



O SPOLEHLIVOSTI A VĚROHODNOSTI DIFRAKČNÍ ANALÝZY NAPĚTÍ

N. Ganev, I. Kraus

FJFI ČVUT, Praha

1. Klasifikace tenzometrických metodik

Ke zjišťování stavu napjatosti v modelech i reálných součástkách existuje dnes už velký počet experimentálních postupů založených na využití vztahu mezi napětím a určitou charakteristikou zkoumaného objektu [1, 2]. Některé z těchto metod umožňují měřit jak napětí vložená, tak i zbytková (reziduální). Řada z nich dovoluje získat o zbytkových napětích jen kvalitativní informace, mnohé jsou však vhodné i k určení přesných kvantitativních údajů. Podle toho, do jaké míry se vyžaduje zásah do celistvosti studovaného vzorku, mohou být metody klasifikovány jako

- * destruktivní (jejich principem je měření deformací vyvolaných odstraněním části objemu napjatého objektu),
- * polodestruktivní (dojde jen ke znehodnocení nadbytečného objemu záměrně přidávaného při výrobě součástky; poškozený materiál se po měření odstraní),
- * nedestruktivní (součástky se měřením nepoškodí).

Další členění vychází např.

- * z *principu metod*:
 - mechanické (měření deformací),
 - fyzikální (měření změn vlastností),
 - chemické (měření změn vyvolaných chemickými procesy),
- * z *charakteru měřené veličiny*:
 - přímé (měření deformace),
 - nepřímé (metody založené na analýze vztahu napětí a měřené veličiny, např. některé fyzikální vlastnosti),
- * z *tloušťky vrstvy zkoumaného napjatého materiálu*:
 - metody k měření v povrchových vrstvách,
 - metody k měření v řezu vzorku,
- * z *typu určované napjatosti*:
 - metody k výzkumu napjatosti jednoosé, dvojosé nebo trojosé,
- * z *druhu měřených napětí*:
 - metody k určení napětí I., II. nebo III. druhu.

2. Problémy korelace výsledků různých tenzometrických metodik

Žádný ze známých způsobů měření zbytkových napětí není zcela univerzální, jednotlivé metody lze zpravidla úspěšně aplikovat vždy jen na určité druhy materiálu (krystalické, průhledné, feromagnetické atd.). Kromě toho rozhodují o volbě měřícího postupu také specifické podmínky konkrétní laboratoře (zkušenosti a kvalifikace pracovníků, přístrojové vybavení, požadovaná přesnost měření). Obecně se dá konstatovat, že výsledky relativních měření jsou zpravidla dostatečně spolehlivé nezávisle na tom, která tenzometrická metoda je používána. Mezi

hodnotami napětí určenými různými metodami mohou však být značné rozdíly. Kvantitativní nesouhlas potom zpochybní i velmi seriózní výsledky. Základním předpokladem pro správnou interpretaci závěrů získaných odlišnými tenzometrickými postupy je pochopení podmínek, za nichž byly deformace stanoveny. Připomeňme, že žádnou tenzometrickou metodou není možné stanovit napětí, ale jen deformace, nebo ty veličiny, např. magnetické, elektrické, akustické, optické aj., které lze napětím ovlivnit.

Podstatu problému je možné ilustrovat na třech typech tenzometrických metodik, které patří v současné době k nejrozšířenějším. První dva (destruktivní metoda spojitého odnímání povrchových vrstev a polodestruktivní postupy známý jako *hole drilling*, *ring cutting* nebo *core drilling*) jsou založeny na měření geometricky definované deformace, třetí (nedestruktivní rentgenografická) vychází z difrakční analýzy relativních změn meziatomových vzdáleností.

Destruktivní metoda se osvědčuje zejména při určení průběhu zbytkových napětí v tenkých povrchových vrstvách. Jejich odstraněním, např. elektrolytickým odleptáním, dochází ve zbylé části vzorku k porušení napěťové rovnováhy. Z velikosti odpovídající deformace měřené na spodní části vzorku, z tloušťky původní i konečné lze pak při známém modulu elasticity vypočítat, jakou hodnotu mělo zbytkové napětí v daném směru před zásahem do celistvosti vzorku. Vypočítaný údaj je *průměrnou hodnotou* z celého objemu odleptané vrstvy. Opakováním tohoto postupu se dá stanovit průběh zbytkových napětí $d(x)$ od povrchu ($x = 0$) směrem dovnitř vzorku. Extrapolací lze pak určit i *povrchovou hodnotu* napětí.

U polodestruktivních metod jsou zbytková napětí uvolněna vyvrtáním otvoru nebo drážky. Při nejjednodušším uspořádání se kolem proměřovaného místa nalepí různice tří odporových tenzometrů zapojených na měřicí tenzometrický můstek. Deformace vznikající při postupném vrtání otvoru do vzorku pod středem různice jsou na můstku registrovány jako změny elektrického odporu. Přepočtové modely transformují naměřené hodnoty odporu (deformací) do místa vrtaného otvoru. Stanovené údaje jsou přiřazovány hloubce otvoru, jedná se tedy podobně jako u destruktivní metody postupného odnímání povrchových vrstev o hodnoty *průměrné*, a to nejen pokud jde o odvrtný objem, ale i délku báze použitého tenzometru. Povrchové napětí lze získat opět extrapolací průběhu $d(x)$ k $x = 0$.

Nové možnosti při laboratorní analýze zbytkových napětí lze očekávat od mikroskopické metody měření deformací. K uvolnění zbytkových napětí je možné použít bezkontaktní vrtání nebo řezání (elektrojiskrové technologie nebo pulzní laser); rozměry odstraněného objemu nebo tloušťka odříznuté vrstvy mohou být jen několik

desetin mm. Jestliže povrch nemá k měření deformací vhodnou morfologii, musí být opatřen mřížkou. Princip metody spočívá ve srovnání mikroskopických snímků měřeného místa zhotovených před uvolněním napětí a po něm.

Na rozdíl od uvedených metod je nedestruktivní difrakční tenzometrická analýza omezena na krystalické materiály [1, 2]. Jako *odměrná základna*, jejíž *elastickou* deformaci měříme, slouží vzdálenost mezi atomovými mřížkovými rovinami ($=10^{-10}$ m). Stanovené údaje jsou *váženými* průměry z vrstvy o tloušťce rovné efektivní hloubce vnikání T^e použitého záření; u kovů a slitin na bázi Fe je $T^e = 5 \div 10$ μ m. Lze proměřovat vzdálenosti rovin různých orientací s výjimkou těch, které jsou k povrchu kolmé, tj. *odměrná základna* nemůže být s povrchem rovnoběžná. Při korektním výpočtu napětí z mřížkových deformací by měl být brán v úvahu vliv elastické anizotropie (směrová závislost Youngova modulu pružnosti).

Porovnáme-li specifické rysy difrakčního a optického měření deformací, najdeme rozdíly nejen u veličin charakterizujících *odměrnou základnu* (velikost a orientace vzhledem k rovině povrchu zkoumaného vzorku), ale i v samotném *druhu proměřované deformace* (difrakční metody umožňují stanovit deformace čistě elastické, při optickém měření je naměřená hodnota dána superpozicí deformace elastické s plastickou). Podobné diference platí i mezi jinými způsoby měření napětí.

Vedle experimentální analýzy zbytkových napětí se v posledním období začíná využívat i “prognostická” metoda založená na matematickém modelování technologických procesů generujících napěťové pole. Důvody pro její oblibu jsou nejméně tři:

- jde o “analýzu nedestruktivní”, která se obejde bez fyzické existence “zkoumaného” objektu,
- ke změně technologického procesu stačí změnit vstupní parametry pro výpočetní program,
- kromě výpočetní techniky není potřeba žádné speciální přístrojové vybavení ani jeho kvalifikovaná obsluha.

Žádný matematický model však nemůže být odpovědně aplikován v praxi, nejsou-li jeho závěry potvrzeny “klasickými” měřicími postupy. Experimentální tenzometrická analýza tedy nejenže svůj význam neztrácí, ale naopak stává se v kombinaci s matematickým modelováním zcela nepostradatelná.

Problematice měření zbytkových mechanických napětí byla u nás i v zahraničí věnována dosud značná pozornost; systematický výzkum, který by objasnil příčiny kvantitativní odlišnosti hodnot určených různými experimentálními postupy, však dosud chybí. Vyřešení tohoto problému umožní zpřesnit dosavadní představy o mechanismu vzniku zbytkových napětí a věrohodněji interpretovat výsledky jakékoliv tenzometrické metodiky; to povede k dalšímu vzrůstu významu diagnostiky napětí ve výrobě a zpracování kovových i keramických technických materiálů. Ke splnění tohoto záměru by měla přispět i srovnávací měření napětí uvedená v následujících odstavcích.

3. Korelace výsledků difrakční analýzy napětí s metodami destruktivními a semidestruktivními

A) Metoda postupného odleptávání

* Charakteristika zkoumaných vzorků.

Povrchové vrstvy oceli ČSN 19 096 ovlivněné abrazivním řezáním vysokotlakým vodním paprskem; rychlost řezání 30 mm.min⁻¹, průměr vodní trysky 0,3 mm, průměr výstupní trysky 1,2 mm, tlak vody 275 MPa, průtok 2,27 l.min⁻¹, abrazivo SiC.

* Použité metody experimentální analýzy napětí.

- Metoda založená na kontinuálním měření deformace vzorku při elektrolytickém odleptávání vrstev pod plochou řezu.
- Rentgenografická tenzometrická metoda jedné expozice bez referenční látky s fotografickou detekcí záření CrK α difraktovaného vhodně orientovanými krystalky feritické fáze.

* Tenzometrická interpretace naměřených deformací.

Oběma metodami byl v povrchových vrstvách všech vzorků zkoumaných ocelí zjištěn stav makroskopické tlakové zbytkové napjatosti. V uspokojivém (řádovém) souhlasu jsou také stanovené velikosti napětí. Příčinu rozdílu hodnot “rentgenografických” (-450 MPa) a “mechanických” (-1000 MPa) lze hledat v odlišnosti oblastí, k nimž údaje o napětích ve vzorku přiřazujeme. Difrakční informace odpovídá vrstvě o tloušťce stejné jako je efektivní hloubka vnikání použitého záření, v daném případě cca 4 μ m. Napětí -1000 MPa je naproti tomu extrapolovaná hodnota charakterizující stav *právě* ve vzdálenosti 2,5 μ m od povrchu.

B) Metoda mechanická - porušení celistvosti napjatého prstence

* Zkoumaný materiál a jeho zpracování.

Prstence o šířce 40 mm zhotovené řezem kolmým k ose trubek, které měly vnější průměr 530 mm a tloušťku stěny 8 mm. Bylo zkoumáno, jaký relaxační účinek má na napětí generovaná v trubkách jejich výrobou (stáčením a svařováním plechu z oceli ČSN 11 523) tzv. *tlakování* - působení tlakové vody na stěny trubek; v daném případě byl aplikován tlak 10 MPa po dobu 10-30 s.

* Použité metody experimentální analýzy napětí.

- Výpočet napětí z velikosti mezery (rozevření), která vznikne po rozříznutí prstence.
- Rentgenografická tenzometrická metoda jedné expozice bez referenční látky s fotografickou detekcí difraktovaného záření CrK α .

* Tenzometrická interpretace naměřených deformací.

- U původních (netlakovaných) prstenců je velikost rozevření (napjatost) závislá na poloze řezu vzhledem ke svaru. Metoda vycházející z předpokladu homogenního rozdělení napětí po obvodu prstence je



proto v daném případě nepoužitelná. Při tlakování relaxovala především vysoká napětí v okolí svaru; závislost velikosti rozevření na poloze řezu byla pak už jen nevýrazná.

- Na základě rentgenografických měření lze konstatovat, že k největší změně napětí vyvolané rozříznutím došlo u prstenců (z trubek původních I “tlakovaných”) v těsné blízkosti svaru. Napjatost ostatních částí prstenců tlakováním významněji ovlivněna nebyla.
- Obě metodiky vedly k závěru, že použitou technologií tlakování se v trubkách uvolnila zejména vysoká zbytková napětí vyvolaná svařováním.

c) Semidestruktivní metoda slepého otvoru

* Zkoumaný materiál a jeho zpracování.

Vrstva Al_2O_3 tloušťky 1200 μm zhotovená plazmatickým nástřikem (APS) na otryskanou ocelovou podložku. Zrna Al_2O_3 čistoty 99,7 % měla velikost od 5 do 25 μm . Mechanickou přilnavost mezi podložkou a keramickou vrstvou zajišťoval 100 μm tlustý film NiAl. Stříkací vzdálenost byla 120 mm, teplota podložky 350 °C. Vzorky “podložka-vrstva Al_2O_3 ” měly rozměry 50 × 50 × 5 mm³ a 30 × 30 × 5 mm³.

* Použité metody experimentální analýzy napětí.

- Rentgenografická metoda “ $\sin^2\psi$ ” aplikovaná na Ψ -goniometru Siemens D5000 se zářením $\text{CrK}\alpha$, resp. na Ω -goniometru DRON UM-1 se zářením $\text{CuK}\alpha$. Efektivní hloubka vnikání měla hodnotu 10,1 μm , resp. 37,7 μm .
- Stanovení hloubkového profilu napětí odvrtávací metodou s odporovými tenzometry.

* Tenzometrická interpretace naměřených deformací.

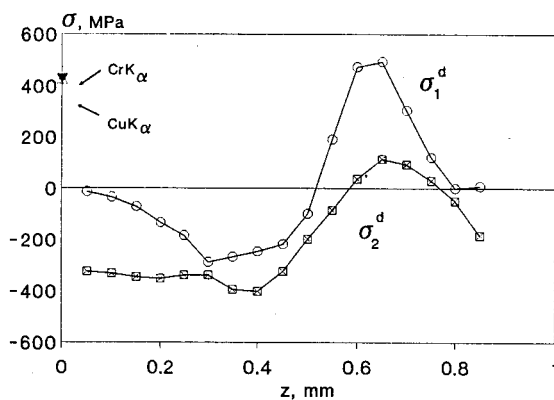
Rentgenograficky byly zjištěny na *povrchu* korundové krycí vrstvy pouze izotropní tahy, a to buď 420±36 MPa (se zářením $\text{CuK}\alpha$), nebo 431±24 MPa (se zářením $\text{CrK}\alpha$). Napětí stanovené odvrtávací metodou jsou naproti tomu až do vzdálenosti cca 500 μm od povrchu záporná a navíc i směrově závislá (obr. 1).

Výsledky obou použitých tenzometrických metod se navzájem liší jen zdánlivě; na průbězích hloubkových profilů $\sigma_1^d(z)$, $\sigma_2^d(z)$ je směrem k povrchu zřetelná tendence změny tlaků v tahu, tj. tendence ke kvalitativní shodě s difrakční analýzou.

d) Semidestruktivní metoda mikroskopického měření deformací

* Zkoumaný materiál a jeho zpracování.

Tři vzorky velmi čistého hliníku (99,85 % Al): práškový standard a plasticky deformované destičky o roz-



Obr. 1. Hloubkový profil navzájem kolmých zbytkových napětí σ_1^d , σ_2^d určených odvrtávací metodou. Na ose pořadnic ($z=0$) je zakreslena *povrchová* rentgenografická hodnota.

měrech 10 × 22 × 2 mm³ (5% tahová plastická deformace, rychlosti deformace 2 mm.min⁻¹ a 5 mm.min⁻¹).

* Použité metody experimentální analýzy napětí.

- Rentgenografická metoda “ $\sin^2\psi$ ” aplikovaná na Ω -goniometru DRON UM-1 se zářením $\text{CuK}\alpha$.
- Mikroskopická metoda měření deformací.

* Tenzometrická interpretace naměřených deformací.

Ani jednou z uvedených metod nebyly v plasticky deformovaných vzorcích zjištěny měřitelné zbytkové deformace (napětí). To znamená, že

- plastická deformace proběhla ve všech částech vzorků zcela stejně, takže zbytková napětí vůbec nevznikla,
- nebo zbytková napětí stačila ještě do začátku tenzometrické analýzy prakticky zcela relaxovat.

4. Závěr

Uvedené výsledky srovnávacích měření pomocí různých tenzometrických metod naznačují, co je příčinou často pozorovaných kvantitativních i kvalitativních rozdílů v hodnocení téhož stavu makroskopické zbytkové napjatosti. Spíše než nesprávnost nebo nepřesnost metodik se jedná o jejich nevhodnou aplikaci vzhledem k povaze řešených problémů, případně chybnou (neúplnou) interpretaci naměřených deformací.

Tato práce je dílčím výsledkem řešení projektu podporovaného GAČR (grant č. 106/98/04760).

Literatura

1. Kraus, I.- Trofímov, V. V: Rentgenová tenzometrie. Academia, Praha 1988.
2. Kraus I. - Ganev, N.: Difrakční analýza mechanických napětí. Vydavatelství ČVUT, Praha 1995.