

PRINCIP RENTGENOVÉ TENZOMETRIE A MOŽNOSTI JEJÍHO VYUŽITÍ V TECHNICKÉ PRAXI

Doc. RNDr. Ivo Kraus, CSc.

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Praha

Jednou z řady praktických aplikací rentgenové difrakto-
metrie je měření zbytkových napětí v polykrystalických
kovových materiálech. Tato napětí doprovázejí každý mecha-
nický, tepelný nebo chemický proces, při němž dochází v
materiálu k trvalé změně tvaru některých částí jeho obje-
mu. Plastické deformace, podmiňující vznik zbytkových na-
pětí, mohou být vyvolány různými příčinami. Podle nich
lze rozlišovat napětí tepelná, deformační, transformační
apod. Jiné kritérium klasifikace umožňují efekty, jimiž
se napětí projevují při měření určitou experimentální
technikou. V rentgenové difrakční analýze mají napětí
vliv na polohu, šířku, případně na intenzitu čar difrak-
čního spektra.

Technicky nejdůležitější zbytková napětí, tzv. napětí
makroskopická (napětí I. druhu), jsou přibližně homogenní
(konstantní co do směru i velikosti) v makroskopické ob-
lasti materiálu. U polykrystalického kovu se takovou
oblastí rozumí objem srovnatelný s objemem většího počtu
krystalků. Vnitřní síly odpovídající zbytkovým napětím
I. druhu nabývají rovnováhy vzhledem ke každému řezu ce-
lým tělesem stejně jako momenty vnitřních sil vzhledem
k libovolné ose procházející tělesem. Porušením této rov-
nováhy vznikají vždy změny makroskopických rozměrů těle-
sa. Na difrakčních diagramech se makroskopická zbytková
napětí projevují takovým posunem difrakčních linií, kte-
rý lze vhodným rozřezáním zkoumaného objektu odstranit.

Vložená ani zbytková napětí nelze stanovit přímo,
ale zprostředkovaně výpočtem z relativní deformace. Na
rozdíl od makroskopických měření se v rentgenové tenzo-
metrii určuje deformace vzdáleností d určitých atomových

rovin vhodně orientovaných krystalků povrchové vrstvy napjatého polykrystalického materiálu. Tyto deformace lze vypočítat z posunu difrakčních linií, tj. ze změny úhlu θ , při němž dojde na zvolených rovinách v nena-
pjatém (d_0, θ_0) a napjatém (d, θ) stavu k reflexi rent-
genových paprsků:

$$(1) \delta\theta = \theta - \theta_0 = -\operatorname{tg} \theta_0 \cdot \frac{d-d_0}{d_0} = -\operatorname{tg} \theta_0 \cdot \frac{\delta d}{d_0}$$

Jelikož pro danou deformaci je $\delta\theta$ tím větší, čím větší je θ_0 , provádí se měření nejčastěji v tzv. oblasti zpět-
ného odrazu (θ_0 v intervalu od $\approx 70^\circ$ do $\approx 85^\circ$). Tloušť-
ka vrstvy, jejíž reflektující krystalky přispívají ke
vzniku difrakčního obrazu, závisí na typu zkoumaného ma-
teriálu a vlnové délce použitého záření. Při dostatečně
velkém objemovém zastoupení krystalků více fází v objemu
zasaženém svazkem rtg. paprsků lze principiálně získat
zároveň informace o napjatosti různých složek dané sou-
stavy.

Podle lineární teorie elasticity je deformace ve
směru určeném úhly φ (vzhledem k hlavnímu napětí σ_1 a
hlavní deformaci ε_1) a ψ (vzhledem k σ_3, ε_3 resp. k
povrchové normále) dán vztahem

$$(2) \varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2}s_2[(\sigma_1 \cos^2\varphi + \sigma_2 \sin^2\varphi) - \sigma_3] \sin^2\psi + s_1(\sigma_1 + \sigma_2 - \frac{\sigma_3}{\nu}),$$

kde $\frac{1}{2}s_2 = (\nu + 1)/E$, $s_1 = -\nu/E$ jsou Voigtovy elastické
konstanty, $E, \nu \dots$ Youngův modul elasticity a Poissono-
vo číslo. *

Ztotožníme-li při daném stavu napjatosti deformace
 $\varepsilon_{\varphi\psi}$ vypočtené podle (2) s deformacemi $(\frac{\delta d}{d_0})_{\varphi\psi}$, které
rentgenograficky naměříme v různých směrech φ, ψ , pak je
zřejmé, že vhodnou kombinací více měření lze provést u
zkoumaného objektu difrakční napětovou analýzu. Protože
však deformace meziatomových vzdáleností jsou měřeny
vždy ve směru kolmém ke zvoleným krystalovým rovinám,
nelze do (2) dosazovat izotropní Voigtovy konstanty, ale
speciální rentgenografické hodnoty $s_1^{rtg}, 1/2s_2^{rtg}$. Na vol-

ném povrchu, kam dopadají rentgenové paprsky, je stav napjatosti nejvýše dvojosý ($\sigma_3 = 0$), takže (2) přejde do tvaru

$$(3) \quad \varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2} s_2^{rtg} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + s_1^{rtg} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$$

Působí-li tedy v dostatečně tlusté povrchové vrstvě materiálu dvojosý stav napjatosti, konstantní co do směru i velikosti, můžeme ze změřené závislosti $\varepsilon_{\varphi\psi}(\sin^2 \psi)$ stanovit složku napětí σ_{φ} i součet hlavních napětí $\sigma_1 + \sigma_2$.

Aplikace tohoto postupu, nazývaného metoda " $\sin^2 \psi$ ", je korektní při splnění následujících předpokladů v povrchové vrstvě zkoumaného objektu zasažené rentgenovým svazkem:

- 1) Konstantní stav napjatosti; hlavní osy napětí jsou rovnoběžné s povrchem.
- 2) Náhodná orientace krystalků (izotropie)
- 3) Homogenita - vyloučení soustav s fázemi velmi odlišných elastických konstantách.

Jak ukazuje praxe, představuje překážku pro užití metody " $\sin^2 \psi$ " pouze nesplnění prvních dvou z uvedených předpokladů. I pro tyto případy byly však v posledních letech vyvinuty vhodné difrakční metody.

Současný stav techniky rentgenové tenzometrie umožňuje stanovit vložena i zbytková napětí v součástkách komplikovaného geometrického tvaru a prakticky neomezených rozměrů. Difrakční metodou lze určit napětí na velmi malých elementech povrchu zkoumaných vzorků, měřit gradienty napětí a získat informace o okamžitých hodnotách napětí v objektech vystavených cyklickému namáhání.