

DIFFRACTION ANALYSIS OF THERMAL RESIDUAL STRESS-RELAXATION**DIFRAKČNÍ ANALÝZA TEPELNÉ RELAXACE ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ**

Kraus Ivo, Ganev Nikolaj

The residual stresses, set up in components during manufacture or operation, are of considerable significance because of the effect they may have on the deformation and failure behaviour of the component under mechanical load. The stability of these residual stresses is thus of fundamental and practical interest. The paper deals with the X-ray investigation of thermal residual stress-relaxation in surface layers of steel components.

1 Pojem relaxace napětí a její obecné zákonitosti

Pokles napětí, k němuž v materiálu tělesa dochází postupnou přeměnou elastické deformace v plastickou, je označován jako relaxace napětí. Rychlost, s jakou relaxace napětí probíhá, záleží na druhu materiálu, jeho předcházejícím zpracování, velikosti napětí, na teplotě a čase, po který stav napjatosti trvá. V praxi může být vliv relaxace jak užitečný tak nepříznivý. Otázka, do jaké míry se zbytková napětí při mechanickém namáhání zachovávají nebo uvolňují, je proto předmětem nejen základní, ale i aplikované tenzometrické analýzy technických materiálů. V mnoha případech usiluje výrobní technologie o dosažení časově neměnných zbytkových napětí (např. tlakovým předpětím povrchových vrstev součástí se zvyšuje jejich mez únavy). Ilustrací negativního působení stabilních zbytkových napětí může být koroze pod napětím.

Zbytková napětí existující ve výrobcích lze snížit, případně zcela odstranit cflévědomým dodáním tepelné nebo mechanické energie. Zbytkové elastické deformace se dají změnit vhodnými deformačními procesy na deformace plastické. Tato transformace může být realizována pohybem dislokací, difúzními procesy apod. Obvykle se na poklesu zbytkových napětí podílí zároveň větší počet faktorů. K nejdůležitějším způsobům, kterými lze zbytkové napětí snížit, patří žhání (temperování, popouštění) a jednosměrná nebo cyklická deformace. Některé technologie mechanického opracování povrchu kovových materiálů mají dvojí účinek:

jeden typ napětí uvolňují, druhý vyvolávají. Taková situace nastává např. v průběhu brokování (balotinování) tahově předpjatých oblastí broušených povrchů ocelových dílů. Po nárazu sférických částic škodlivá tahová napětí v povrchové vrstvě vymizí (relaxují) a novou plastickou deformací vznikne požadovaný stav zbytkové tlakové napjatosti.

Získání experimentálních údajů pro kvantitativní popis relaxace napětí na základě mechanických měření je časově i ekonomicky náročné. Velmi dobrých zkušeností v této oblasti bylo však dosaženo s nedestruktivní rentgenovou difrakční technikou.

Běžné mechanické metody indikují změny vyvolané relaxací napětí v celém objemu zkoumaného vzorku. Kromě "makroskopické" povahy mají výsledky mechanických tenzometrických metod ještě jeden významný charakteristický rys - odpovídají superpozici deformací elastických a plastických. Rentgenovou difrakcí určujeme naproti tomu relaxační jevy jen v tenké povrchové vrstvě vzorku a registrované změny mřížkových deformací se týkají výhradně elastického chování materiálu. Kromě analýzy pružných deformací krystalové mřížky umožňují rentgenografické metody i studium natáčení a zjemňování krystallků.

Z faktorů ovlivňujících relaxaci byla zkoumána nejčastěji teplota, velikost krystallků, předcházející plastická deformace materiálu za studena, bodové poruchy (příměsi). Povšimněme si podrobněji relaxace napětí za vyšších teplot.

Zbytková napětí, vznikající v praxi při tváření, tepelném zpracování nebo spojování (svaření) lze odstranit spolehlivě tak, že se napjaté těleso několik hodin žihá při teplotě $T \approx 0,5T_s$ (K) a potom je zvolna ochlazeno na pokojovou teplotu (symbol T_s značí teplotu tání uvažovaného kovu). Dobu žhání určují především rozměry výrobku a jeho stav. Protože teplota $0,5T_s$ (K) leží v oblasti rekrytalizační teploty, dá se očekávat úplné odstranění makroskopických napětí. Mikroskopická napětí se však žháním jen sníží, jelikož zbývající mřížkové poruchy (zvláště dislokace) a u heterogenních materiálů také rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti jednotlivých fází budou vznik napětí podmiňovat i nadále. Pro relaxaci napětí při zvýšených teplotách platí, že v jistých mezích se dá srovnatelného poklesu napětí dosáhnout s nižší teplotou, ale delší dobou žhání. Na tepelnou relaxaci napětí má vliv nejen úroveň zbytkové napjatosti, ale i technologie, která ji vyvolala. Kalící napětí se např. uvolňují při nižší teplotě než napětí vyvolaná opracováním (broušením) nebo tahovou plastickou deformací.

K relaxaci zbytkových napětí dochází rovněž účinkem cyklického tepelného namáhání, ozařováním neutrony nebo působením střídavých magnetických polí (u feromagnetických látek).

2 Příklady difrakčního výzkumu relaxace zbytkových napětí v materiálech na bázi α -Fe

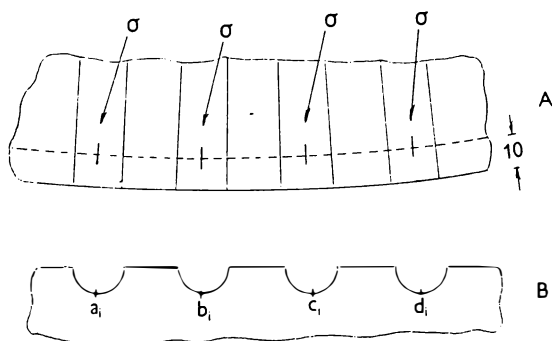
Byla aplikována rentgenografická tenzometrická metoda jedné expozice bez referenční látky se zářením $\text{CrK}\alpha$. Svazek paprsků vycloněný cylindrickým kolimátorem o průměru 1 mm dopadal na zkoumaný povrch vzorků pod úhlem 45° ; vzdálenost filmu od ozářené oblasti povrchu (plocha cca $1,5\text{mm}^2$) byla 46 mm. Kromě posunů analyzovaných difrakčních linií $\{211\}$ byla určována i jejich šířka, která je mírou superpozice mikroskopických napětí a

zjemnění koherentních oblastí. Chyba měření makroskopických napětí, vyplývající z přesnosti stanovení úhlové polohy linií, činila 40-50MPa.

2.1 Relaxace zbytkových napětí v povrchových vrstvách vzorků kolektoru parogenerátoru

Byly zkoumány 2 typy vzorků:

1. tepelně nezpracovaný segment ze stěny kolektoru,
2. část segmentu žíhaného 24h při teplotě 450°C.



Polohy proměřovaných oblastí (na obou vzorcích) i směry určovaných makroskopických napětí jsou zakresleny na obr.1 a naměřené výsledky shrnuty v tabulce 1.

Použitou technologii žíhání se tedy dosáhlo téměř dokonalé relaxace zbytkových tlakových makroskopických napětí ve všech proměřovaných oblastech a_i , b_i , c_i , d_i . Výrazný pokles šířky difrakčních linií svědčí

Obr.1 Schéma poloh proměřovaných oblastí na vzorcích 1 a 2;
A-pohled shora, B-pohled ze strany

rovněž o uvolnění mikroskopických napětí. (Šířka linie standardu, kterým byl vyžíhaný prášek železa, měla velikost $0,87^\circ$.)

Tabulka 1

Hodnoty napětí σ (MPa) a šířky difrakční linie W ($^\circ$) určené v polohách a_i , b_i , c_i , d_i na vzorcích č.1 a 2:

Vzorek, měřené veličiny		Poloha			
		a_i	b_i	c_i	d_i
1	σ	-598	-586	-543	-980
	W	2,14	2,09	1,96	2,20
2	σ	-105	-46	-43	-58
	W	1,17	1,18	1,10	1,09

2.2 Relaxace napětí po různých způsobech utěšňování teplosměnných trubek

Cílem difrakčního výzkumu bylo studium vlivu technologie utěšňování teplosměnných trubek na úroveň zbytkových napětí v otvorech zkušebních bloků pro hodnocení lomového chování můstků parogenerátorů VVER 1000.

Na rozdíl od experimentů popsanych v předcházejícím odstavci vykonávaly vzorky během expozice translační pohyb $\pm 5\text{mm}$, takže ozářená oblast vzorku měla plochu $1,5 \times 10\text{mm}^2$ (obr.2).

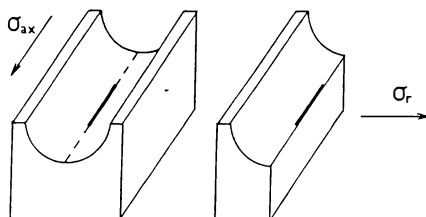
Chyby měření: axiální napětí ... 40MPa,
radiální napětí ... 60MPa,
šířky linií ... $0,05^\circ$

Zadavatelem bylo připraveno

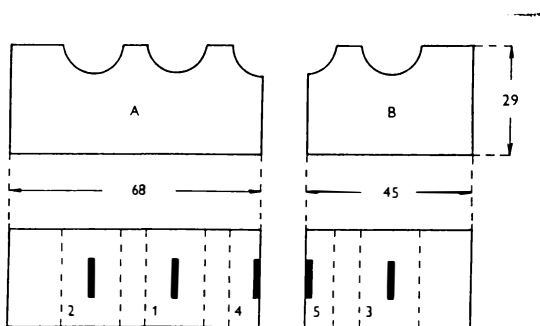
9 dvojic vzorků *A, B* (obr.3) lišících se svou technologickou "historií".

a) Vzorky ve výchozím stavu (po vyvrtání otvorů)

- ♦ B 19...bez tepelného zpracování
- ♦ B 17...tepelné zpracování:
290C°/24hod./vzduch
- ♦ B 18...tepelné zpracování:
450C°/24 hod./pec



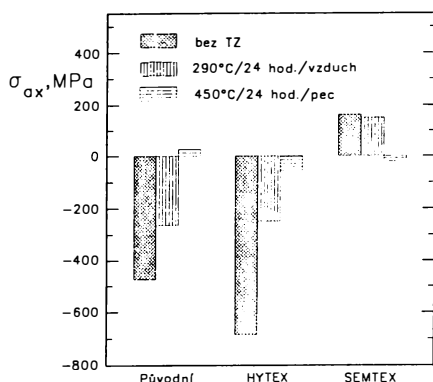
Obr.2 Povrchové oblasti ($1,5 \times 10\text{mm}^2$), na nichž byla měřena axiální (σ_{ax}) a radiální (σ_r) zbytková napětí



Obr.3 Nárys a půdorys vzorků *A, B* získaných rozřezáním segmentu ze stěny kolektoru PG; axiální napětí σ_{ax} (ve směru osy vrtaného otvoru) byla měřena v polohách 1,2,3, hodnoty radiálních napětí σ_r (kolmo k ose) odpovídají polohám 4,5

b) Vzorky po utěšnění technologii HYTEX

- ♦ B 7 ...bez tepelného zpracování
- ♦ B 2 ...tepelné zpracování:
290C°/24 hod./vzduch
- ♦ B 1 ...tepelné zpracování:
450°/24 hod./pec



Obr. 4 Grafické znázornění středních hodnot zbytkových napětí σ_{ax} určených na vzorcích A, B ve výchozím stavu a po aplikaci technologie utěšňování HYTEX a SEMTEX bez tepelného zpracování a po TZ při 290°C resp. 450°C

c) Vzorky po utěšnění technologií SEMTEX S-35

- ◆ B 15...bez tepelného zpracování
- ◆ B 9...tepelné zpracování:
290°C/24 hod./vzduch
- ◆ B 12...tepelné zpracování:
450°C/24 hod./pec

Dále bylo provedeno referenční měření na destičkách o rozměrech (15x100)mm² s broušeným povrchem, a to

- ◇ bez tepelného zpracování,
- ◇ po žíhání 24h na vzduchu při teplotě 290°C.

Výsledky měření

1) Destička s broušeným povrchem; výsledky jsou středními hodnotami z obou ploch.

Stav po broušení:

- ◇ podélné napětí $\sigma_L = -317 \pm 40$ (MPa),
- ◇ příčné napětí $\sigma_T = -425 \pm 40$ (MPa).

Stav po tepelném zpracování:

- podélné napětí $\sigma_L = -283 \pm 40$ (MPa),
- příčné napětí $\sigma_T = -383 \pm 40$ (MPa).

2) Vzorky A, B získané rozřezáním segmentu kolektoru PG; střední hodnoty napětí σ_{ax} , σ_r ze všech měření na vzorcích A, B stejné technologické historie jsou graficky znázorněny na obr. 4 a 5.

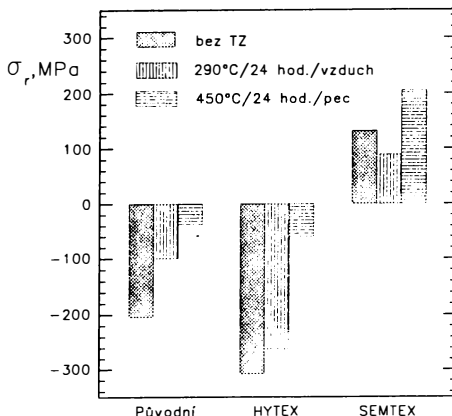
Závěry

- ◆ Žíháním poklesla napětí na povrchu destičky s broušeným povrchem o ca 10%.
- ◆ Na povrchu vzorků ve výchozím stavu jsou osová i radiální napětí tlaková. Tepelným zpracováním jejich velikost klesá, při 450°C prakticky vymizí (v rámci chyby měření).

♦ Po utěsnění technologií HYTEX vzrostla osová i radiální tlaková napětí oproti výchozímu stavu o cca 50%. Tepelné zpracování při 450°C vyvolalo pokles tlaků na hranici jejich měřitelnosti.

♦ Utěsnění SEMTEXem vedlo naopak k relaxaci původních tlaků a ke vzniku napětí tahových, která v radiálním směru nevymizela ani po tepelném zpracování při 450°C.

♦ Z hodnot šířek W lze konstatovat, že největší plastická deformace povrchových vrstev nastává technologií HYTEX; hodnota W před TZ (2,02 $\mu\theta$) je více než dvojnásobná vzhledem k šířce naměřené u téže difrakční linie práškového karbonylového α -Fe (0,86 $\mu\theta$).



Obr.5 Grafické znázornění středních hodnot zbytkových napětí σ_r určených na vzorcích A,B ve výchozím stavu a po aplikaci technologie utěsňování HYTEX a SEMTEX bez tepelného zpracování a po TZ při 290°C resp. 450°C

Literatura

- [1] Kraus I., Trofímov V.V.: Rentgenová tenzometrie, Academia, Praha 1988
- [2] Kraus I.: Rentgenografie nehomogenních napěťových polí, Academia, Praha 1990

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