



X-ray diffraction measurement of residual stresses RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ TECHNIKA MĚŘENÍ MAKROSKOPICKÝCH ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

Nikolaj Ganev, Ivo Kraus

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8

Keywords:

residual stresses, X-ray elastic constants, X-ray tensometry

Abstract

A short review of X-ray techniques for stress determination is presented. Stresses are classified into three kinds as usual and characteristic features of X-ray method are described.

Napětí a deformace

Stav napjatosti působící v libovolném bodě elastického tělesa může být v souřadnicové soustavě jednoznačně charakterizován devíti složkami ϵ_{ij} ($i, j = x, y, z$) tenzoru napětí. Systém souřadnic se zpravidla orientuje podle os souměrnosti uvažovaného objektu, nebo podle jiných význačných směrů, např. směrů tváření, opracování, apod. Nepůsobí-li na těleso žádné vnější síly a (nebo) momenty, je symetrickým tenzorem 2. řádu ϵ_{ij} popsán lokální stav zbytkové (reziduální) napjatosti.

Pojem zbytkových napětí

Zbytková napětí jsou mechanická napětí existující v tělese (jako uzavřeném systému) bez působení vnějších sil a (nebo) momentů. Napětí vyvolaná nemechanickými účinky, např. teplotními gradienty, považujeme ve smyslu této definice za "vložená", i když jsou důsledkem stacionárních, po dlouhou dobu se neměnicích podmínek. Vnitřní síly a (nebo) momenty spojené se zbytkovým napětím jsou v rovnováze. Pevné látky bez zbytkových napětí principiálně neexistují. Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací. V materiálech užívaných technickou praxí vzniká technologií výroby i dalším zpracováním celá řada různých stavů zbytkové napjatosti.

V současné době se pro třídění zbytkových napětí působících v polykrystalických materiálech užívá obvykle jako klasifikační kritérium velikost objemů, v nichž se napětí nemění ve své velikosti ani směru (jsou homogenní).

Zbytková napětí I. druhu jsou přibližně homogenní ve velké oblasti (v mnoha krystalcích – zrnech) materiálu. Při zásahu do silové a momentové rovnováhy tělesa, v němž existuje zbytková napjatost I. druhu, dochází vždy ke změnám jeho makroskopických rozměrů.

Zbytková napětí II druhu jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků. Silová a momentová rovnováha se předpokládá již u objemů tvořených větším počtem krystalků. Porušení rovnováhy nemusí vést ke změnám tvaru uvažovaného tělesa.

Zbytková napětí III. druhu jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi. Silové a momentové rovnováhy může být dosaženo i v dostatečně velkých částech jednoho krystalku. Zásahem do rovnováhy k žádným tvarovým změnám tělesa nedojde.

Zbytkové napětí v určitém bodě je vždy superpozicí všech tří druhů.

Mřížková deformace

Mřížkovou deformaci m^r definujeme analogicky jako deformace makroskopickou. V mikroskopické oblasti je mřížková deformace definována jako relativní změna meziatomové vzdálenosti (vzdálenosti atomových mřížkových rovin)

Dopadá-li na elasticky deformovanou krystalovou mřížku monochromatický rentgenový paprsek tak, že bude splněna Braggova podmínka, pak se změna mezirovinové vzdálenosti projeví změnou Braggova úhlu.

Rentgenová difrakční analýza napětí má některé specifické rysy, kterými se odlišuje od jiných tenzometrických metod:

1. Měření jsou omezena jen na krystalické látky nebo na krystalické fáze částečně amorfních materiálů.
2. Vtenké povrchové vrstvě jsou měření zcela nedestruktivní. Ke stanovení hloubkového profilu mřížkové deformace (napětí) lze kombinovat difrakční analýzu s postupným odleptáváním povrchu.
3. Mřížkové vzdálenosti, které slouží v difrakční tenzometrii jako "měrky", jejichž změnu velikosti určujeme, jsou asi o 8 řádů menší než "měrky" užívané obvyklými mechanickými nebo elektromechanickými metodami.
4. U jednofázových materiálů je měření deformace omezeno jen na vhodně orientované krystalky uvnitř objemu "ozářeného" svazkem rentgenových paprsků, u vícefázových soustav se informace získá pouze od jednotlivých krystalků jedné fáze. Získané výsledky budou proto ovlivněny elastickou anizotropií krystalků zkoumaného objektu.
5. U vícefázových soustav lze využít selektivní vlastnosti difrakční metody a stanovit mřížkové deformace na krystalcích každé fáze zvlášť. Rentgenová tenzometrie tedy umožňuje principiálně měřit zbytková napětí I. i II. druhu ve vícefázových polykrystalických materiálech.

Technika měření

Pro rentgenografické měření zbytkových makroskopických napětí se užívají jak stacionární a přenosné aparatury s fotografickou detekcí záření, tak difraktometry v uspo-

řádání „ , “ , „ , “ a s paralelním svazkem. V provozních podmínkách mají největší perspektivu mobilní aparatura s polohově citlivými detektory.

Fyzikální postup měřicího postupu spočívá ve stanovení vzdálenosti určitého systému mřížkových rovin $\{hkl\}$ v různých a různě orientovaných krystalcích. Čím je počet reflektujících krystalků větší, tím bude získána informace reprezentativnější a spolehlivější. Při detekci difrakovaného záření na film dostaneme v takovém případě spojité Debyeovy- Scherrerovy linie. Pokud se linie „rozpadají“ na diskrétní difrakční stopy, je možno počet vhodně orientovaných krystalků zvýšit takovým pohybem zkoumaného vzorku, při němž geometrické podmínky použité metody zůstanou nenarušeny.

Jedna z prakticky významných zvláštností rentgenové tenzometrie spočívá v tom, že povrch zkoumaného materiálu není třeba před vlastním měřením speciálně upravovat. Běžná drsnost, s níž se obvykle po opracování nebo tváření setkáváme, není na závadu. Vždy je však třeba uvážit, jaké důsledky má pro řešení dané úlohy nepatrná hloubka vnikání používaných rentgenových paprsků.

Rentgenografické elastické konstanty

Elastická anizotropie, projevující se v různých krystalografických směrech různými elastickými vlastnostmi, bude naměřené výsledky bezpochyby určitým způsobem ovlivňovat. U mechanických měření deformace, kde se jedná zpravidla o objemy s velkým počtem náhodně orientova-

ných krystalků, je efekt anizotropie „zprůměrovan“ a chování objektu lze považovat za kvaziizotropní, dostatečně dobře popsatelné Youngovým modulem E a Poissonovým číslem n lineární teorie elasticity izotropních látek. Při rentgenografickém měření zbytkových napětí je elastická anizotropie respektována pomocí tzv. rentgenografických elastických konstant.

Jejich hodnoty lze buď vypočítat teoreticky, nebo určit experimentálně na základě měření mřížkových deformací ve vzorcích vystavených známému jednoosému namáhání.

Závěr

Rentgenografická technika měření napětí představuje v současné době jednu z nejvýznamnějších metod analýzy vložených i zbytkových stavů makroskopické napjatosti. Uplatňuje se jak v oblasti základního materiálového výzkumu tak při řešení širokého spektra konkrétních technologických problémů v nejrůznějších odvětvích průmyslové výroby. Zkušenosti ze zemí s vyspělou strojírenskou technologií svědčí o tom, že poznatky o zbytkových napětích jsou efektivně využívány především tam, kde se podařilo trvale odstranit nedůvěru rozdělující pracovníky výzkumu a výroby a kde má tok informací mezi těmito oblastmi obousměrný charakter. Rozhodující pro další perspektivu rentgenové tenzometrie je informovanost o možnostech této experimentální techniky, neomezující se pouze na výčet předností, ale i na kvalifikované posouzení hranic použitelnosti.

SMALL ANGLE NEUTRON SCATTERING IN MATERIALS SCIENCE

Pavel Strunz

Nuclear Physics Institute, 25068 Řež near Prague, Czech Republic

Keywords:

SANS - small angle neutron scattering, materials science

Abstract

The importance of small-angle neutron scattering for materials science and its specific features are briefly discussed. A few examples of applications are shown - study of superalloys, determination of volume fraction of voids for superplastic materials, study of porosity in plasma-sprayed coatings.

1. SANS characteristics

Specific properties of small-angle neutron scattering (SANS) method with respect to small-angle scattering of X-ray and synchrotron radiation (SAXS) are presented. The neutron sources are of much lower luminosity than synchrotron ones and even substantially lower than standard X-ray sources. On the other hand, higher penetrability of neutrons through majority of materials facilitates their use as a probe for bulk material and for in-situ studies at extreme conditions (low/high temperatures, mechanical loading, pressure).

As scattering amplitude of neutrons does not depend in a systematic way on the atomic number and can differ even for isotopes, light elements can provide a significant scattering contrast and contrast variation technique can be rela-

tively easily employed, too. Moreover, their magnetic moment enables to investigate magnetic nanostructures. A usually easier preparation of SANS samples should be mentioned as well: in certain cases we can talk even about non-destructive testing.

Generally, SANS is particularly useful for microstructural investigations where X-ray cannot deliver needed information either for lack of scattering contrast or due to strong absorption (in the sample or in the sample-environment windows).

Complementary arrangements of SAS experiment known for X-ray (pin-hole, double-crystal) are used for neutrons as well (an example pin hole SANS facility can be found in [1]). Nevertheless, the low absorption of neutrons allows the use of neutron-diffraction optics to improve the performance of double-crystal SAS setting. In Fig. 1, such device equipped with analyzer (bent perfect Si crystal) in fully asymmetric geometry is displayed [2].

2. Typical SANS investigation of solid materials

To develop materials with physical properties suited to a particular application and to optimize the technology of their processing, it is essential to know the physical mechanisms taking place in the material under different external conditions. Particularly, the presence of microscopic pores or precipitates is a characteristic feature of many types of