

Dominik Senczyk
Politechnika Poznańska

O MOŻLIWOŚCI NIENISZCZĄCEGO BADANIA ZMIAN SKŁADOWYCH NAPRĘŻENIA NA GŁĘBOKOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ MATERIAŁÓW POLIKRYSTALICZNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania stanów naprężeń metodą rentgenograficzną i magnetoelastyczną na różnych głębokościach warstwy wierzchniej stali węglowej. Porównano wyniki pomiarów naprężeń tymi metodami, stwierdzając istotną korelację liniową. W badaniach tych stosowano trzy własne oryginalne programy komputerowe.

Резюме. В работе представлены исследования состояний напряжений рентгенографическим и магнитоупругим методами на разных глубинах верхнего слоя углеродистой стали. Сравнены результаты измерений напряжений этими методами констатируя существенную линейную корреляцию.

Summary. In the paper stress states investigations by x-ray and magnetoelastic method on different depths in surface layer of carbon steel are presented. Results of stress measurements by those methods were compared and good linear correlation was found. In those investigations three self-original computer programs were applied.

1. WPROWADZENIE I CEL PRACY

Znane są przypadki występowania znacznych gradientów naprężeń w warstwie wierzchniej materiałów. Pomiarów tych wielkości należałoby dokonywać metodami nieniszczącymi jak również określać gradienty składowych tensora naprężenia. Z tych powodów rozważono dalej dwie takie metody pomiaru naprężeń: rentgenograficzną i magnetoelastyczną. Z ich pomocą dokonano wstępnych badań stanów naprężeń na różnych głębokościach warstwy wierzchniej stali 55. Jednocześnie porównano uzyskane wyniki pomiarów naprężeń tymi metodami. Stanowi to jedno z bardzo niewiele w ogóle przeprowadzonych w tym zakresie badań.

2. BADANY MATERIAŁ I METODYKA POMIARÓW NAPRĘŻEŃ

Badaniom poddano płaskie próbki ze stali 55 w stanie ulepszonym cieplnie i szlifowane z różną grubością skrawanej warstwy w różnych warunkach chłodzenia. W pomiarach naprężeń metodą rentgenograficzną stosowano dyfraktometr rentgenowski typu PSF-1M firmy Rigaku-Japonia oraz trzy własne programy komputerowe [1,2]:

- program "Pomiar naprężenia w zadanym kierunku metodą $\sin^2\psi$ ",
- program "Pomiar naprężeń głównych metodą $\sin^2\psi$ ",
- program "Pomiar składowych tensora naprężenia".

W pomiarach naprężeń metodą magnetosprężystą stosowano urządzenie "Stresscan 500 C" firmy American Stress Technologies - USA. Pomiar tą metodą był dokonywany na głębokości 20, 70 i 200 μm . Pierwsza z nich jest bardzo bliska głębokości wnikania stosowanego promieniowania rentgenowskiego, wynoszącej dla badanej stali około 16 μm .

3. PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW NAPRĘŻEŃ METODĄ RENTGENOGRAFICZNĄ I MAGNETOSPRĘŻYSTĄ

W celu porównania wyników pomiarów naprężeń metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą dokonano tymi metodami w badanych próbkach pomiaru naprężenia w zadanym kierunku i naprężeń głównych. Wyniki otrzymane po odpowiednich przeliczeniach z wykorzystaniem własnych programów komputerowych zestawiono w tablicy 1 i 2.

Tablica 1

Naprężenia w zadanym kierunku [MPa] zmierzone metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą w próbkach stali węglowej

σ_ϕ [MPa]	Metoda rentgenograficzna	Metoda magnetosprężysta
$\sigma_\phi = 0^\circ$	90,52	81,15
$\sigma_\phi = 45^\circ$	50,37	43,56
$\sigma_\phi = 90^\circ$	10,06	4,61

Porównując wartości zestawione w tablicy 1 i 2, stwierdzamy dobrą zgodność wyników pomiaru naprężeń metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą. Z tego

względu postanowiono z pomocą programu STATGRAPHICS v.4.0 ocenić korelację tych wyników pomiarów. Dokonana analiza regresji i wariancji wykazała istotność liniowej zależności funkcyjnej między σ_{rtg} i σ_{magn} (σ_{rtg} i σ_{magn} - naprężenia wyznaczone odpowiednio metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą). Okazuje się, że w przypadku wyznaczania naprężenia w zadanym kierunku metodą $\sin^2\psi$ zależność ta ma postać:

$$\sigma_{rtg} = 1,05112 \sigma_{mag} + 5,00652, \quad (1)$$

przy czym współczynnik korelacji wynosi $r = 0,999$, natomiast w przypadku wyznaczania naprężeń składowych płaskiego stanu naprężenia przyjmuje ona postać:

$$\sigma_{rtg} = 1,16402 \sigma_{mag} + 2,66624, \quad (2)$$

przy czym współczynnik korelacji wynosi $r = 0,997$.

Analiza ta potwierdza istotność liniowej korelacji wyników pomiarów naprężeń metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą.

Tablica 2

Naprężenia główne [MPa] zmierzone metodą rentgenograficzną i magnetosprężystą w próbkach stali węglowej.

σ [MPa]	Metoda rentgenograficzna	Metoda magnetosprężysta
σ_{11}	100,20	82,30
σ_{22}	49,45	43,21
σ_{12}	10,37	5,09

4. NIENISZCZĄCE BADANIA ZMIAN SKŁADOWYCH NAPRĘŻENIA NA GŁĘBOKOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ STALI

W celu oceny możliwości nieniszczącego badania zmian składowych naprężenia na głębokości warstwy wierzchniej dokonano metodą rentgenograficzną pomiaru składowych tensora naprężenia w trzech próbkach stali S5 szlifowanych z różną grubością skrawanej warstwy i w różnych warunkach chłodzenia. Uzyskane wyniki pomiaru podano w tablicy 3.

Analizując dane w tablicy 3 można wyciągnąć szereg ważnych wniosków. Otóż naprężenia σ_{i3} ($i = 1, 2, 3$) na powierzchni próbki muszą przyjmować wartość

zerową, co pozwala na oszacowanie ich zmiany z głębokością. Przyjmując najprostsza postać zależności naprężenia od głębokości:

$$\sigma_{13} = g_{13} \cdot z, \quad (3)$$

gdzie g_{13} jest gradientem naprężenia σ_{13} , a z - głębokością, możemy wyznaczyć gradient g_{13} naprężenia σ_{13} . Wartości tych gradientów podano w tabelicy 4.

Tabela 3

Składowe tensora naprężenia zmierzone metodą rentgenograficzną w szlifowanych próbkach stali węglowej

Nr próbki	1	2	3
Chłodzenie	bez	emulsja	emulsja
Grubość warstwy skrawanej [μm]	5	5	10
σ_{11} σ_{12} σ_{13}	408 - 15 60	390 14 63	534 - 3 70
σ_{21} σ_{22} σ_{23}	- 15 416 7	14 306 - 1	- 3 468 - 4
σ_{31} σ_{32} σ_{33}	60 7 108	63 - 1 93	70 - 4 95
[MPa]			

Tabela 4

Gradienty niektórych składowych tensora naprężenia

g_{13}	3,75	3,77	4,37
g_{23} [$\frac{\text{MPa}}{\mu\text{m}}$]	0,43	- 0,06	- 0,25
g_{33}	6,75	5,64	5,93

Z tabelicy 4 widać, że gradienty tych naprężeń rzeczywiście zmieniają się w istotny sposób.

Ze względu na istotność zmian gradientów naprężeń σ_{13} na głębokości badanej warstwy wierzchniej postanowiono szerzej zająć się problemem pomiaru gradientu składowych tensora naprężenia na głębokości warstwy wierzchniej materiałów polikrystalicznych.

Przystępując do opracowania powyższego problemu wykorzystano zależność wiążącą odkształcenie sieci krystalicznej $\epsilon_{\phi, \psi}$, zmierzone w kierunku wyznaczonym przez współrzędne sferyczne $r = 1$, ϕ i ψ , ze składowymi $\epsilon_{..}$ tensora

odkształcenia [3]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\phi, \psi} = & \left(\epsilon_{11} \cos^2 \phi + \epsilon_{12} \sin 2\phi + \epsilon_{22} \sin^2 \phi - \epsilon_{33} \right) \sin^2 \psi + \epsilon_{33} + \\ & + \left(\epsilon_{13} \cos \phi + \epsilon_{23} \sin \phi \right) \sin 2\psi. \end{aligned} \quad (4)$$

Wyliczone dalej składowe tensora naprężenia są oczywiście wartościami uśrednionymi po głębokości wnikania stosowanego promieniowania rentgenowskiego o danej długości fali:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(z=0) + \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(z=0) + \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z}{\tau}\right) g_{ij}(z) dz, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: $\sigma_{ij}(z=0)$ - naprężenie na powierzchni próbki,

$g_{ij}(z)$ - gradient składowej σ_{ij} na głębokości z ,

τ - głębokość wnikania promieniowania o długości fali λ ,

z - bieżąca głębokość.

Dalsze rozważania wskazują, że naprężenie to można wyrazić wielomianem:

$$\langle \sigma \rangle = \sum_1^i K_{1j} \left(\frac{\cos \psi}{2\mu_0} \right)^j, \quad (6)$$

gdzie: K_1 - stała, przy czym $\sigma(z=0) = K_0$,

μ_0 - liniowy współczynnik osłabienia promieniowania.

Z uwagi na objętość i uciążliwość obliczeń postanowiono opracować specjalny program komputerowy "Pomiar gradientu składowych tensora naprężenia". Przewidziano w nim wyrażenie tych składowych dowolnym wielomianem aż do piątego stopnia włącznie. Wyznaczone współczynniki K_{1j}^i tego wielomianu są właśnie szukanymi gradientami. Program jest obecnie poddawany testowaniu mającemu na celu sprawdzenie poprawności jego działania i stąd jego skrótowe omówienie.

PODSUMOWANIE

Podsumowując wyniki powyższych badań dochodzimy do następujących wniosków:

- stwierdzono istotną korelację wyników pomiarów naprężeń metodą magnetosprężystą i rentgenograficzną, przy czym dla badanej stali 55 określają ją zależności (1) i (2),
- w pomiarach naprężeń metodą rentgenograficzną zastosowano trzy własne, specjalnie opracowane, programy komputerowe:
 - program "Pomiar naprężenia w zadanym kierunku metodą $\sin^2 \psi$ ".

- program "Pomiar naprężeń głównych metodą $\sin^2\psi$ ",
 - program "Pomiar składowych tensora naprężenia",
- stwierdzając ich pełną przydatność w tych pomiarach. Programy te znacznie przyspieszają żmudne i czasochłonne obliczenia przy tych pomiarach,
- c) metoda magnetosprężysta umożliwia bardzo szybki pomiar naprężeń, w tym na trzech ustalonych głębokościach materiału,
- d) osiągnięte rezultaty wskazują na celowość podjęcia badań, których wynikiem będzie szczegółowa metodyka nieniszczącego pomiaru gradientu składowych tensora naprężenia w warstwie wierzchniej materiałów zarówno metodą rentgenograficzną, jak i metodą magnetosprężystą.

LITERATURA

- [1] Senczyk D.: Pomiary makronaprężeń metodami rentgenograficznymi, Politechnika Poznańska, seria: Rozprawy, nr 194, stron 145, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1988.
- [2] Senczyk D.: Computerization of measurement of components of a stress tensor, XIVth Conference on Applied Crystallography, Proceedings, v.2 pp. 441-444, Silesian University in Katowice and Institute of Ferrous Metallurgy in Gliwice, Cieszyn - Poland, August 5-8, 1990.
- [3] Glocker R.: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg - New York 1971.

ON THE POSSIBILITY OF NONDESTRUCTIVE INVESTIGATIONS OF CHANGES OF STRESS COMPONENTS IN DEPTH OF SURFACE LAYER OF POLYCRYSTALLINE MATERIALS

Two nondestructive methods of macrostress measurement (x-ray and magnetoelastic method) were considered. Stress states investigations by those methods were made in different depths of surface layer of carbon steel. Results of stress measurements by those methods were compared too. X-ray diffractometer PSF-1M from Rigaku-Japan and device "Stresscan 500C" from American Stress Technologies-USA were used. Results of stress measurements by x-ray and magnetoelastic method are presented in Table 1 and Table 2. Good linear correlation of the measurements was found. It is described by relation (1) and (2).

Components of stress tensor were measured by x-ray method. Gradient of σ_{13} components was estimated on the ground of equation (3). Method of measurement of all components of stress tensor (equations (4), (5) and (6)) were shortly presented too. Three self-original computer programs were used in all x-ray investigations.