RENTGENOVÉ TENZOMETRICKÉ METODY VHODNÉ PRO APLIKACE V PODMÍNKÁCH PRŮMYSLOVÉ PRAXE

Nikolaj Ganev, Ivo Kraus, Rudolfa Králová

Příspěvek uvádí stručný přehled rtg tenzometrických metod studia dvojosého stavu napjatosti na povrchu polykrystalických materiálů. Diskutované postupy lze provádět fotografickou registrací difraktovaného záření nezávisle na tvaru a rozměrech zkoumaných objektů. Popsané metody měření zbytkových napětí jsou v rtg laboratoři katedry inženýrství pevných látek FJFI ČVUT v Praze používány k řešení rozmanitých problémů řady československých strojírenských podniků.

Rentgenografická technika měření zbytkových napětí klade relativně vysoké nároky na experimentální vybavení potřebné k realizaci obecných metod rtg tenzometrie. Díky vývoji měřicí a výpočetní techniky, k němuž došlo zvláště v posledních letech, lze však dnes v čs.průmyslové praxi spolehlivě uplatnit i některé zjednodušené postupy difrakční tenzometrické analýzy.

1. Metoda "$\sin^2\psi$"

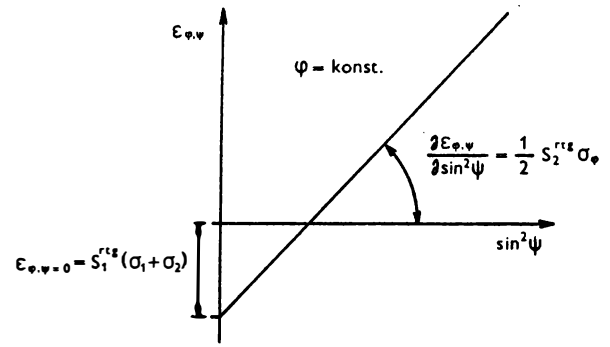
Zatímco při obvyklé napěťové analýze jsou měřeny makroskopické deformace, má rtg tenzometrie základ ve stanovení změn vzdáleností atomových mřížkových rovin $\{hkl\}$, které byly vyvolány působícím napětím.

Podle lineární teorie elasticity je deformace ve směru určeném úhly φ (vzhledem k hlavnímu napětí σ_1) a ψ (vzhledem k povrchové normále) za předpokladu $\sigma_3 = 0$ daná vztahem [1]

$$(1) \quad \varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1}{2} s_2^{rtg} \cdot \sigma_\varphi \cdot \sin^2\psi + s_1^{rtg}(\sigma_1 + \sigma_2),$$

$$(2) \quad \sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2\varphi + \sigma_2 \sin^2\varphi \quad ,$$

kde $\frac{1}{2} s_2^{rtg} = (\nu + 1)/E$, $s_1^{rtg} = -\nu/E$ jsou rentgenografické elastické konstanty. Rovnice (1) je analytickým vyjádřením metody "$\sin^2\psi$" .



Obr.1 Grafické vyjádření metody "$\sin^2\psi$"

Pro deformace $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ platí v každém azimutu φ = konst. závislosti znázorněné na obr.1. Na základě experimentálních průběhů $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ se tedy dají stanovit složky napětí σ_φ a součet hlavních napětí $\sigma_1 + \sigma_2$.

2. Metoda určení součtu hlavních napětí $\sigma_1 + \sigma_2$

Touto nejstarší a nejjednodušší rtg tenzometrickou metodou lze určit [2]

- při dvojosé napjatosti ($\sigma_1 \neq \sigma_2$) hodnotu $\sigma_1 + \sigma_2$,
- při centrálně symetrické dvojosé napjatosti ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_\varphi$) hodnotu napětí $\sigma_\varphi = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ v libovolném směru φ na povrchu,
- při jednoosé napjatosti ($\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = 0$) hodnotu $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_1$.

Ze vztahu (1) plyne pro $\psi = 0^o$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 1/s_1^{rtg} \cdot \varepsilon_{\varphi,\psi=0^o} \qquad (3)$$

Je zřejmé, že ke stanovení $\sigma_1 + \sigma_2$ postačuje pouze znalost deformace mřížkových rovin rovnoběžných s povrchem materiálu. V praxi může být tato informace získána z jednoho rentgenogramu zhotoveného Debyeovou-Scherrerovou metodou v uspořádání s kolmým dopadem rtg záření na povrch vzorku.

3. Metoda "jedné expozice" pro stanovení σ_φ

K sestrojení lineární závislosti $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ (obr.1), z níž pak lze určit σ_φ, jsou potřebné experimentální hodnoty alespoň ze dvou měření provedených při různých úhlech ψ_1, ψ_2. Dosadíme-li do vztahu (1) $\psi_1 \neq \psi_2 \neq 0$, pak po odečtení $\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}$ máme :

$$(4) \qquad \sigma_\varphi = \frac{1}{\frac{1}{2} s_2^{rtg}} \; \frac{\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}}{\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2}$$

Při uspořádání Debyeovy - Scherrerovy metody na zpětný odraz s fotografickou registrací difraktovaného záření je vztah (4) používán k výpočtu napětí σ_φ pomocí tenzometrické metody "jedné expozice" [3].

Tento postup, vycházející pouze ze dvou experimentálních hodnot $\varepsilon_{\varphi,\psi}$, se nevyznačuje vysokou přesností určení σ_φ. Pro praxi však mají smysl hlavně ty rtg metody měření napětí, které dávají rychlou informaci. Metoda "jedné expozice" splňuje tento požadavek vzhledem k tomu, že k jejímu provedení postačuje pro určení σ_φ zhotovit jeden rentgenogram zpětného odrazu.

V případě, že primární svazek záření dopadá na povrch zkoumaného vzorku pod úhlem 45°, lze na základě (4) odvodit vztah:

$$(5) \qquad \sigma_\varphi \doteq \frac{\operatorname{ctg}\vartheta_0}{\frac{1}{2} s_2} \cdot \frac{\cos^2 2\vartheta_0}{2\sin 2} \cdot \frac{r_1 - r_2}{D}$$

kde ϑ_0 - Braggův úhel reflexe (hkl) odpovídající nenapjatému stavu materiálu $\eta = 90° - \vartheta_0$, D je vzdálenost film - vzorek; veličiny r_1, r_2 (viz obr.2) udávají excentricitu interferenční linie napjatého materiálu vzhledem k ose primárního svazku, která určuje střed filmu.

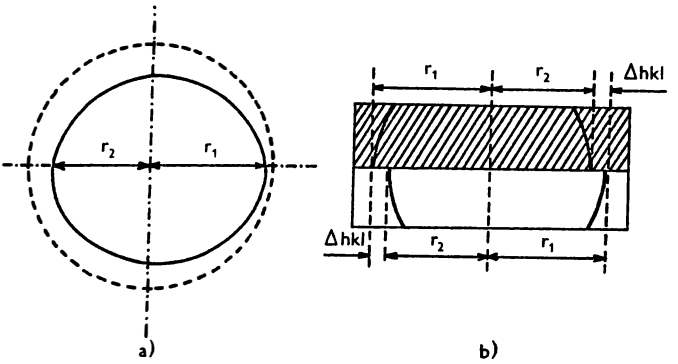
Zavedeme-li označení

$$\Delta^{hkl} = r_1 - r_2 \; ; \quad K = \frac{\operatorname{ctg}\vartheta_0}{\frac{1}{2} s_2} \cdot \frac{\cos^2 2\vartheta_0}{2\sin 2\eta} \; ,$$

bude

$$(6) \qquad \sigma_\varphi = K \frac{\Delta^{hkl}}{D}$$

Veličina K je při sledování reflexe (hkl) na daném materiálu vždy kladnou konstantou. Předpokládáme-li navíc D = konst., pak z (6) plyne, že napětí σ_φ je úměrné velikosti Δ^{hkl} .



Obr.2 Schéma difrakčního obrazu u metody "jedné expozice"

Protože není možné stanovit polohu středu filmu, nelze určit Δ^{hkl} přímým měřením r_1 a r_2. Jeden ze způsobů, jak tuto nesnáz obejít, spočívá v tom, že před expozicí zacloníme horní polovinu filmu (viz obr.2b) maskou absorbující difraktované záření. Po ukončení expozice otočíme kazetu s filmem o 180° kolem osy primárního svazku, horní polovinu opět zacloníme a znovu exponujeme. Nespojitosti průběhu difrakční linie na obou stranách snímku odpovídají veličině Δ^{hkl} ve vztahu (6).

Z obrázku 2 je patrné, že uvedená metoda umožňuje zároveň rychlou kvalitativní informaci o přítomnosti zbytkových napětí na studovaném povrchu vzorku. Přesným numerickým vyhodnocením difrakčních diagramů lze docílit reprodukovatelnost stanovení σ_φ lepší než 30 MPa [4].

Literatura:

[1] Kraus,I.:Úvod do strukturní rentgenografie,Academia,Praha 85
[2] Kraus,I.,Trofimov,V.V.:Rentgenová tenzometrie,Academia
[3] Kraus,I.,Nehasil,M.:Strojírenství, 23, 1973, 12, 752
[4] Ganev,N.,Kraus,I.:Sborník z 8.konference čs.fyziků, 1985