

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Ivo Kraus

Současný stav metodiky difrakčního měření makroskopických napětí

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 31 (1986), No. 6, 326--337

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138443>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1986

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nové úspechy utvrdzujú samotných matematikov o sile matematiky.

Rovnováha medzi úrovňou matematiky a úrovňou jej aplikácií je historicky overená skutočnosť.

Nemôžeme si samozrejme dovoliť, aby nejaká módna oblasť potlačila dôležité tradičné smery, ktorých vplyv je často veľmi signifikantný.

Samotný fakt, že matematika tak často pomáhala predpovedať nové (experimentálne prv neoverené) skutočnosti, je nielen osožná záležitosť, ale pre zasväteného obsahuje aj silné estetické prvky. Všetky úspechy matematiky nezbavili matematiku toho estetického nádychu, ktorý jej je vlastný. Práve naopak.

Aby som zhrnul. Rozvoj matematiky tak, ako vyplýva z jej vnútorných potrieb, je absolútne nevyhnutný. Súčasne sa ale musia matematici zamýšľať nad tým, či dostatočne využívajú interdisciplinárne možnosti uplatnenia matematiky. To je opäť celosvetový problém. Každopádne by v tejto oblasti mala byť nastupujúca generácia ďaleko agresívnejšia, než boli predošlé generácie. Jednoducho preto, že spoločenské požiadavky sú iné.

Ďakujem vám za pozornosť.

Současný stav metodiky difrakčního měření makroskopických napětí

Ivo Kraus, Praha

1. Hlavní etapy vývoje metody rentgenové tenzometrie

Pojmem tenzometrická metoda označujeme postup, kterým se stanovují v materiálech mechanická napětí. Jejich velikost a znaménko lze určit buď výpočtem z naměřené elasticke deformace podle vztahů teorie elasticity, nebo ze souvislosti mezi napětím a některými fyzikálními vlastnostmi zkoumaného objektu, např. rychlostí šíření zvuku, mikrotvrdostí apod.

Základem rentgenografického měření makroskopických napětí je přesné měření elasticke deformací vzdáleností atomových mřížkových rovin v krystalech vystavených působení vloženého napětí (existujícího jen při vnějším namáhání) nebo napětí zbytkového (přítomného ve zkoumaném tělese i po odstranění příčiny, která napětí vyvolala). Podmínkou vzniku zbytkových makroskopických napětí je nerovnoměrná plastická deformace. Předpokládejme např., že tahovou silou došlo v některých částech V^{e1} objemu vzorku k deformaci elasticke, zatímco části V^{p1} téhož vzorku se deformovaly plasty. Po odlehčení tělesa (odstranění vnější síly) zůstanou objemy V^{e1} pod vlivem zbytkových tahů, v objemech V^{p1} budou naopak působit zbytková napětí tlaková.

Poznamenejme, že makroskopickým napětím nazýváme napětí, která jsou homogenní, tj. konstantní co do směru i velikosti, v objemech srovnatelných s objemem celé uvažované součásti. Napětí homogenní pouze v jednotlivých krystalcích polykrystalického materiálu označujeme naproti tomu jako mikroskopická.

Vznik rentgenové tenzometrie (rentgenografického měření napětí) byl podmíněn jednak Laueho objevem difrakce rentgenového záření na krystalové mřížce (1912), jednak dalšími výzkumy, které na tento objev navazovaly, zejména pracemi W. H. Bragga a W. L. Bragga. Jejich výklad Laueho difrakčního experimentu pomocí představy reflexe rentgenového záření na atomových rovinách monokrystalu umožnil vyjádřit podmínku, při níž se paprsky vlnové délky λ budou po odrazu na soustavě rovin o vzájemných vzdálenostech d zesilovat. Je-li θ úhel dopadu paprsků na roviny a n celé číslo, dojde k zesílení, pokud $n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$ (Braggova rovnice). Do technické praxe, jejímiž hlavními objekty zkoumání jsou materiály polykrystalické (složené z velkého množství krystalků), se difrakční metoda rozšířila teprve po roce 1916, kdy P. Debye a P. Scherrer ukázali, že difrakční obraz lze získat nejen z monokrystalů, ale i ze vzorků práškových a polykrystalických.

Princip difrakčních metod uvádí běžně dostupná odborná literatura, podrobný výklad nalezne čtenář např. v [9]. Připomeňme pouze, že při rentgenografickém studiu polykrystalických látek Debyeovou-Scherrerovou metodou s fotografickou registrací záření vzniká na filmu soustava tzv. difrakčních (Debyeových-Scherrerových) linií. Jejich poloha je dána vzdáleností d těchto systémů mřížkových rovin, které svou orientací vzhledem k dopadajícímu svazku rentgenových paprsků splňují Braggovu rovnici.

Princip měření napětí byl formulován Hookovým zákonem „jaké prodloužení, taková síla“ sice již v roce 1678, k jeho difrakční interpretaci došlo však teprve o 250 let později. *) Skutečnost, že makroskopické napětí vyvolává změnu vzdáleností atomových mřížkových rovin, se pro tenzometrické účely využívá od roku 1929, kdy Aksenov [1] popsal vliv jednoosé elastické deformace rovinného vzorku na změnu polohy Debyeových-Scherrerových linií.

Důsledně vzato nebyla ani tato teoretická studie první uveřejněnou prací z oboru difrakčního měření mechanických napětí. Předcházely jí výzkumy Joffeho a Kirpičevové, kteří v letech 1913 – 1924 studovali pomocí Laueovy metody elastické konstanty a anizotropii teplotní závislosti meze elasticity monokrystalů. Autoři amerického původu přisuzují prvenství aplikace rentgenové difrakce k měření napětí Lesterovi a Abornovi [2]. Experimentální práce těchto autorů z let 1925 – 26 je věnována měření změn mezivzrostných vzdáleností krystalků α -Fe při elastické deformaci ocelového vzorku.

Praktický význam pro měření napětí získala rentgenová difrakční analýza až ve třicátých letech, kdy mohla být aplikována při uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody na zpětný odraz, umožňující větší přesnost stanovení mřížkových deformací. Z tohoto období pocházejí tři základní (klasické) způsoby měření napětí:

1. metoda kolmého dopadu, kterou lze při znalosti nenapjatého stavu materiálu stanovit na povrchu zkoumaných vzorků součet hlavních napětí;
2. metoda dvou expozic, dovolující určení libovolné složky povrchového napětí bez znalosti nenapjatého stavu materiálu;
3. metoda jedné expozice, při níž ke změření libovolné složky napětí postačuje pouze jeden rentgenogram zpětného odrazu.

Protože každá z těchto metod prokázala svou spolehlivost a upotřebitelnost při měření napětí vyvolaných vnější silou, zdála se oprávněná i jejich aplikace na měření napětí zbytkových. Vzhledem k nedestruktivnímu charakteru rentgenové difrakční techniky

*) Podle Hookova zákona je deformace tělesa úměrná působící síle, a to až do jisté hodnoty napětí, tzv. meze úměrnosti.

uplatňovala se proto rentgenová tenzometrie co nejdříve právě k řešení problematiky zbytkových napětí.

Při užití klasických metod se zcela samozřejmě předpokládalo, že rentgenograficky určené hodnoty napětí lze ztotožnit s pojmem napětí definovaným teorií elasticity a naukou o pevnosti. V roce 1949 ukázal Greenough [3], že takový předpoklad nemusí být splněn nejen u heterogenních, ale ani u homogenních materiálů. Až do té doby nevznikaly pochybnosti, že by posunu difrakčních linií odpovídala i u plasticky deformovaných materiálů jiná příčina než pouze makroskopická napětí. Podle Greenougha jsou však změny polohy linií u plasticky deformovaných vzorků obecně vyvolány i napětím mikroskopickým, resp. jeho orientovanou složkou. Ve svých důsledcích vedla Greenoughova teorie k závěru, že různé klasické tenzometrické metody mohou dávat u téhož plasticky deformovaného materiálu různé hodnoty zbytkových makronapětí. Tato nejednoznačnost výsledků byla také skutečně experimentálně potvrzena.

Problémy s orientovaným mikroskopickým napětím vedly nejen k systematickému výzkumu dalších faktorů, které mohou rovněž způsobit posun linií, ale především daly impuls k vývoji víceexpozičních metod umožňujících přesnější a spolehlivější měření makronapětí než metody klasické.

V rozmezí let 1957–1961 byly vypracovány tři měřicí postupy vycházející ze stejného principu. Nový způsob měření makronapětí označili autoři jako „metodu šesti expozicí“ (Hawkes, 1947), „metodu šikmých snímků“ (Vasiljev, 1959), „metodu $\sin^2 \psi$ “ (Macherauch a Müller, 1961). V současné době se až na výjimky užívá názvu posledního. Metoda „ $\sin^2 \psi$ “ [4], která zahrnuje klasické rentgenografické tenzometrické metody jako své speciální případy, je dodnes východiskem pro hodnocení stavu zbytkové napjatosti. Víceexpoziční metody, založené na interpretaci závislosti mřížkové deformace ε_ψ na $\sin^2 \psi$ (ψ je úhel mezi povrchovou normálou N a normálou N_{hkl} reflektujících atomových mřížkových rovin (hkl)), byly přijímány bez výhrad pro řešení různých materiálových problémů souvisejících s dvojosou i trojosou napjatostí až do začátku sedmdesátých let. V té době se jako důsledek rozvoje detekční a vyhodnocovací techniky začaly stále častěji objevovat v souvislosti s experimentálními výsledky rentgenografických tenzometrických měření závěry typu: „zvolená rovina (hkl) se nehodí k měření“, „při $+\psi$ a $-\psi$ dostáváme rozdílné hodnoty mřížkových deformací (ψ -rozštěpení), ačkoliv $\sin^2(+\psi) = \sin^2(-\psi)$ “, „z měření na dvou odlišných systémech rovin s Millerovými indexy hkl vyplývají různá zbytková napětí“ apod.

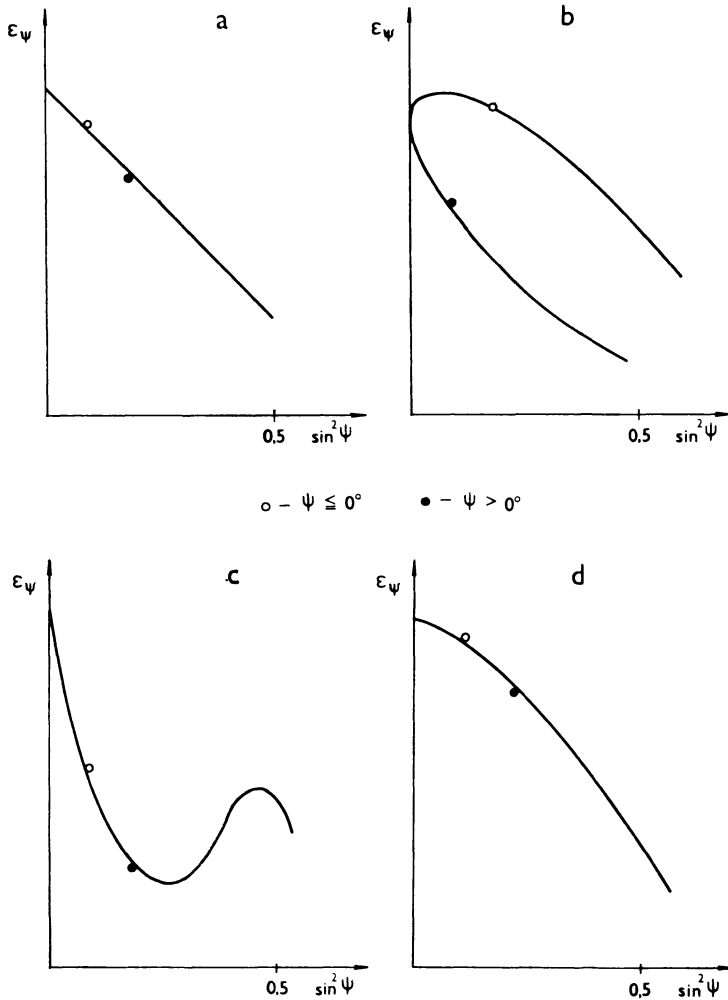
Stanoviska různých pracovišť k těmto novým poznatkům nebyla jednotná. Často se naměřené hodnoty prokládaly přímkou i přes zjevnou nelinearitu naměřené závislosti a odchylky byly bez numerického ověření interpretovány statistickým rozptylem, mikronapětími, texturami, gradientem napětí aj.)*

Tato situace vedla podobně jako při uveřejnění Greenoughovy teorie orientovaných mikroskopických napětí ke skepsi, kterou lze charakterizovat otázkou „co vlastně měříme?“ Na druhé straně se však pozorované diskrepance staly podnětem k systematickému

*) Texturou rozumíme přednostní uspořádání krystalků polykrystalického materiálu. V netexturovaném materiálu jsou všechny orientace krystalků vzhledem k libovolně zvolenému směru v prostoru stejně pravděpodobné.

teoretickému i experimentálnímu studiu vlivů, které mohly nelinearitu závislosti mřížkové deformace ϵ_ψ na $\sin^2 \psi$ vyvolávat.

Především došlo k přehodnocení významu účinku hloubky vnikání rentgenových paprsků do technických materiálů na výsledky měření. Tím byl vytvořen prostor pro teoretické vysvětlení parabolické nelinearity při existenci gradientu napětí ve směru kolmém k povrchu. Efekt „ ψ -rozštěpení“ se podařilo objasnit sklonem roviny hlavních napětí vzhledem k povrchu vzorku (nezávisle na tom, zda je gradient nulový či nikoliv) a „hadovité“ průběhy mřížkových deformací byly identifikovány jako projev textury (obr. 1).



Obr. 1 Základní typy závislosti ϵ_ψ na $\sin^2 \psi$; konstantní stav dvojosé nebo trojosé napjatosti v celém ozářeném objemu materiálu bez textury (a) nebo s texturou (c), osy hlavních napětí nejsou rovnoběžné s povrchem vzorku (b), v povrchových vrstvách materiálu existuje strmý gradient napětí (d)

V souvislosti s diskusí nelinearit vznikl i velký počet prací věnovaných problematice elastické anizotropie a trojosé napjatosti. Přestože dnes známe způsoby umožňující ne-destruktivní určení napětí nejen na povrchu, ale i do vzdálenosti srovnatelné s hloubkou vnikání použitého záření, a to jak ve speciálních případech působení jednotlivých faktorů tak při jejich superpozici, nelze metodiku rentgenové tenzometrie považovat za uzavřenou. Stejně jako v minulosti bude její další rozvoj podmíněn především pokrokem v oblasti experimentální techniky rentgenové difrakční analýzy. Perspektivu má i tenzometrie neutronová a měření napětí využívající přednosti energeticky disperzní rentgenové difraktometrie.

2. Přednosti a nedostatky měření napětí rentgenovými paprsky

Zjišťují-li se vložená nebo zbytková napětí výpočtem z relativní deformace, musí být stanovena absolutní změna jisté délky l_0 – odměrné základny (báze). U mechanických tenzometrů je touto základnou vzdálenost bodů dotyku tenzometru s tělesem. U odporových tenzometrů je to délka drátku tenzometru. Ze změny délky odměrné základny určíme průměrnou relativní deformaci, k níž v rozsahu báze došlo. Hodnota této deformace dává však možnost zjistit jen průměrné napětí odpovídající svým rozsahem délce dané báze. Čím je její velikost menší, tím lépe můžeme stanovit proměnnost deformace. Protože u kratší základny bude absolutní deformace menší než u základny dlouhé, dochází zkracováním báze k poklesu citlivosti měření.

Při mechanických způsobech stanovení zbytkových napětí se vzorek a snímač deformace (tenzometr) o bázi l_0 navzájem pevně spojí. Měřena je tedy podélná deformace povrchového vlákna $\varepsilon^m = \varepsilon_{\varphi=90^\circ}^m = \Delta l / l_0$, kde $\Delta l = l - l_0$ (l je délka báze po deformaci). Tloušťka vrstvy, v níž se určují deformace, je nulová, protože snímač detektuje pouze prodloužení vnějšího vlákna vzorku.

Rentgenová metoda využívá difrakce na množině krystalků polykrystalického vzorku orientovaných tak, že normála reflektujících rovin N_{hkl} je skloněna k primárnímu svazku pod úhlem $\eta = 90^\circ - \Theta$, kde Θ je Braggův úhel (obr. 2). Při změně úhlu dopadu rentgenových paprsků na povrch vzorku se sice u nových reflektujících krystalků úhly η mezi N_{hkl} a primárním svazkem nezmění, jiná bude však orientace N_{hkl} vzhledem k povrchové normále N .

U mechanických metod má l_0 velikost \approx mm, v rentgenové tenzometrii je bázi mezirovinná vzdálenost d_{hkl} ($\approx 10^{-1}$ nm). Za odměrnou základnu se však dá d_{hkl} považovat jen při zcela homogenním napětí ve všech vhodně orientovaných (reflektujících) krystalcích. Není-li tato podmínka splněna, bude hodnota napětí získaná difrakční metodou odpovídat průměrné deformaci stanovené ze všech reflektujících krystalků. V analogii k mechanickým tenzometrům, kde jsou do středování zahrnuty všechny krystalky nacházející se na povrchu v rozsahu báze, může být „difrakční“ pojem odměrné základny definován také velikostí celkového objemu reflektujících krystalků [5] nebo vzdáleností l_0^* podle obr. 2 [6].

Na rozdíl od mechanických metod při aplikaci rentgenové tenzometrie se neměří deformace pouze v rovině povrchu, ale naopak vždy pod určitým úhlem $\psi \neq 90^\circ$

napětí místo běžně tabelovaných hodnot „makroskopického“ Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla*) speciálních rentgenografických elastických konstant.

Díky elastické anizotropii krystalků lze difrakční technikou řešit některé úkoly, obvyklými tenzometrickými metodami nerealizovatelné. Je to především principiální možnost měření deformace jednotlivých fází ve vícefázových soustavách. (Tato deformace se může značně lišit od střední deformace stanovené některým „makroskopickým“ snímačem.) Jestliže získáme difrakční diagramy příslušné různým fázím, můžeme pomocí nich sledovat diferencovaně odpovídající skutečné stavy napjatosti.

Shrňme stručně i ostatní důležité vlastnosti rentgenové tenzometrie.

– Metoda umožňuje v současné době jako jediná principiálně odlišit napětí makroskopická od mikroskopických.

– Protože rentgenové paprsky pronikají u kovových materiálů jen do relativně tenké povrchové vrstvy ($10^0 \div 10^1 \mu\text{m}$), může být při méně přesných měřeních považována složka napětí kolmá k povrchu za zanedbatelnou. Pak ovšem zůstane rentgenová difrakční metoda omezena pouze na analýzu dvojsového stavu napjatosti.

– Poněvadž lze plošku povrchu zasaženou svazkem paprsků libovolně zmenšovat, může být průběh napětí sledován prakticky „bod po bodu“. Dají se proto proměřovat i velmi nehomogenní napěťová pole (např. ve svarech, v blízkosti hrotu únavové trhliny apod.). Na druhé straně však výpočty napětí, vycházející z deformace krystalků obsažených v objemu, který je pouze nepatrnou částí zkoumaného objektu, nemohou správně charakterizovat napjatost vzorku jako celku. Reprezentativnost hodnot napětí se dá zvýšit zvětšením ozářeného povrchu.

– Tenzometrická interpretace rentgenogramů polykrystalických látek je založena na určení hodnot polohy, šířky a případně i intenzity difrakčních linií. Metodu lze úspěšně aplikovat jen na materiály, které nedávají tyto linie příliš difúzní. Např. u ocelí kalených nebo tvářených za studena bude chyba stanovení napětí $4 \div 5$ krát větší než při studiu ocelí jemnozrnných. Obtíže nastávají i při velkých rozměrech krystalků ($> 10^{-3}$ mm), kdy se linie „rozpadnou“ na diskrétní, neuspořádaně rozložené reflexe. Důsledkem nespojitého charakteru linií je opět pokles přesnosti určení jejich polohy.

– Protože základem rentgenografické tenzometrické metody je měření vzdáleností atomových mřížkových rovin, omezovalo se její použití až donedávna výhradně na krystalické materiály. V poslední době byly vypracovány postupy umožňující měření napětí i ve výrobcích z plastických hmot, které neobsahují vlastní krystalické oblasti.

– Měření mezirovinných vzdáleností je měřením vzdáleností mezi atomy. Protože se tato veličina mění elastickým napětím, nikoliv však deformací skluzem, jsou rentgenovou difrakcí měřeny vždy pouze pružné deformace – na rozdíl od mechanických metod, kterými je stanovena deformace celková (součet elastické a plastické). Bezprostřední přechod od naměřených deformací k napětím umožňuje proto jen rentgenografická metoda měření napětí.

Ve srovnání s většinou nedifrakčních způsobů měření napětí je rentgenová tenzometrie dosud v určité nevýhodě pro relativně vysoké požadavky na přístrojové vybavení i odbornou kvalifikaci obsluhy.

*) Poissonovo číslo je definováno jako absolutní hodnota podílu poměrného (relativního) zkrácení a poměrného prodloužení při jednoosé napjatosti.

3. Základní charakteristiky měření napětí technikou energeticky disperzní difraktometrie

Tato technika je založena na užití polychromatického rentgenového spektra a analýze energií difraktovaných paprsků polovodičovými detektory, např. Ge(Li), Si(Li). Hlavní problém, s nímž se rozšíření metody energeticky disperzní difraktometrie pro tenzometrické účely setkává, záleží v relativně nízké přesnosti měření, dosahované při obvyklých podmínkách provozu mikrostrukturálních rentgenových trubice; obvykle není lepší než cca ± 70 MPa. Připomeňme, že polovodičové detektory, jejichž vlastnosti (zejména energetické rozlišení) jsou v této metodice rozhodujícím faktorem, byly již koncem 60. let aplikovány pro energeticky disperzní fluorescenční analýzu. Polovodičové detektory o rozlišení ≈ 170 eV umožnily analyzovat energie rentgenových fotonů emitovaných z ozářeného povrchu vzorku, a tím určit přítomné prvky.

Jak vyplývá z Braggovy rovnice $\lambda = 2d \cdot \sin \Theta$, budou se při určitém směru dopadu svazku spojitého záření na vzorek reflektovat různými systémy atomových mřížkových rovin různé vlnové délky. Necht' při úhlu dopadu Θ a mezivinné vzdálenosti d_1 množiny rovin (hkl) je reflexní podmínka splněna pro délku vlny λ_1 . Dojde-li ke změně d_1 na d_2 , bude pod tímž úhlem ze spojitého spektra reflektována vlnová délka λ_2 .

Pomocí detektoru, kterým lze rozlišit energie fotonů vlnových délek λ_1 , λ_2 , můžeme tedy k určení napětí použít difraktometrické uspořádání, jehož žádná část není během měření pohyblivá (zdroj ani detektor svou polohu nemění, neboť úhel Θ zůstává konstantní; orientace povrchové normály vzorku vzhledem k dopadajícímu svazku spojitého záření zůstává rovněž v průběhu registrace difraktovaného záření stálá).

Zatímco u úhlově disperzního difraktometru, kdy $\lambda = \text{konst.}$, se změna mezivinné vzdálenosti δd vyvolaná napětím projevuje posunem difrakční linie (změnou úhlu Θ), v případě energeticky disperzního difraktometru způsobí změna δd změnu hodnoty δU detektované energie rentgenových fotonů rozptýlených ve směru Θ .

Dosadíme-li do Braggovy rovnice energii fotonu rentgenového záření

$$(1) \quad U = \frac{hc}{\lambda},$$

(h je Planckova konstanta, c – rychlost světla), máme

$$(2) \quad d(\text{nm}) = \frac{0,6195}{\sin \Theta} \cdot \frac{1}{U(\text{keV})}.$$

Vlivem napětí budou hodnoty mezivinné vzdálenosti d_{hkl} určitého systému (hkl) v krystalcích, jejichž normála N_{hkl} svírá s povrchovou normálou N úhel $\psi = 0^\circ$, odlišné od hodnot, kterým přísluší $\psi \neq 0^\circ$. Na rovinách (hkl) těchto dvou druhů krystalků dojde tedy pro $\Theta = \text{konst.}$ k reflexi energií $U_{\varphi, \psi=0^\circ}$ a $U_{\varphi, \psi}$ (úhel φ charakterizuje směr měřeného povrchového napětí).

U tenzometrické metody „dvou expozic“ je při $\psi = 45^\circ$ dáno napětí σ_φ vztahem

$$(3) \quad \sigma_\varphi = \frac{E}{\nu + 1} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{d_{\varphi, \psi} - d_{\varphi, \psi=0^\circ}}{d} = \\ = \frac{E}{\nu + 1} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{U_{\varphi, \psi=0^\circ} - U_{\varphi, \psi}}{U_{\varphi, \psi}} = \frac{2E}{\nu + 1} \frac{\delta U}{U}.$$

Z (3) např. vyplývá, že u oceli (měření na krystalcích α -Fe), kde $E = 207$ GPa, $\nu = 0,33$, se napětí σ_φ projeví relativní změnou energie difraktovaných fotonů

$$(4) \quad \frac{\delta U}{U} \approx 3 \cdot 10^{-6} \sigma_\varphi.$$

Je-li např. $\sigma_\varphi = -70$ MPa, máme $|\delta U/U| \approx 2 \cdot 10^{-4}$.

Rozdíl energií $\delta U \approx 2 \cdot 10^{-4} U$, reflektovaných na skupinách krystalků lišících se navzájem orientací svých systémů rovin (hkl) vzhledem k N , bude tím větší, čím vyšší hodnotu energie U fotony mají. Pro záření K_α rentgenky s chromovou anodou ($U \approx 6$ keV) např. dostáváme, že u oceli a napětí $\sigma_\varphi = -70$ MPa je $|\delta U| \approx 1,2$ eV. To je však změna energie příliš malá, aby ji bylo možné detektovat současnými polovodičovými detektory. Vzrůstu hodnoty δU při stejném napětí σ_φ lze dosáhnout tím, že k experimentu použijeme spojité spektrum obsahující fotony vysokých energií. Bude-li např. možné δU zjistit jedině tehdy, jestliže má hodnotu ≥ 10 eV (rozlišovací schopnost použitého detektoru), pak musí být energie reflektovaných fotonů $U \approx 50$ keV ($\lambda = hc/U \approx 0,025$ nm). Rozptýlená intenzita záření takto krátkých vlnových délek je však jen velmi malá. Příčinou je jednak relativně nízká intenzita vlnových délek spojitého spektra (vzhledem k liniím charakteristického záření K_α), jednak charakter závislosti atomového faktoru, a tedy i difraktované intenzity I na λ : $I \sim \exp(\lambda^{-2})$.

Při tenzometrických měřeních metodou energeticky disperzní difraktometrie je třeba použít intenzivní spojité rentgenové spektrum, jehož zdrojem je např. rentgenka s rotující anodou. Difrakční experiment s krátkými vlnovými délkami λ umožňuje při vhodném vyclonění difraktovaných svazků dopadajících na detektor získat informace z definovaného objemu uvnitř rozměrných objektů. Protože při vysokých energiích fotonů (malých hodnotách vlnových délek λ) bude splněna Braggova rovnice pro malé úhly Θ , dá se v takovém případě energeticky disperzní difraktometrie aplikovat k měření napětí v uspořádání na průchod.

Bechtoldt a další [7] měřili zbytkové napětí v okolí svarů ocelových rour na systému $\{211\}$ v transmisní geometrii při úhlu $2\Theta \approx 5^\circ$ s paprsky energií ≈ 120 keV. Dosažená přesnost činila ca ± 20 MPa.

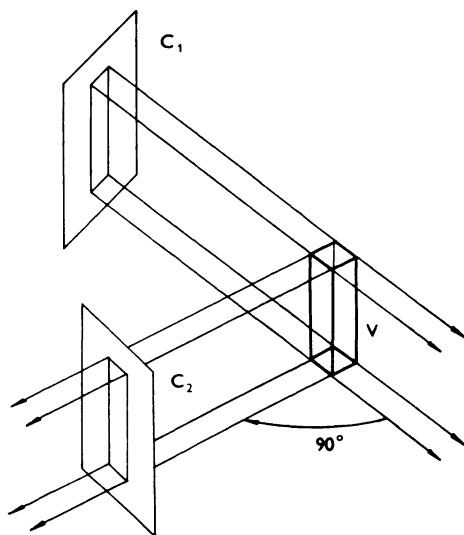
4. Princip neutronové tenzometrie

Žádná existující nedestruktivní tenzometrická metoda zatím neposkytuje zcela jednoznačné údaje o stavu napjatosti uvnitř rozměrných těles. Např. u ultrazvukových metod jsou napětí detektována jako změny rychlosti šíření zvuku vyvolané mřížkovými deformacemi. Rychlost není však pouze funkcí napětí, ale ovlivňuje ji i přednostní orientace

krystalků zkoumaného vzorku. Rovněž některé magnetické veličiny závisejí na napětí, nikoliv však pouze na něm. Rentgenovou difrakční technikou se sice dají měřit mřížkové deformace přímo, vzhledem k malé energii záření je ale u běžných látek omezena získaná informace pouze na povrchové vrstvy o tloušťce $10^{-3} + 10^{-2}$ mm. Tento nedostatek může být principiálně odstraněn, provedeme-li tenzometrický výzkum s tepelnými neutrony vlnových délek $\lambda \approx 10^{-1}$ nm, které mají pronikavost do technických kovů až několik desítek mm.*)

Myšlenka využití difrakce neutronů k napěťové analýze polykrystalických materiálů byla realizována poprvé až v roce 1981 [8]. Povšimněme si několika charakteristik této nové aplikace neutronové difraktometrie, které ilustrují perspektivy jejího uplatnění v praxi.

Okolnost, že neutronový svazek může mít větší průřez než svazek rentgenových paprsků, dává spolu s pronikavostí neutronů možnost nedestruktivního výzkumu velkých objemů vzorku ($\approx \text{cm}^3$). Tento fakt nelze ovšem při tenzometrické aplikaci neutronového rozptylu pokládat vždy za výhodu, neboť k řešení většiny technických problémů se požadují údaje o mřížkových deformacích (napětích) z relativně malých objemů $V \approx 10^1 \text{ mm}^3$. Vymezení jejich tvaru, velikosti a polohy uvnitř vzorku umožňují clony dopadajícího a difraktovaného svazku neutronů (obr. 4). Objem lze nejdokonaleji definovat, jestliže úhel $2\theta = 90^\circ$.



Obr. 4 Vymezení objemu V uvnitř vzorku clonami C_1 a C_2 na dopadajícím a reflektovaném svazku neutronů při úhlu rozptylu $2\theta = 90^\circ$

Má-li např. vycloněný objem velikost 10 mm^3 , dá se v ocelové součástce provádět napěťová analýza do vzdálenosti ca 15 mm pod povrchem. Při větším objemu V (větším počtu reflektujících krystalků) může být vzorek rozměrnější, je ovšem třeba počítat

*) Tepelnému neutronu hmotnosti m , pohybujícímu se rychlostí v , lze přiřadit vlnovou délku $\lambda = h/mv$.

se vzrůstem doby potřebné k detekci difrakčních linií. Předměty z hliníkových slitin lze zkoumat až do tloušťky ≈ 50 mm. Obecně platí, že velikost oblastí vycloněných uvnitř vzorku pro výzkum napětí závisí na účinném průřezu koherentního neutronového rozptylu, tloušťce vzorku, difrakčním úhlu a charakteru rozdělení napětí.

Extrémně vysoké difrakční úhly užívané při rentgenografických měřeních napětí jsou pro neutronovou tenzometrii nevhodné. Rozšíření linií vyvolané nemonochromaticností záření je u neutronů větší než v případě rentgenových paprsků. Tato skutečnost může při vysokých difrakčních úhlech nepříznivě ovlivnit stanovení polohy linií. V této souvislosti rovněž poznamenejme, že k rozšíření linií dochází také tehdy, existuje-li ve vycloněném objemu strmý gradient napětí.

Neutronová tenzometrie byla použita zatím jen ojediněle v některých střediscích jaderného výzkumu v NSR, Francii, USA a Kanadě. K prvním úspěšným aplikacím rozptylu tepelných neutronů pro tenzometrickou analýzu patří např.

- měření průběhu vložených napětí v příčném řezu nosníku ($140 \times 30 \times 8$ mm³) z hliníkové slitiny,
- stanovení zbytkových napětí v řezu ocelového válce ($\varnothing 20$ mm), v němž došlo zakalením k fázové transformaci,
- určení zbytkových napětí ve stěně trubek ze slitiny Zr-2,5% Nb a z austenitické oceli.

Rozšíření neutronové tenzometrie brání dosud především nedostatek zdrojů záření (neutronové svazky vhodné intenzity mohou být získány pouze z jaderných reaktorů) a problémy s umístěním rozměrných objektů na difraktometru. Technicky náročný úkol představuje také dosažení úhlového rozlišení, které je nezbytné k měření mřížkových deformací s přesností $\approx 10^{-4}$.

5. Perspektivy difrakční tenzometrické metody

Možnosti měření napětí pomocí rozptylu tepelných neutronů nebo s využitím techniky energeticky disperzní rentgenové difraktometrie jsou dosud omezené. Při formulaci perspektivy difrakčního stanovení makroskopických napětí se proto zaměříme na úkoly v oblasti tenzometrické interpretace změn difrakčních úhlů doprovázejících mřížkové deformace.

a) Základním předpokladem pro odstranění dosud trvajících skepse některých techniků vůči spolehlivosti difrakční metody je dosažení souhlasu mezi výsledky měření zbytkových napětí získanými rentgenograficky a běžně používanými způsoby destruktivními. Nezbytné budou především další výzkumy možné superpozice makroskopických a mikroskopických napětí vznikajících při různých typech deformačního a tepelného zpracování kovů.

Pozornost musí být věnována také návrhům a realizaci modelových experimentů, při nichž by průběh mřížkových deformací byl měřitelným způsobem ovlivněn definovanými gradienty napětí, víceosovými napěťovými stavy a texturami. Je třeba zavést jednoznačné kritérium, jaké odchylky od lineární závislosti $\varepsilon_{\psi}(\sin^2 \psi)$ lze ještě tolerovat. Dále bude nutné vyvinout systematiku specifických průběhů mřížkových deformací na

$\sin^2 \psi$, která by sloužila pro základní orientaci měření na obtížně analyzovatelných stavech materiálu.

b) Splnění úkolů shrnutých v předcházejícím odstavci není možné bez cílevědomě získaných experimentálních podkladů. Potřebné jsou zejména

– další analýzy povrchových stavů zbytkové napjatosti pomocí různých vlnových délek rentgenového záření,

– výzkumy spolehlivosti analýzy zbytkové napjatosti na těch materiálech, které byly dosud opomíjeny,

– destruktivní určení určitého stavu zbytkové napjatosti daného objektu jak rentgenograficky, tak i vhodnou metodou mechanickou.

c) V technické praxi lze v nejbližší budoucnosti očekávat podstatně širší využívání rentgenové tenzometrie především ke kontrole technologie na kritických místech povrchů strojírenských výrobků. Předpokladem pro to je ovšem dostatek zařízení umožňujících rychlá spolehlivá měření na objektech velkých rozměrů a členitých vnějších tvarů. Jako studovaná tělesa přicházejí v úvahu např. tepelné výměníky, motory, mostové nosníky, nádrže, části letadel, turbín, kompresorů apod.

Rozsáhlejšími aplikacemi rentgenové difrakční metody při měření napětí může rovněž dojít k zásadnímu obratu v současném stavu znalostí o vzniku a změně zbytkové napjatosti ve strojních dílech během provozního namáhání.

Významnou úlohu dostane určování napětí rentgenovými paprsky při posuzování spolehlivosti vysoce namáhaných strojních dílů. Pokud jsou kritickými oblastmi materiálu jeho povrchové části, můžeme k odpovídajícím úvahám využít rentgenografická měření. Neméně důležité budou i práce, které přispějí k objektivnímu zhodnocení významu mikroskopických zbytkových napětí pro spolehlivost kovových výrobků.

Literatura

- [1] G. I. AKSENOV: *Ž. prikl. fiz.* 6 (1929), 3.
- [2] H. H. LESTER, R. H. ABORN: *Army Ordnance* 6 (1925/26), 120.
- [3] G. B. GREENOUGH: *Proc. Roy. Soc. London A* 197 (1949), 556.
- [4] E. MACHERAUCH, P. MÜLLER, *Z. angew. Phys.* 13 (1961), 305.
- [5] I. KRAUS: *Strojírnoství* 31 (1981), 702.
- [6] D. M. VASILJEV, V. V. TROFIMOV: *Zav. laboratorija* 50 (1984), 20.
- [7] C. J. BECHTOLDT a další: *Adv. X-Ray An.* 25 (1982), 329.
- [8] A. ALLEN a další: *NDT Int.* October 1981, 249.
- [9] I. KRAUS: *Úvod do strukturní rentgenografie*. Academia, Praha 1985.

Lidé mají zálibu v některých jednotlivých vědách a úvahách, buď že se pokládají za jejich původce a vynálezce, anebo poněvadž jim věnovali nejvíce práce a nejvíce přívykli. Věnují-li se tací lidé filozofii a úvahám všeobecným, překrucují a kazi

je podle svých dřívějších fantazií. To se nejzřetelněji vidí u Aristotela, jenž přírodní svou filozofii úplně podřídil své logice, takže se stala téměř nepoužitelnou a hašteřivou.