

## SIMULATING OF X-RAY STRESS ANALYSIS IN POLYCRYSTALLINE AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MODELOVÁNÍ RENTGENOGRAFICKÉHO TENZOMETRICKÉHO EXPERIMENTU NA KORUNDOVÉ KERAMICE

## Kraus Ivo, Ganev Nikolaj

Grinding leads to changes in the stress state of the surface layers which in return may influence the mechanical properties of the parts as a whole. In most cases, compressive residual stresses of high magnitudes at the surface and steep gradients perpendicular to the surface are created. In the following, results of simulating of X-ray stress analysis are presented concerning ground polycrystalline  $Al_2O_3$ .

Mezi různými typy syntetických látek představuje technická keramika samostatnou skupinu náležející k anorganickým nekovům. I když se jedná o relativně "mladé" materiály, základ mají v látkách již dávno dobře známých, jako jsou oxidy, nitridy, karbidy a boridy hliníku, křemíku a kovů 4. nebo 6. skupiny periodické soustavy; technicky důležitými příklady mohou být Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, TiB<sub>2</sub> a jejich kombinace (heterogenní keramika).

Pevnost (odolnost vůči lomu) keramiky se dá příznivě ovlivnit kromě materiálových parametrů (jako je např. heterogenita, velikost krystalků, tepelná a elastická anizotropie nebo hustota poruch) také zbytkovou napjatostí povrchových vrstev. Pro její identifikaci i kvantitativní popis se zcela jednoznačně osvědčuje rentgenová tenzometrická metoda.

Při difrakčním stanovení průběhu zbytkových předpětí je třeba vždy brát v úvahu, že hloubka vnikání používaného rentgenového záření je řádově stejně velká (maximálně několik desítek  $\mu$ m) jako vzdálenost od povrchu, do níž je keramika opracováním (např. broušením) ovlivněna. Reálné rentgenografické analýze zbytkových napětí by proto měl vždy předcházet teoretický rozbor opírající se o charakteristiky zkoumaného materiálu (rentgenografický Youngův modul elasticity a Poissonovo číslo, vlnově závislý absorpční součinitel) a vlastnosti (efektivní hloubku vnikání, vyhledání dostatečně intenzívních difrakčních linií v oboru vysokých difrakčních úhlů) všech typů záření, která přicházejí principiálně v úvahu. Modelový výpočet je důležitý nejen pro volbu optimálních podmínek experimentu, ale i pro správnou tenzometrickou interpretaci naměřených mřížkových deformací.

Tyto obecné zásady budeme nyní ilustrovat na jednom z nejrozšířenějších typů současné technické keramiky - kompaktním vzorku korundu  $Al_2O_3$ , v jehož povrchové vrstvě byl broušením vyvolán centrálně symetrický stav zbytkové makroskopické napjatosti. Před dalšími úvahami je třeba zdůraznit, že celý modelový výpočet a stejně také diskuse výsledků vycházely z předpokladu platnosti teorie elasticity v plném rozsahu i u pórovitého keramického prostředí.

Uvažujme modifikaci  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s mřížkovými parametry a = 0,4754nm, c = 1,299nm resp. (v romboedrických souřadnicích) a = 0,51203nm,  $\alpha$  = 55,28°. Budeme-li tento materiál zkoumat zářením CuK<sub> $\alpha$ </sub> (vlnová délka 0,154184nm), ukazuje se jako nejvýhodnější měření deformace vzdáleností systému atomových mřížkových rovin {40.10}; použijeme-li záření CrK<sub> $\alpha$ </sub> (0,22910nm), pak lze doporučit studium rovin {220}. V prvním případě bude mít úhel rozptylu hodnotu  $\theta$ (40.10) = 72,745°, pro záření CrK<sub> $\alpha$ </sub> je  $\theta$ (220) = 74,33°. K výpočtu efektivní hloubky T<sup>e</sup> vnikání rentgenového záření (touto veličinou se rozumí tloušíka vrstvy materiálu, jejíž krystalky difraktují 63,2% celkové energie difraktované vrstvou nekonečné tloušíky) do korundu je dále nezbytná hodnota lineárního absorpčního součinitele  $\mu$ ; ta má pro CuK<sub> $\alpha$ </sub> velikost 0,0128 $\mu$ m<sup>-1</sup>, u CrK<sub> $\alpha$ </sub> je 0,0420 $\mu$ m<sup>-1</sup>. Při modelování tenzometrického experimentu se dále neobejdeme bez tzv. rentgenografických elastických konstant <sup>1</sup>/s<sub>2</sub> a s<sub>1</sub>, pomocí nichž vyjadřujeme vztah mezi mřížkovou deformací a působícím napětím.

U korundu a uvedených typů rentgenového záření jsou používány tyto experimentálně stanovené konstanty:

 $\frac{1}{2}s_2\{40.10\} = 3,02.10^{-6} \text{ MPa}^{-1}, s_1\{40.10\} = -0,46.10^{-6} \text{ MPa}^{-1}, \frac{1}{2}s_2\{220\} = 3,35.10^{-6} \text{ MPa}^{-1}, s_1\{220\} = -0,909.10^{-6} \text{ MPa}^{-1}.$ 

Podle obr. 1 si můžeme učinit představu, jak se mění efektivní hloubka vnikání T<sup>e</sup> záření a CrK<sub>a</sub> do korundu při různých úhlech  $\psi_0$  dopadu primárního svazku na povrch vzorku. (Vztahy pro výpočet T<sup>e</sup> jsou uvedeny např. v [1].)

Základem rentgenografické tenzometrické analýzy je měření deformace zvoleného systému atomových mřížkových rovin při různých hodnotách  $\sin^2\psi$ . Stanovené průběhy závisí na stavu napjatosti povrchových vrstev zkoumaného materiálu a vlastnostech (pronikavosti)



Obr.1 Závislost T<sup>e</sup> na úhlu  $\psi_0$ , pod nímž dopadá záření CrK<sub>a</sub> na povrch vzorku korundu v uspořádání  $\omega$ -goniometru;  $\theta$ =74,33<sup>0</sup>,  $\psi$  je úhel mezi povrchovou normálou N a normálou k systému rovin {220}, P-primární svazek, R-reflektovaný svazek

používaného záření. Konkrétním příkladem jsou křivky na obr.3 a 4, odpovídající lineární změně napětí směrem od povrchu dovnitř vzorku korundu (obr. 2). Charakter napjatosti je dvojosý, centrálně symetrický [1].



Obr.2 Předpokládaný průběh závislosti napětí  $\sigma$  na vzdálenosti T od povrchu vzorku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Protože přesnosti měření úhlové polohy  $\pm \delta\theta = 0,01^{\circ}$  odpovídají při úhlech  $\theta = 73^{\circ} \div 74^{\circ}$ změny mřížkové deformace  $\delta\varepsilon \approx 5.10^{\circ}$ , jsou průběhy na obr. 3 i 4 prokazatelně nelineární. Dají se z nich odvodit např. tyto závěry:

- Pokud se k výpočtu napětí  $\sigma$  rozhodneme aplikovat klasický postup metody "sin<sup>2</sup> $\psi$ " (vycházející z určení směrnice přímky proložené experimentálními body  $\varepsilon$ ), budou stanovené hodnoty  $\sigma$  záviset na zvoleném oboru sin<sup>2</sup> $\psi$ , kde rozložení bodů  $\varepsilon$  aproximujeme přímkou. Povrchová napětí příslušejí směrnici přímky proložené body  $\varepsilon$ , jejichž souřadnice sin<sup>2</sup> $\psi \ge$ 0,5. Maximální hodnota sin<sup>2</sup> $\psi$  odpovídá na obr.3 a 4 nulové efektivní hloubce vnikání T<sup>c</sup>, tj.  $\sigma$ (T=0).



mřížkových rovin (220) na  $\sin^2\psi$ 

- Při dané závislosti napětí  $\sigma$  na vzdálenosti T od povrchu se může průběh  $\varepsilon(\sin^2\psi)$ stanovený zářením různých vlnových délek měnit nejen kvantitativně, ale i kvalitativně (obr.3).

[1] Kraus I.: Rentgenografie nehomogenních napěťových polí. Academia, Praha 1990.

Prof. RNDr. Ivo Kraus, DrSc., Ing. Nikolaj Ganev, CSc. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, 180 00 Praha 8, V Holešovičkách 2, tel. (02) 8576 2416