



NEW POSSIBILITIES OF X-RAY STRESS MEASUREMENT APPLICATION IN SOLUTION OF ENGINEERING PROBLEMS

NOVÉ MOŽNOSTI APLIKACE RENTGENOVÉ TENZOMETRIE PRO ŘEŠENÍ PRŮMYSLVÝCH PROBLÉMŮ

Ganev Nikolaj, Kraus Ivo

X-ray tensometers find wide variability of applications in a number of industrial fields. The paper contains

- ◆ a brief survey of various kinds of portable and small size X-ray systems for the determination of mechanical stresses,
- ◆ the results of the residual stress analysis on the surface of shot-peened carbon steel samples by means of the equipment for measurement "in situ" and in "research laboratory conditions".

Keywords: residual stress, X-ray tensometry, portable devices

1. Obecná charakteristika současného stavu rentgenografické tenzometrické techniky

Protože podstata rentgenové tenzometrie spočívá v přesném určení deformací vzdáleností zvoleného systému atomových mřížkových rovin, musí požadavek dosažení vysoké přesnosti měření splňovat i použitá zařízení. V úvahu přicházejí jak uspořádání s fotografickou, tak počítačovou registrací difraktovaného záření.

Současný trend v oblasti přístrojové báze rentgenové tenzometrie je charakterizován novou detekční technikou (polohově citlivé detektory umožňují zvýšit rychlost měření), výkonnými rentgenkami, miniaturizací detektorů a mnohostrannými aplikacemi mikropočítačů pro řízení experimentů i k vyhodnocování difrakčních spekter.

2. Přenosné rentgenové tenzometry

Aby se difrakční metody staly součástí provozní kontroly technologie, musí poskytovat dostatečně přesnou informaci za dobu, která je pro průmyslový výrobní proces přijatelná. Základní informace o této oblasti experimentální analýzy napětí podává následující přehled prototypů i seriově vyráběných přístrojů.

2.1 Difraktometry

a) Jedním z prvních typů mobilních rentgenových tenzometrů bylo uspořádání z roku 1969 označované *FASTRES*. Jeho základem jsou dvě rentgenky a dvě dvojice pohyblivých detektorů k lokalizaci polohy difrakčního profilu. Aparaturu lze k měřeným vzorkům dopravit na podvozku, pro reprodukovatelnost stanovení napětí je jako příklad udávána hodnota ± 20 MPa.

b) Dalším často citovaným přenosným rentgenovým tenzometrem je *PARS (Portable Analyser for Residual Stresses)* vybavený polohově citlivým detektorem a vzduchem chlazenou miniaturní (6 cm dlouhou) rentgenkou s rotující anodou. Přesnost měření prototypem tohoto analyzátoru na různých výrobcích ze železných materiálů nebyla nižší než ± 35 MPa při době měření $(4 \div 20)$ s. Celé zařízení má hmotnost $7 \div 10$ kg.

c) Japonské difraktometry

Tyto difraktometry, využívající pro laboratorní měření napětí i k tenzometrické analýze "in situ" techniku paralelního svazku, byly uvedeny na trh japonskými firmami Toshiba (např. modely MDR-103, MDR-112, MP-103), Rigaku (MSP, RSP, Strainflex, MSF-11 M), Shimadzu (SMX-50).

Jednotlivé typy se navzájem liší druhem detektoru, stupněm automatizace, konstrukčními zvláštnostmi, jímž odpovídají různé rozsahy difrakčních úhlů, a vzdáleností ohniska rentgenky od vzorku ($100 \text{ mm} \div 150 \text{ mm}$). Měření jedné hodnoty napětí netrvá déle než několik minut.

d) Difraktometry Siemens

Pro měření napětí v objektech velkých rozměrů byly firmou Siemens vyráběny dva druhy speciálních difraktometrů. Starší typ (Goniometer für Spannungsmessungen) měl hmotnost cca 150 kg, nový typ SMD 2000 (Spannungsmess-Difraktometer) má pouhých 24 kg. Intenzita difraktovaného záření se dá detektovat počítačem proporcionálním, scintilačním nebo polohově citlivým.

e) *Canmet Portable Stress Diffractometer* zkonstruovaný v Canada Centre for Mineral and Energy Technology je vybaven dvěma polohově citlivými proporcionálními detektory a

miniaturní rentgenkou (délka 10 cm, průměr tubusu 3 cm) s vodním chlazením. Činnost difraktometru řídí počítač, přesnost měření charakterizuje hodnota ± 15 MPa.

f) *Denver High-Speed X-Ray Stress Analysis System* s polohově citlivými scintilačními detektory je vyráběn firmou DXII (Denver X-ray Instruments, Inc.) ve dvou typech: laboratorní D 100L a mobilní D 1000M. Na ocelích i hliníkových slitinách je podle výrobce možné změřit jednu hodnotu napětí s přesností asi 7.5 MPa za 1 minutu.

2.2 Aparatury s fotografickou registrací záření

K výzkumu napětí ve strojních dílech i konstrukcích libovolných velikostí byly vyvinuty komory upevněné přímo na krytu rentgenky s dostatečně dlouhým vysokonapěťovým kabelem nebo malé přenosné zdroje záření, jejichž rozměry a hmotnost umožňují volbu různých úhlů dopadu primárního svazku na povrch zkoumaných objektů. V provozních podmínkách našly uplatnění např. tyto aparatury s detekcí rentgenového záření na film:

a) *Přenosný mikrostrukturální rentgen-Kristalloflex 2H (Siemens)* s obdélníkovou kazetou na krytu rentgenky, dovolující aplikovat všechny klasické rentgenografické tenzometrické metody. Hmotnost celého zařízení je cca 100 kg.

b) *Přenosná aparatura pro měření napětí vyrobená na Sankt-Peterburské státní technické univerzitě*

Sestava o hmotnosti 20 kg má tyto části: monoblok tvořený zdrojem vysokého napětí a rentgenkou se dvěma anodami, automatický denzitometr k vyhodnocování hustoty zčernání difrakčních diagramů, zařízení na vyvolávání filmů přímo v kazetě, aparatura na elektrolytické leptání povrchu zkoumaného objektu. Doba potřebná ke stanovení jedné povrchové složky napětí není delší než 5 minut, udávaná přesnost měření $\Delta\sigma = 10^{-4}$ E (E je Youngův modul elasticity analyzovaného materiálu).

c) *Přenosný rentgenový tenzometr KIKT (Krasnojarský institut kosmické techniky)*

Nejdůležitější částí zařízení je dvouanodová rentgenová lampa, která umožňuje bez komplikovaných goniometrických mechanismů splnit geometrické podmínky metody "dvou expozic". Protože anody není třeba chladit vodou, dá se s přístrojem měřit přímo "v terénu". Soupravu tvoří zářič s kazetou na film a ovládací panel. Kazeta je zkonstruována tak, aby bylo možné detektovat záření difraktované na určitém systému atomových mřížkových rovin skloněných k povrchu vzorku pod úhlem 50° a zároveň i na rovinách s povrchem rovnoběžných. Zářič s kazetou má rozměry $480 \times 320 \times 300$ mm² a ovládací panel $480 \times 440 \times 200$ mm². Celková hmotnost činí cca 6 kg. Zařízení je schopné provozu při teplotách od -10°C do $+40^\circ\text{C}$. Jako zdroj energie lze použít i akumulátor 24 V.

2.3 Československé prototypy zařízení k rentgenografické analýze napětí v objektech o rozměrech do 15 cm

a) MIKRON - Chirana Praha

Základem konstrukce přístroje, patentovaného již v roce 1961, je schema zdvojeného rentgenového goniometru: záření dopadající ze dvou zdrojů na povrch vzorků pod úhly 90° a 45° se detektuje dvěma proporcionálními počítači. Ozářená plocha má rozměry $7.5 \times 15 \text{ mm}^2$, chyba měření na vzorcích vyžíhaných ocelí nepřekročila 30 MPa.

b) Rentgenový tenzograf SVÚM

Hlavní částí aparatury je goniometr pro registraci difraktovaného záření bodovým detektorem. Konstrukce vychází z modifikovaného uspořádání "tečného" (Seemannova-Bohlinova) goniometru. Chyba rentgenografického stanovení známého stavu jednoosé tahové napjatosti (102 MPa) byla cca 1%.

3. Srovnávací měření daného stavu zbytkové napjatosti různými rentgenografickými tenzometrickými technikami

Zkoumaný materiál:

Normalizačně žíhaný vzorek uhlíkové oceli ČSN 12 050.1; povrchová napjatost byla vyvolána balotínováním skleněnými kuličkami o průměru $0.20 \div 0.25 \text{ mm}$.

Použité metody měření:

- ♦ Metoda " $\sin^2\psi$ " (klasický laboratorní goniometr Siemens), záření CoK_α , detekce linie $\{220\}$ scintilačním detektorem, plocha ozářeného povrchu $12 \times 3 \div 5 \text{ mm}^2$; hodnota napětí $\sigma = -327 \text{ MPa}$ nezávislých na azimutu měření.
- ♦ Metoda "jedné expozice bez referenční látky" (mobilní rtg. aparatura Kristalloflex 2H), záření CrK_α , detekce linie $\{211\}$ na film, ozářená plocha cca 2 mm^2 ; střední hodnota napětí získaná v 52 bodech povrchu při různých azimutech byla (-355 MPa) .
- ♦ Metoda "dvou expozic" (přenosný rentgenový tenzometr vyrobený v KIKT), záření CrK_α , detekce linie $\{211\}$ na film, ozářená plocha povrchu 3 mm^2 , napětí v náhodně zvoleném směru $\sigma = -350 \text{ MPa}$.

Hodnoty napětí stanovené uvedenými rentgenografickými tenzometrickými metodami jsou ve velmi dobrém souhlasu. Použitá povrchová úprava - balotínování - může být v daném případě zcela jednoznačně charakterizována homogenním centrálně symetrickým stavem zbytkové napjatosti.

Ing. Nikolaj Ganev, CSc., Prof. RNDr. Ivo Kraus, DrSc. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, tel. 849951