ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1993

Seria: MECHANIKA z.113 Nr kol. 1198

Dominik SENCZYK

Instytut Metaloznawstwa
Politechnika Poznańska

PRÓBA SYSTEMOWEJ CHARAKTERYSTYKI METOD POMIARU NAPRĘŻEŃ NA PRZYKŁADZIE METOD RENTGENOGRAFICZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono analizę i badania dotyczące różnych kryteriów pomiarów naprężeń metodami rentgenograficznymi. Zaliczono do nich: precyzję, dokładność, czułość, wykrywalność, powtarzalność, odtwarzalność, wydajność, szybkość i uniwersalność rentgenograficznych metod pomiaru makronaprężeń. Teoretyczna analiza i doświadczalne badania pozwoliły na uzyskanie szeregu nowych wniosków wskazujących na możliwość zwiększenia lub zapewnienia określonej dokładności pomiaru makronaprężeń metodami rentgenograficznymi.

MACROSTRESS MEASUREMENT METHODS SYSTEM CHARACTERIZATION TRIAL ILLUSTRATED BY X-RAY METHODS

Summary. Analysis and investigations concerning different criterions of X-ray macrostresses measurement methods are described. The fallowing criterions are reckoned among them: precisision, accuracy, sensitivity, detectability, reproductibility, repeatability, efficiency, velocity and versatility of X-ray stress methods. Theoretical analysis and experimental investigations have allowed to obtain several new conclusions indicating on possibility of increase or ensure of a determined accuracy for macrostress measurement by X-ray methods.

ПОПЫТКА СИСТЕМНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Резюме. Описали анализ и исследования разных критерев рентгенографических измерений макронапряжений. Рассуждили следующие критерия: прецизию, точность, чувствительность, обнаруживаемость, повторяемость, воспроизводимость, производительность, скорость и универсалность рентгенографических методов измерения макронапряжений. Теоретический анализ и экспериментальные исследования сделали возможным получение ряда новых выводов указываемых возможность увеличения или обеспечения определённой точности измерения макронапяжений рентгенографическими методами.

1. WPROWADZENIE I CEL PRACY

W każdym eksperymencie można wyróżnić dwa podstawowe elementy: przedmiot badania i metodę badawczą. Mimo tak ważnej roli metody badawczej, na ogół poświęca się mało uwagi analizie jej możliwości i przydatności w konkretnych warunkach. Uwagi te dotyczą również metod pomiaru naprężeń - w tym metod rentgenograficznych. Dlatego też wydaje się celowe omówienie przynajmniej takich ich cech, które odgrywają decydującą rolę przy wyborze lub ocenie danej metody, projektowaniu eksperymentu lub nawet poszukiwaniu źródeł niepowodzeń nie dość starannie zaprojektowanych lub wykonanych doświadczeń. Cechy te charakteryzują następujące pojęcia: dokładność, precyzja, czułość, wykrywalność, powtarzalność, odtwarzalność, wydajność, szybkość i uniwersalność. Do opisu tych cech rentgenograficznych metod pomiaru naprężeń zastosowano pojęcia cybernetyki.

2. CHARAKTERYSTYKA RENTGENOGRAFICZNYCH METOD POMIARU NAPRĘŻEŃ

Traktując metodę badawczą jako generator błędów losowych, możemy każdą metodę scharakteryzować wariancją. W celu wyznaczenia praktycznie osiąganej precyzji pomiaru naprężeń dla szeregu gatunków stali dokonano 11 pomiarów wartości naprężeń 100 MPa i 200 MPa i wyznaczono ich odchylenie standardowe. Badania wykazały, że wartości te są zawarte między 5 MPa i 18 MPa. Za kres górny błędu bezwzględnego przyjęto potrójną wartość odchylenia standardowego. Obliczone wartości błędu są dla badanych materiałów zawarte między 15 MPa i 53 MPa. Z pomocą pojęć cybernetycznych definiujemy czułość metody badania jako stosunek zmiany sygnału na wyjściu tej metody do wywołującej je zmiany sygnału na jej wejściu, co prowadzi do następującego wzoru dla metod rentgenograficznych:

$$C = \left| \frac{d(\Delta\Theta)}{d\sigma} \right| . \tag{1}$$

Z jego pomocą określono czułość różnych rentgenograficznych metod, otrzymując:

a) dla metody dyfraktometrycznej pomiaru naprężenia jednoosiowego:

$$C_{\sigma_1} = - s_1 \mathrm{tg}\Theta_0 , \tag{2}$$

b) dla metody Sachsa-Weertsa pomiaru sumy naprężeń głównych:

$$C_{\sigma_1+\sigma_2} = - s_1 \mathrm{tg}\Theta_0 - \frac{1}{4} s_1 \mathrm{tg}\Theta_0 \sin^2\eta , \tag{3}$$

c) dla metody $\sin^2\psi$ pomiaru naprężenia w zadanym kierunku:

$$C_{\sigma_\phi} = \frac{1}{2} s_2 \mathrm{tg}\Theta_0 \sin^2\psi , \tag{4}$$

d) dla metody Glockera-Hessa-Schaabera pomiaru naprężenia w zadanym kierunku:

$$C_{\sigma_\phi} = \frac{1}{2} s_2 \mathrm{tg}\Theta_0 \sin^2\psi \quad \sin 2\Theta_0, \tag{5}$$

e) dla metody Gisena-Glockera-Osswalda pomiaru naprężenia w zadanym kierunku:

$$C_{\sigma_\phi} = \frac{1}{2} s_2 \mathrm{tg}\Theta_0 \sin^2\psi , \tag{6}$$

f) dla metody Δ pomiaru naprężenia w zadanym kierunku:

$$C_{\sigma_\phi} = - \frac{1}{2c} s_2 \sin^2\psi , \tag{7}$$

g) dla metody $\sin^2\psi$ pomiaru naprężeń głównych dla płaskiego stanu naprężeń:

$$C_{\sigma_1} = \left| - \mathrm{tg}\Theta_0 \left(\frac{1}{2} s_2 \cos^2\phi \sin^2\psi + s_1 \right) \right| \tag{8}$$

$$C_{\sigma_2} = \left| - \mathrm{tg}\Theta_0 \left(\frac{1}{2} s_2 \sin^2\phi \sin^2\psi + s_1 \right) \right|, \tag{9}$$

h) dla metody Δ pomiaru naprężeń głównych dla płaskiego stanu naprężeń:

$$C_{\sigma_1} = \left| c^{-1} \left(\frac{1}{2} s_2 \cos^2\phi \sin^2\psi + s_1 \right) \right| \tag{10}$$

$$C_{\sigma_2} = \left| c^{-1} \left(\frac{1}{2} s_2 \sin^2\phi \sin^2\psi + s_1 \right) \right|, \tag{11}$$

gdzie : s_1, s_2 - stałe sprężyste, Θ_0 - położenie kątowe linii dyfrakcyjnej dla próbki bez naprężeń, $\eta = \frac{\pi}{2} - \Theta_0$, ϕ - kąt zawarty między rzutem na płaszczyznę XOY układu współrzędnych kierunku pomiaru naprężenia i kierunkiem działania naprężenia σ_1, ψ - kąt nachylenia osi wiązki promieni rentgenowskich względem powierzchni płaskiej próbki, σ_1, σ_2 - naprężenia główne, σ_ϕ - naprężenie mierzone w kierunku wyznaczonym przez kąt ϕ, c - stała dla metody Δ. Wzory te pozwalają na ocenę czułości danej metody pomiaru w konkretnych warunkach doświadczenia. Na przykład dla metody Glockera-Hessa-Schaabera ze wzoru (5) wynika, że maksymalną czułość otrzymuje się przy kącie $\psi = 45^\circ$. Jednocześnie poprzednio stwierdzono, że w tym przypadku względny błąd pomiaru naprężenia ma wartość minimalną. Oba

powyższe fakty jednoznacznie uzasadniają celowość stosowania w pomiarach tej wartości kąta ψ. Wybór jej był dotąd wyłącznie przypadkowy.

Za miarę wykrywalności naprężeń metodami rentgenograficznymi można przyjąć określoną krotność odchylenia standardowego. W ten sposób wykrywalność naprężenia σ_1 jest równa:

$$W=1,960\sigma_1\left[\left(\frac{2}{\sin 2\theta_o}-\frac{\mathrm{ctg}\theta_o}{\sigma_1 s_1}\right)^2\sigma^2(\theta_o)+\frac{\sigma^2(s_1)}{s_1^2}+\right.$$

$$\left.+\left(\frac{\mathrm{ctg}\theta_o}{\sigma_1 s_1}\right)^2\sigma^2(\theta_\perp)\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (12)$$

gdzie $\theta_\perp$ jest położeniem kątowym linii dyfrakcyjnej próbki naprężonej przy prostopadłym padaniu wiązki promieni. Analiza tego wzoru prowadzi do szeregu wniosków metodycznych, potwierdzonych badaniami doświadczalnymi. Powtarzalność charakteryzuje stopień zgodności wyników kolejnych pomia- rów tej samej wielkości, wykonywanych przez tego samego obserwatora w danym laboratorium, w tych samych warunkach i za pomocą tych samych narzędzi i metod pomiarowych. Miarą zgodności wyników pomiarów jest precyzja metody i stąd też omawiane metody charakteryzuje dobra powtarzalność.

Pod pojęciem odtwarzalności pomiarów rozumie się precyzję metody, będącą miarą zgodności wyników osiąganych w przypadku różnych wykonawców pracujących w różnych laboratoriach lub w tym samym laboratorium w różnych okresach, przy czym każdy z nich otrzymuje indywidualne wyniki podczas pomiarów tej samej wielkości z pomocą różnych metod i różnych narzędzi pomiarowych. Badania doświadczalne odtwarzalności pomiarów ustalonych naprężeń (stale gatunku 25 i 45, goniometr HZG-4 (NRD) i dyfraktometr "Strainflex" PSF-1M firmy Rigaku - Japonia). Stwierdzono, że odchylenie standardowe mierzonych naprężeń dla tych materiałów jest zawarte między 5,5 MPa i 8,0 MPa, a kres górny błędu bezwzględnego między 16,5 MPa i 24,0 MPa. Oznacza to dobrą odtwarzalność pomiarów naprężeń w ustalonych warunkach doświadczalnych.

Przeprowadzona analiza wykazała, że metoda rentgenograficzna realizowana z pomocą konwencjonalnych dyfraktometrów jest metodą mało wydajną i wolną, natomiast przy stosowaniu specjalnych dyfraktometrów staje się metodą wydajną oraz szybką.

Metody rentgenograficzne są metodami uniwersalnymi ze względu na badane

stany naprężeń, natomiast wykazują ograniczenie tej cechy ze względu na badane materiały (badane są tylko materiały krystaliczne). Umożliwiają one badania gradientów naprężeń oraz pomiary składowych tensora naprężenia. Mogą być również w pełni zautomatyzowane z komputerowym sterowaniem doboru warunków.

3. PODSUMOWANIE

Na przykładzie rentgenograficznych metod pomiaru naprężeń pokazano, jak w sposób kompleksowy można scharakteryzować daną metodę badawczą. Przedstawione zależności pozwalają na analizę tej charakterystyki dla konkretnych warunków doświadczalnych, co prowadzi do naukowego (a nie intuicyjnego, jak dotychczas) wyboru odpowiedniej metody pomiaru.

Opierając się na przedstawionych wyżej rozważaniach można również opisać inne metody pomiaru naprężeń, wyprowadzając odpowiednie zależności.

Praca nniniejsza w części była finansowana z funduszów Komitetu Badań Naukowych w ramach projektu nr 7-7031-92-03.

Recenzent: Prof. Antoni Jakubowicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 22. 09. 1992

Abstract

In all experiments two fundamental elements may be distinguished: subject of the experiment and the experimental method. Despite the importance of experimental method in every experiment, in general the analysis of its possibilities and their usefullness in real conditions is underestimated. This comment refers also to stress methods. Thus it seems reasonable to comment an at least such properties which play an important role in the selection or estimation of the method in the projection of the experiment or even in looking for the source of failure in inaccurately projected or realized experiments. The properties are characterized first of all by the following parameters: accuracy, precision, sensitivity, detectability, reproduct-

ibility, repeatability, efficiency, velocity and versatility of X-ray stress methods. In this paper the above mentioned parameters in case of X-ray methods are described and analyzed. Experiments show that the standard deviation values of measured stresses are between 5 MPa and 18 MPa. The values of an absolute error for steels investigated are between 15 MPa and 53 MPa. Cybernetical model leads to the Equation (1) for sensitivity of the X-ray stress methods. Using this formula the sensitivity of different X-ray stress methods were determination (Equations (2)-(11)). E. g. for Glocker--Hess-Schaaber method a maximal sensitivity is obtained for $\psi = 45^{\circ}$. In the previous experiments it was found that in this case measurement error is minimal. Both these facts account for the usefulness of this ψ value in measurements. A choice of this value, till now, was only accidental. Detectability of uniaxial stress is given by the Equation (12). Analysis of sensitivity and detectability od stresses leads to many conclusions which indicates the possibility of increasing or keeping the accuracy of measuring stresses by X-ray methods. The presented characterization of X-ray stress methods with a cybernetical model shows that the precision and accuracy of this method is compatible with the values obtained by other experimental stress methods. The given relations enables us to evaluate the sensitivity of the presented methods for definite experimental conditions. These relations lead to a scientific (not intuition) selection of the right method.