

Obsah

Úvod	7
1. Princip rentgenografických difrakčních metod	12
1.1 Základní vlastnosti rentgenového záření	12
1.2 Braggova rovnice a její geometrické vyjádření	17
1.3 Fotografické metody	21
1.4 Difraktometrická technika	24
1.5 Hlavní charakteristiky difrakčních linií	25
1.6 Metody určení polohy difrakčních linií	28
1.6.1 Korekce na pozadí	29
1.6.2 Korekce na LPA-faktor	29
1.6.3 Přiřazení difrakčního úhlu	30
2. Hloubka vnikání rentgenového záření	35
2.1 Obecný výraz pro hloubku vnikání	35
2.2 Hloubka vnikání ve zvláštních případech uspořádání difrakčního experimentu, pojem "nekonečná" tloušťka vzorku	39
2.3 Efektivní hloubka vnikání T_{ef}	40
3. Pojem napětí	50
3.1 Tenzor napětí a deformace	50
3.2 Definice vložených a zbytkových napětí	54
3.3 Hlavní příčiny vzniku zbytkových napětí	59
3.3.1 Napětí I.druhu	59
3.3.2 Napětí II.druhu	62
3.3.3 Napětí III.druhu	64
3.3.4 Superpozice různých druhů zbytkových napětí	65
4. Makroskopická napjatost krystalové mřížky	67
4.1 Mřížková deformace	67
4.2 Obecný vztah difrakčního měření napětí	70
4.3 Rentgenografické elastické konstanty	70
4.4 Charakteristické rysy difrakční tenzometrie	75
5. Metodika měření napětí monochromatickým zářením	80
5.1 Homogenní stav napjatosti	80
5.1.1 Obecně orientovaný stav trojosé napjatosti	80

5.1.2	Lineární závislost mřížkové deformace $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ na $\sin^2\psi$	86
5.1.3	Metoda " $\sin^2\psi$ "	87
5.1.4	Speciální případy metody $\sin^2\psi$	91
	a) Metoda dvou expozic	91
	b) Metoda jedné expozice	92
	c) Metoda určení součtu hlavních napětí $\sigma_1 + \sigma_2$	98
5.2	Nehomogenní stav napjatosti	100
	5.2.1 Charakteristické znaky difrakce na krystalcích vystavených nehomogennímu napětí.	100
	5.2.2 Gradient napětí	103
	5.2.3 Destruktivní stanovení průběhu zbytkových napětí $\sigma(T)$	107
6.	Detektory ve strukturní rentgenografii	113
	6.1 Klasifikace detektorů	113
	6.2 Fotografická emulze	114
	6.3 Bodové detektory	118
	6.3.1 Ionizační komora, detektor proporcionální a Geigerův-Müllerův	118
	a) Ionizační komora	119
	b) Detektor proporcionální a Geigerův-Müllerův	119
	6.3.2 Fluorescenční stínítko, detektor scintilační a polovodičový	121
	a) Fluorescenční stínítka	121
	b) Scintilační detektory	122
	c) Polovodičové detektory	123
	6.3.3 Diskriminátor, amplitudový analyzátor, vlastnosti bodových detektorů	124
	a) Detekční řetězec	124
	b) Základní charakteristiky bodových detektorů	126
	6.4 Polohově citlivé detektory	128
	6.4.1 Mozaikové a multielektrodové pozičně citlivé detektory	128
	6.4.2 Televizní dvojrozměrný detektor	129
	6.4.3 Zobrazovací desky, plošné zobrazovače (imaging plates)	130
7.	Rentgenografická tenzometrická technika	133
	7.1 Obecná charakteristika současného stavu	133
	7.2 Stacionární zařízení	134
	7.2.1 Braggovo-Brentanovo uspořádání	134
	7.2.2 Seemannovo-Bohlinovo uspořádání	141
	7.3 Přenosné rentgenové tenzometry	142
	7.3.1 Difraktometry	142

7.3.2	Aparatury s fotografickou registrací záření	143
7.3.3	Československé prototypy zařízení k rentgenografické analýze napětí v objektech o rozměrech do 15 cm	144
7.4	Srovnávací měření daného stavu zbytkové napjatosti různými rentgenografickými tenzometrickými technikami	144
8.	Faktory ovlivňující tenzometrická měření	146
8.1	Nejdůležitější příčiny chybné tenzometrické interpretace difrakčních měření	146
8.2	Hrubozrnné materiály	147
8.2.1	Možnosti vyhlazení difrakčních linií na rentgenogramech	147
8.2.2	Počítačová registrace difrakčních linií	148
8.2.3	Měření na materiálech s různými velikostmi krystalků	149
8.3	Elastická anizotropie	150
8.4	Textura	153
8.4.1	Charakter závislosti $\varepsilon_{\varphi\psi}(\sin^2\psi)$ u materiálů s texturou	153
8.4.2	Metody rentgenografické analýzy napětí na materiálech s výraznou texturou	154
9.	Měření napětí metodou energiově disperzní difraktometrie, tenzometrická analýza tepelnými neutrony	158
9.1	Energiově disperzní tenzometrická technika	158
9.2	Princip neutronové tenzometrie	161
10.	Nedifrakční metody měření zbytkových napětí	166
10.1	Mechanické metody	167
10.1.1	Stanovení zbytkových napětí u vzorků tvaru desek a hranolů	169
10.1.2	Aplikace na rotační tělesa (válce, trubky, kotouče, kroužky)	170
10.2	Fyzikální metody	171
10.2.1	Akustická metoda	172
10.2.2	Metoda difúze vodíku do povrchové vrstvy	172
10.2.3	Metoda křehkých laků	172
10.2.4	Fotoelasticimetrická metoda	172
10.2.5	Relaxační metoda	173
10.2.6	Metoda založená na měření mikrotvrdomosti	173
10.2.7	Metoda akustické emise	174
10.2.8	Ultrazvuková metoda	174
10.2.9	Magnetické metody	175

11. Aplikace klasických rentgenografických tenzometrických metod na homogenní stavy rovinné zbytkové napjatosti kovových materiálů	178
11.1 Napjatost povrchové vrstvy po indukčním kalení	179
11.2 Napětí tepelná a transformační	180
11.3 Deformační zbytková napětí	181
11.3.1 Jednoosá tahová zkouška jako prototyp makroskopicky homogenní deformace; pojem orientovaných mikronapětí	181
11.3.2 Vznik makroskopického stavu zbytkové napjatosti po jednoosé tahové zkoušce	186
11.3.3 Ohybová zkouška	187
11.4 Difrakční analýza relaxace zbytkových napětí	188
11.4.1 Pojem relaxace napětí a její obecné zákonitosti	188
11.4.2 Příklady difrakčního výzkumu relaxace zbytkových napětí v kovových materiálech na bázi α -Fe	191
11.5 Napjatost vyvolaná kuličkováním	197
11.5.1 Základní charakteristiky kuličkování	197
11.5.2 Hloubkový profil vyvolaný kuličkováním	198
11.5.3 Faktory ovlivňující zbytkovou napjatost po kuličkování	199
11.5.4 Ilustrace příznivých účinků kuličkování	201
11.5.5 Možnosti aplikace rentgenové tenzometrie na povrchy kuličkovaných materiálů	203
11.6 Zbytkové napětí po frézování, soustružení a válečkování	204
11.6.1 Frézování	204
11.6.2 Soustružení	204
11.6.3 Válečkování	205
11.7 Tepelně-chemické zpracování	206
11.8 Napětí v ochranných povlacích	207
11.9 Měření napětí v kompozitech a plastech	208
11.9.1 Kompozity	208
11.9.2 Plastické hmoty	210
11.10 Výzkum vztahu zbytkové napjatosti a technologie výroby závitu šroubů z austenitické oceli	210
11.11. Rentgenografická difrakční diagnostika zbytkové napjatosti vyvolané balotínováním chromniklové oceli	211
11.12 Určení tenzoru deformace a napětí na povrchu broušených a balotínovaných vzorků ocelí	212

12. Příklady rentgenové difrakční analýzy nehomogenních napěťových polí v povrchových vrstvách kovových materiálů	217
12.1 Nehomogenity napětí v rovině povrchu vzorku	218
12.1.1 Zbytková napětí vyvolaná laserovým ohřevem	218
12.1.2 Tepelné zpevnění elektronovým paprskem	221
12.1.3 Rentgenová topografie napjatosti okolí svarového švu	221
12.1.4 Analýza napětí v okolí čela únavové trhliny	226
12.1.5 Zbytková napjatost broušeného povrchu	228
12.1.6 Napjatost soustruženého povrchu vzorků austenitické oceli 08Ch18N10T	230
12.1.7 Nehomogenity axiálních zbytkových napětí na povrchu broušených segmentů náprav motorových lokomotiv	232
12.1.8 Nehomogenity zbytkových napětí na mechanicky opracovaném povrchu železných materiálů	233
12.2 Využití konečné hloubky vnikání rentgenových paprsků k analýze napěťových stavů s gradientem ve směru povrchové normály	238
12.2.1 Kvalitativní identifikace gradientu napětí z průběhu závislosti $\bar{\varepsilon}(\sin^2\psi)$	238
12.2.2 Specifické rysy rentgenové tenzometrie u materiálů s malou absorpcí záření	241
12.2.3 Diskuse vlivu gradientu napětí na rentgenografickou tenzometrickou analýzu vzorků namáhaných čistým ohybem	243
12.2.4 Centrálně symetrický stav dvojosé napjatosti s gradientem ve směru povrchové normály	245
12.2.5 Difrakční stanovení tloušťky tlakově předpjaté vrstvy na povrchu vzorků leštěné oceli	248
12.2.6 Stanovení průběhu $\sigma(T)$ v povrchových vrstvách vystavených centrálně symetrickému stavu dvojosé napjatosti	249
12.2.7 Interpretace závislosti $\bar{\varepsilon}^{310}(\sin^2\psi)$ naměřené na povrchu leštěných vzorků chromové oceli	251
12.2.8 Stanovení složek tenzoru napětí se složkami proměnnými ve směru povrchové normály	254
12.2.9 Identifikace napěťových nehomogenit pomocí záření různé pronikavosti	257
13. Difrakční tenzometrická analýza keramických látek	260
13.1 Příčiny vzniku zbytkových napětí v keramice	260
13.2 Keramické vrstvy na kovovém substrátu	265

13.3 Modelování rentgenografického tenzometrického experimentu na korundové keramice	267
13.4 Ilustrace aplikací rentgenové tenzometrie na keramické látky (experimentální výsledky dosažené v rentgenografické laboratoři FJFI ČVUT)	268
13.4.1 Zbytkové mikrodeformace vyvolané mletím monokrystalů křemíku	268
13.4.2 Stav povrchové zbytkové napjatosti po rychlém ochlazení kompaktního vzorku polykrystalického Al_2O_3	269
13.4.3 Analýza napětí kompaktních korundových vzorků pomocí záření různé pronikavosti	270
13.4.4 Zbytková napětí v plazmaticky stříkaných vrstvách Al_2O_3	272
13.4.5 Difrakční tenzometrická analýza povrchových vrstev samonosné keramiky	273