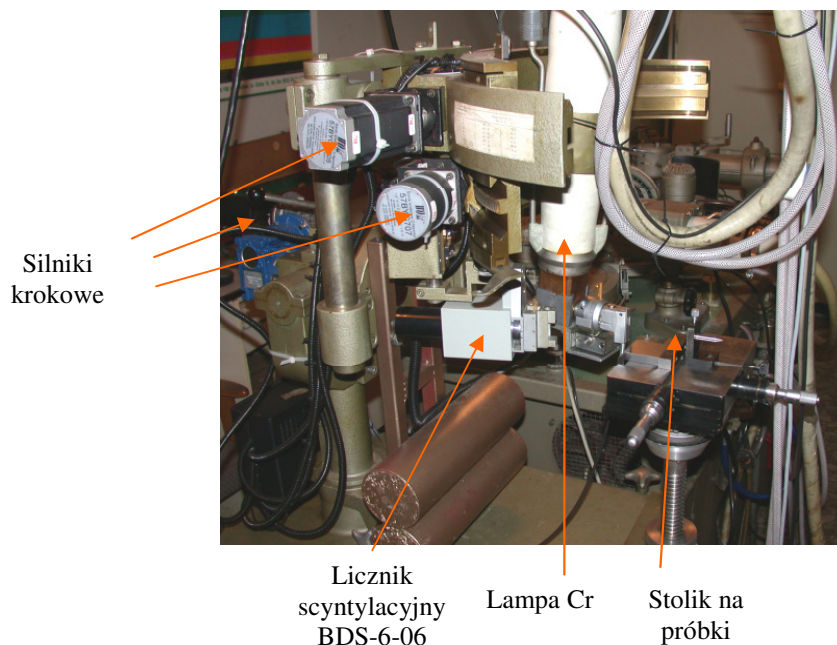
na zmęczenie, pękanie i zużycie materiałów oraz trwałość urządzeń.

Naprężenia własne są to ogólnie naprężenia pozostałe w materiale po zaprzestaniu działania sił, powodujących jego odkształcenie. Naprężenia własne mają istotny wpływ na zachowanie się konstrukcji.

Wśród metod pomiarowych określone miejsce zajmuje rentgenograficzna metoda pomiaru naprężeń tzw.  $\sin^2\psi$ .

## **2. MODERNIZACJA GONIOMETRU DO POMIARU NAPRĘŻEŃ EG 4/201**

W Zakładzie Badania Metali znajduje się dyfraktometr rentgenowski Kristalloflex – 4 firmy Siemens z goniometrem do pomiaru naprężeń EG 4/201. Dotychczasowy zapis para-



Rys. 1. Zmodernizowany goniometr do pomiaru naprężeń własnych

Fig. 1. Modernized goniometer for measurement of internal stresses

metrów pomiarowych uległ awarii, a sterowanie goniometrem do pomiaru naprężeń odbywało się ręcznie.

Wykonano modernizację goniometru EG 4/201 do pomiaru naprężeń. Zastosowano krokowy przesuw detektora w goniometrze oraz numeryczną postać zapisu wyników pomiaru. Opracowano programy do rejestracji makronaprężeń i analizy wyników. Wykonana modernizacja przyspiesza wykonywanie prac i zwiększa dokładność wykonywanych pomiarów.

Goniometr EG4/201 do rejestracji obrazu dyfrakcyjnego w geometrii  $\sin^2\psi$  po modernizacji pokazuje rys. 1.

### 3. BADANIA WŁASNE

#### 3.1. Materiał do badań

Badania przeprowadzono na żelazie ARMCO w postaci proszkowej (odprężony proszek), stali X210Cr12, stali X37CrMoV5-1 i stopie aluminium AlZn6Mg2Cu. Składy chemiczne badanych materiałów przedstawiono tablicy 1.

Tablica 1. Skład chemiczny badanych materiałów

Table 1. Chemical composition of the investigated materials

Materiał	Skład chemiczny, (%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	
Żelazo ARMCO	0,029	0,022	0,156	0,018	0,003	—	—	
X210Cr12	1,9÷2,0	0,10÷0,60	0,20÷0,60	11,0÷13,0	—	0,60÷0,80	—	
X37CrMoV5-1	0,33÷0,41	0,80÷1,20	0,25÷0,50	4,80÷5,50	1,10÷1,50	—	0,30÷0,50	
AlZn6Mg2Cu	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
	0,5	0,5	1,4÷2,0	0,2÷0,6	1,8÷2,8	0,1÷0,25	5,0÷7,0	reszta

### 3.2. Metodyka badania naprężeń własnych

Pomiary przeprowadzono na dyfraktometrze rentgenowskim Kristalloflex 4 firmy Siemens z goniometrem Eg 4/201. Zastosowano dyfraktometryczną metodę pomiaru naprężeń tzw. metodę  $\sin^2\psi$ .

### 3.3. Pomiary kontrolne

Pomiary kontrolne przeprowadzono na odprężonym proszku żelaza ARMCO. Do analizy wybrano refleks (211) widoczny przy promieniowaniu  $Cr_{K\alpha}$ . Wyniki zaprezentowano w tabelicy 2. Wynika z niej, że zastosowane procedury pomiarowe dla goniometru EG 4/201 umożliwiają pomiar odległości międzypłaszczyznowej z dokładnością  $\pm 0.00001 \text{ \AA}$  i w tych granicach nie zmieniają się przy próbcie wzorcowej (bez naprężeń).

Tablica 2. Wyniki badań sprawdzających poprawność procedury pomiaru na proszku żelaza ARMCO (odprężony proszek)

Table 2. The results of checking investigations of the measurement procedure correctness on ARMCO iron powder (stress relieved powder)

Lp.	$\psi$ [°]	$d$ [Å]	$2\theta$ [°]
1	-51	1,17351	154,643
2	-45	1,17350	154,648
3	-39	1,17351	154,646
4	-33	1,17350	154,649
5	-27	1,17350	154,650
6	-18	1,17350	154,651
7	0.0	1,17350	154,650

### 3.4. Parametry zapisów dyfrakcyjnych do pomiaru naprężeń

Zapisy dyfrakcyjne wykonano stosując:

- promieniowanie  $Cr_{K\alpha}$ ,
- napięcie lampy 45kV,
- natężenie 16 mA,
- szczelinę ograniczającą wiązkę pierwotną  $DS = 0,5^\circ$ ,

- szczelinę przyjmującą licznika  $SS = 0,2 \text{ mm}$ ,
- zakres zapisów dyfrakcyjnych:  $135^\circ \div 137^\circ$ ,  $154^\circ \div 157^\circ$ , z krokiem  $0,05^\circ$  i czasem zliczania  $INT = 30 \text{ s}$ ,
- zmianę kątów  $\psi = -51^\circ, -45^\circ, -39^\circ, -33^\circ, -27^\circ, -18^\circ, 0^\circ$ .

Otrzymane profile linii dyfrakcyjnych dla: żelaza i stali (211) oraz stopu aluminium PA9 (311), wygładzono, odejmowano tło, odejmowano składową  $\alpha_2$ , a następnie wyznaczono maksimum, z których liczono odległość międzypłaszczyznową  $d_{221}$  i  $d_{311}$  stanowiącą podstawę do obliczeń naprężeń. Stałe sprężystości dla badanych próbek przyjęto z danych literaturowych:

- dla żelaza ARMCO –  $s_1 = 1,35$ ,  $\frac{1}{2} s_2 = 6,06$  [5];
- dla stali X210Cr12 –  $s_1 = 1,07$ ,  $\frac{1}{2} s_2 = 5,30$  [5];
- dla stali 36CrMoV5-1 –  $s_1 = 1,15$ ,  $\frac{1}{2} s_2 = 5,62$  [5];
- dla stopu aluminium PA9 –  $s_1 = 2,11$ ,  $\frac{1}{2} s_2 = 5,63$  [6].

### 3.5. Wyniki badań

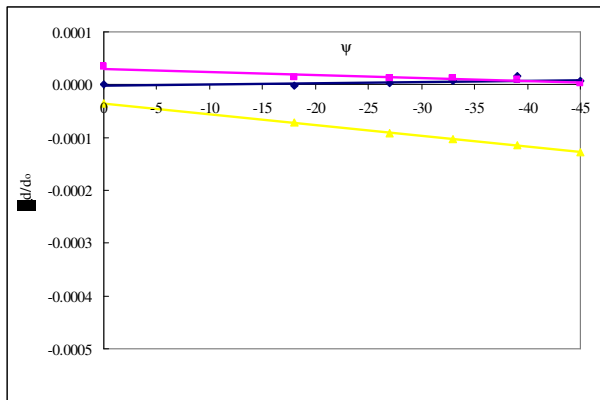
Na podstawie przeprowadzonych zapisów dyfrakcyjnych w postaci wykresów  $\Delta d/d_0 = f(\Psi)$  (rys. 2÷5) obliczono wartość naprężeń własnych, które przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Wyniki pomiarów naprężeń w badanych materiałach

Table 3. The results of stress measurements in the investigated materials

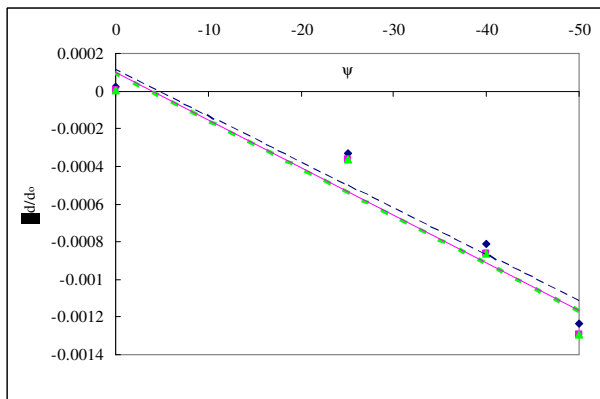
Materiał	Wartość naprężenia [MPa]			
	$\sigma_{\varphi=90^\circ}$	$\sigma_{\varphi=0^\circ}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
ARMCO (E04J)	+13	+19	+22	+14
X210Cr12	-368	-352	-357	-372
X37CrMoV5-1	+77	-153	-188	+44
AlZn6Mg2Cu	-116	-395	-260	+18

gdzie:  $\sigma_{\varphi=90^\circ}$  - naprężenie w kierunku  $\varphi = 90^\circ$ ,  
 $\sigma_{\varphi=0^\circ}$  - naprężenie w kierunku  $\varphi = 0^\circ$ ,  
 $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  - naprężenia główne.



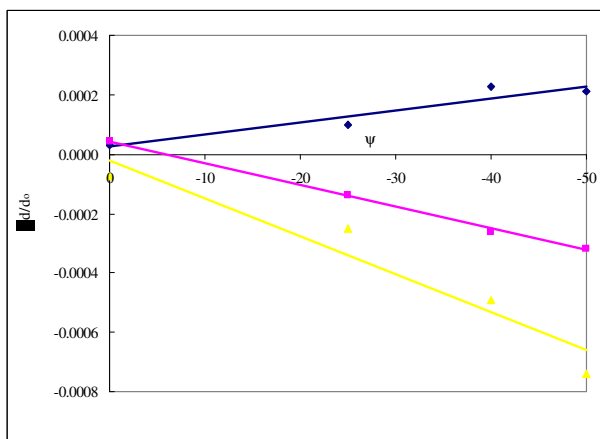
Rys. 2. Wykres zależności  $\Delta d/d_0 = f(\Psi)$  dla żelaza ARMCO (odprężony proszek)

Fig. 2.  $\Delta d/d_0 = f(\psi)$  relationship for ARMCO iron (stress relieved powder)



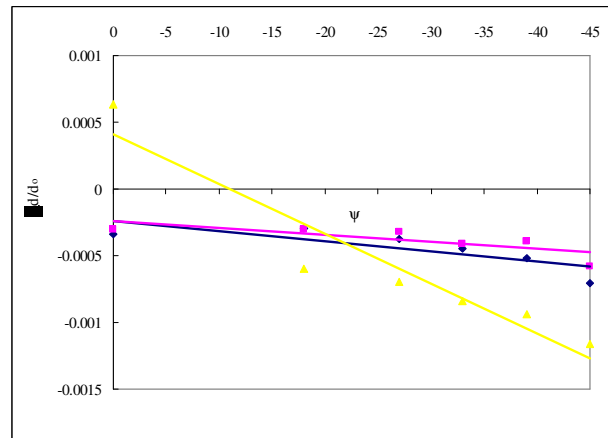
Rys. 3. Wykres zależności  $\Delta d/d_0 = f(\Psi)$  dla stali X210Cr12

Fig. 3.  $\Delta d/d_0 = f(\psi)$  relationship for steel X210Cr12



Rys. 4. Wykres zależności  $\Delta d/d_0 = f(\Psi)$  dla stali X37CrMoV5-1

Fig. 4.  $\Delta d/d_0 = f(\psi)$  relationship for steel X37CrMoV5-1



Rys. 5. Wykres zależności  $\Delta d/d_0 = f(\Psi)$  dla stopu aluminium AlZn6Mg2Cu

Fig. 5.  $\Delta d/d_0 = f(\psi)$  relationship for aluminium alloy AlZn6Mg2Cu

#### 4. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Badanie zerowego stanu naprężeń własnych wykonano na preparacie proszkowym żelaza ARMCO. Próbkę wykonano z luźnego proszku w stanie wyżarzonym. Jak widać z rys. 2 (współczynnik kierunkowy krzywych bliski zera) i tablicy 3 w próbce z żelaza ARMCO różnice zmierzonego naprężenia oscylują około 20 MPa. Wyniki należy uznać za prawidłowe, ponieważ mieszczą się w granicach dokładności pomiarowej goniometru  $\pm 40$ MPa.

Stale X210Cr12, X37CrMoV5-1 po obróbce cieplnej mają zróżnicowane naprężenia własne. W stalach tych na końcowy stan naprężeń własnych mają wpływ czynniki obróbki mechanicznej (szlifowanie) przeprowadzone po obróbce cieplnej oraz stopień przemiany austenitu szcążkowego.

Makroskopowe naprężenia własne w stopie aluminium PA9 (po walcowaniu) posiadają duży gradient w kierunkach określonych orientacją wektorów dyfrakcyjnych, ze względu na dużą teksturę w kierunku wzdłużnym.

#### 5. WNIOSKI

Wyniki pomiarów i obliczeń naprężeń własnych w różnych materiałach pozwalają na stwierdzenie, że dyfrakcyjna metoda  $\sin^2\psi$  jest w pełni dopracowana i przydatna do pomiarów

makronaprężeń własnych. Na podstawie przedstawionych interpretacji wyników badań, można sformułować następujące wnioski:

- podstawowe zalety dyfrakcyjnej metody  $\sin^2\psi$  to pomiar bezwzorcowy i nieniszczący charakter badań,
- metoda  $\sin^2\psi$  jest szczególnie przydatna w pomiarze gradientowych naprężeń własnych,
- metoda  $\sin^2\psi$  umożliwia pomiar naprężeń głównych,
- metodę  $\sin^2\psi$  można zastosować do mierzenia wartości naprężeń własnych każdej fazy w materiale wielofazowym,
- metoda  $\sin^2\psi$  umożliwia doświadczalny pomiar stałych sprężystości przy użyciu przystawki umożliwiającej otrzymanie naprężeń o znanych wielkościach,
- otrzymane przebiegi naprężeń własnych są zgodne pod względem charakteru jak i wartości z przebiegami przedstawionymi w pracach innych autorów,
- niekorzystną cechą goniometru EG4/201 w kontekście innych geometrii dyfrakcji jest ograniczony zakres kątów  $\varphi \in (0^\circ \div 90^\circ)$ ,  $\psi \in (-10^\circ \div +60^\circ)$  i  $2\theta \in (110^\circ \div 160^\circ)$ ,
- główne źródło błędów pomiarowych związane jest z niedokładnym ogniskowaniem (przesunięcie płaszczyzny próbki względem osi goniometru).

Pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki: **BM 901 78 002** – Wyznaczanie naprężeń własnych w wyrobach metalowych metodą rentgenowską.

## LITERATURA

- [1] *Dehlinger U., Kochendörfer A., Z. Kristall*, 101 (1939) 134.
- [2] *Dehlinger U., Kochendörfer A., Z. Metallkunde*, 31, (1939) 231.
- [3] *Davidenkov N.N., Rentgenografija*, wyd. Mašgis (1951).
- [4] *Senczyk D., „Rentgenowskie metody i techniki badania struktury materiałów”*, wyd. Politechniki Poznańskiej (1984).
- [5] *Senczyk D., „Rentgenograficzne stałe sprężyste niektórych stali konstrukcyjnych i narzędziowych oraz żelaza ARMCO”*, Zesz. Nauk. Politechniki Poznańskiej, Mechanika, 1990, nr 34, s. 65.
- [6] *Bierwirth G., Die industrielle Anwendung der röntgenographischen Spannungsmessung*, Der Maschinenmarkt (1961), nr 4.