

POUŽITÍ METODY MOIRÉ K MĚŘENÍ PLASTICKÝCH  
DEFORMACÍ PŘI TVÁŘENÍ ZA STUDENA

ING. JAN ŠANOVEC - ČVUT-FSI PRAHA  
ING. VLADIMÍR POSPÍŠIL-ÚVZU ŠKODA PLZEŇ

Pro návrh nové technologie výroby prstenců z nemagnetické oceli roztahováním pomocí pěti trnů, byla při postupném tváření za studena použita ke sledování deformací metoda Moiré. Deformace byly sledovány na obvodu modelového kroužku  $\varnothing 120/30 \times 75$  mm a to jak v axiálním, tak v obvodovém směru. Na povrch dvou modelových kroužků byly fotografickou cestou nanášeny linkové sítě s roztečí 80 linek na 1 cm. Jejich orientace byla obvodová a axiální. Místo s nanášenou měrnou sítí bylo při tváření chráněno papírovým obalem. Ochranný obal byl snímán po každém protlačení trnu. Při každém měření se na měřené místo přiložil srovnávací rastr s původní četností linek. Vzniklé interferenční pruhy se fotografovaly a jejich rozteč se měřila milimetrovým měřítkem s přesností odečítání  $\pm 0,2$  mm. Lepší kontrastnosti obrazu se docílilo vyčerpáním vzduchu rotační vývěvou pod srovnávacím rastrem. Výsledky měření byly uspořádány do čtyřech tabulek a potvrzují nerovnoměrnost axiální deformace a rovnoměrnost obvodové deformace.

Při výrobě prstenců velikých rozměrů z austenitické ocele je požadována malá magnetičnost při vysoké pevnosti a dostatečné houževnatosti. Tyto požadavky lze u austenitické ocele splnit jen zpevnováním za studena. Nejčastější způsoby zpevnování jsou nakovávání na trnu, roztahování pomocí trnů a hydraulické roztahování. Nakovávání na trnu je dosud nejčastějším způsobem zpevnování. Při tomto způsobu dochází ke značné nerovnoměrnosti mechanických vlastností a vnitřních pnutí jak po obvodu, tak po tloušťce prstence. Toto má nepříznivý vliv na únosnost a spolehlivost prstenců. Deformace protlačováním trnů a hydraulické roztahování dává stejnoměrnější mechanické vlastnosti a stejnoměrnější rozdělení vnitřních pnutí. Proto je těmto technologickým postupům věnována značná pozornost.

V rámci řešení tohoto problému byla zjišťována rovnoměrnost deformace při protlačování trny. Ke zjištění velikosti a rovnoměrnosti deformace na povrchu v axiálním a obvodovém směru byly deformovány dva modelové kroužky. Model prstence byl proveden v měřítku 1:10 ze stejného materiálu a stejnou technologií jako skutečný prstenec. Výchozí rozměr modelu před tvářením za studena je  $\varnothing 120/90$ , výška  $v=75$  mm. Modelem byly postupně protlačovány trny o celkovém počtu 5 kusu. Protlačovalo se vždy stejným směrem. Celková deformace změřená ze zvětšení vnějšího průměru byla 19,8%. Po protlačení každého trnu byla měřena velikost a nerovnoměrnost deformací pomocí interferenční metody Moiré. Deformace byly měřeny v axiálním a obvodovém směru. Metoda Moiré se úspěšně využívá k měření místních i celkových deformací a využívá efektu mechanické interference světla a je mimo rámec této přednášky její bližší rozbor. Odkazujeme na literaturu [1], [2], [3], [4].  
Volba sítě.

Na model byly nanášeny na dvou místech o velikosti  $7 \times 5$  cm líkové sítě. Jedna se směrem linek ve směru obvodovém a druhá ve směru axiálním. Četnost linek bylo nutno zvolit optimální, aby vzniklé interferenční pruhy měly ještě rozteč odečitatelnou v celém rozsahu deformací. Jako minimální rozteč byly vzaty 2 až 3 mm. Z celkové předpokládané deformace 19,8% byla spočítána jako nejjednodušší četnost linek 50/cm. Takový rastr však nebyl k dispozici, proto se použil rastr nejbližše vyšší a tím byl rastr 80 linek/cm.

Nanášení sítě.

Model bylo nutno v místě kam chceme síť nanést dokonale vyleštit plstěným kotoučem a odmastit acetonem. Na takto připravený povrch o velikosti 7x5 cm se nastříkala světlocitlivá emulze, pomocí stříkací pistole. Dále se tato emulze musela sušit 15 min. při 70°C. Kopírování rastru 80 linek/cm probíhalo kontaktním způsobem, pomocí zdroje ultrafialového záření. Dokonalé přilnutí rastru bylo docíleno jeho vzduchotěsným přilepením a vysátím vzduchu pod ním rotační vývěvou. Osvětlení se dělo pomocí osvětlovacího panelu 4x125 W. Po vyvolání ve speciální vývojce byl vzorek vypálen 15-20 min. při 120-140°C, z důvodů docílení větší odolnosti proti mechanickému poškození. Ovrstvené místo bylo nutno při manipulaci a při protlačování chránit proti poškození zalepením. Ochranný obal byl se mán pouze při měření.

Protlačování trnů.

Protlačování trnů se dělo na trhacím stroji ZD 100. Protlačovacími byly tvářeny dva modely označené č.5 a č.15. Rychlost protlačování byla maximální, kterou bylo možno docílit při 100% uzavřeném přepouštěcího ventilu. Při protlačování broušených trnů jako mazadlo se používal sírník molybdeničitý. Na fot. 2.1 je celkový pohled na dosud netvářený model se sadou 5-ti protlačovacích trnů.

Měření.

Pro každém protlačení byly vzniklé interferenční pruhy proměřeny pomocí ohebného měřítka s dělením po 1 mm. Odečítání bylo prováděno s přesností ± 0,2 mm. Také se prováděly zkoušky s měřením roztečí interferenčních pruhů pomocí průhledného měřítka s dělením po 0,1 mm. Toto měřítko však nebylo možné použít vzhledem ke špatné odečitelnosti i při desetinásobném zvětšení.

Zvětšování výraznosti interferenčních pruhů.

Výraznost interferenčních pruhů byla malá, proto se prováděly pokusy se zvětšováním výraznosti. Pokusy se konaly na plochém vzorku o rozměrech 5x10 cm. Vzorek s nanesenými sítěmi byl zpracován těmito způsoby:

- a./zaleptání 30 sec. v chlovidu železitém
- b./pokovení v kyanidové mědicí lázni o síle vrstvy 2 mikrony.

c./pokovení v niklovací lázni vrstvou o síle 2 mikronů  
Žádný z těchto postupů odečitatelnost nevětšil. Spíše došlo  
ke zhoršení. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto zůstat při dosa-  
vadní úpravě exponovaných a vyvolaných sítí, t. j. při vypálení.  
Fotografování.

Bylo prováděno z důvodů vyhodnocování měření a z doku-  
mentačních důvodů. Zařízení k fotografování:

a./jednooká zrcadlovka Praktina IIa, objektiv Tessar  
2,8/50

b./mezikroužky/dvojitý výtah/

c./laboratorní stativ

d./žárovky mléčné 100W-2 ks

e./film dokument 9 Din

f./vývojka energicky pracující ve složení-pyrokatechin  
2g/litr, siřičitan sodný 0,5g/litr, hydroxid sodný 2,5

g./kyselý ustalovač

h./papíry Foma C 2111

Zkoušky fotografování interferenčních pruhů byly konány nej-  
prve na zkušebním plochém vzorku 5x10 cm. Na tomto povrchu se  
podařilo vyloučit vliv reflexivnosti vyleštěného povrchu  
různým úhlem dopadu světla/od žárovky 100 W/. Jako optimální  
byl zjištěn úhel  $45^{\circ}$  a vzdálenost objektivu od vzorku 30 cm.  
Potíže však nastaly při fotografování interferenčních pruhů  
na modelech. Zde se nepodařilo různým osvětlováním vyloučit  
vliv reflexivnosti vyleštěného povrchu. Na negativu vznikaly  
pruhy, které znemožňovaly odečítání z fotografií. Byl změněn  
úhel osvětlení, počet žárovek zvýšen na dvě a měnila se vzdá-  
lenost objektivu od kroužku. Dále se zkoušelo osvětlení roz-  
ptýleným světlem. Nejlepší výsledky byly při podmínkách od-  
povídajících zkušebnímu plochému vzorku, t. j. úhel natočení  
osy objektivu k ose kroužku  $45^{\circ}$  a vzdálenost objektivu od  
vzorku 30 cm. Z takto získaných fotografií se však nemohlo  
vycházet při vyhodnocování, protože měřítko fotografií bylo  
nepřesné. Fotografie slouží pouze k dokumentačním účelům.  
Každý vzorek byl fotografován 10x. Vždy pět snímků s axiál-  
ní a obvodovou deformací. Podmínky při fotografování-clona 8,  
exposice 2,4,8 sec. dle údajů exposimetru.

Měření a výsledky měření.

Rozteče interferenčních pruhů byly měřeny po každém protlače-

U trnů na obou modelech č.5 a č.15.2 modelu v místě nanesené sítě byl sejmut ochranný obal a na toto místo se lepicí páskou přilepil srovnávací rastr a pod ním vyčerpál vzduch rotační vývěvou. Směr srovnávacího rastru byl takový, aby souhlasil se směrem původně nanesené sítě. Linkování v axiálním směru nám dalo interferenční pruhy pro obvodovou deformaci a linkování v obvodovém směru nám dalo interferenční pruhy pro axiální deformaci. Po změření roztečí na obou místech a o fotografování byla osíťovaná místa zalepena, aby se nepoškodila při dalších protlačovacích operacích. Toto se dělo u každého modelu 5 krát. Naměřené a spočítané výsledky jsou uspořádány do 4. tabulek. Spočítané hodnoty deformací jsou z celkové změny vnějšího průměru nebo ze změny výšky modelu. Tabulka I a II udává obvodové deformace kroužků č.5 a č.15. Tabulka III a IV udává axiální deformace kroužků č. 5 a č.15. Poměrné deformace byly počítány dle vzorců - viz literatura [1] až [8].

Význam jednotlivých symbolů v tabulkách.

$\epsilon_{\text{naměř.}}$  [‰] -deformace vypočítaná z deformací interferenčních pruhů

$\epsilon_{\text{vypoč.}}$  [‰] -deformace vypočítaná ze změny vnějšího  $\emptyset$

$\epsilon_s$  [‰] -deformace vypočítaná ze změny výšky modelu

$$\epsilon_s = \frac{m}{v} - 1 \cdot 100$$

$v_m$  [mm] -výška modelu po deformaci

$v$  [mm] -výška modelu /75 mm/

$f_1$  [mm] -rozteč interferenčních pruhů na okraji modelu na straně počátku vtlačování trnů

$f_2$  [mm] -rozteč pruhů uprostřed

$f_3$  [mm] -rozteč pruhů na okraji modelu na straně vybíhání trnu

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  -poměrné deformace

$F$  [Mp] -protlačovací síla

Závěr.

Z tabulek I a II vyplývá, že obvodová deformace je rovnoměrná, což se předpokládalo. Axiální deformace - viz tab. III a IV je nerovnoměrná a zvětšuje se od okraje modelu ve směru vtlačování trnů. Naměřené celkové axiální deformace se u modelu č.5 mění od 7,3 do 10,2 %, u modelu č.15 od 6,5 do 9,4 %. V příslušných poměrech se měnily axiální deformace po každé protlačova-

cí operaci. Směr vtlačování trnů byl vždy stejný. Naměřené hodnoty mají veliký význam pro praxi, neboť lze předpokládat, že podobně se budou deformovat i skutečné prstence.

Seznam vyobrazení.

Fotografie č.1-protlačovaný kroužek se sadou 5-ti protlačovacích trnů

Tabulka č.1-obvodová deformace u modelu č.5

Tabulka č.II- - / / - č.15

Tabulka č.III-axiální deformace u modelu č.5

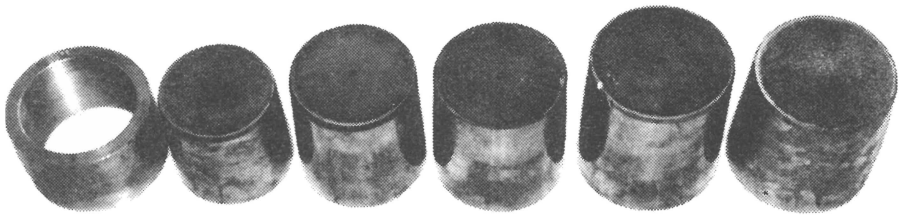
Tabulka č.IV- - / / - č.15

literatura.

- [1] -P.M.Šnejderovič, O.A.Levin: "Izmerenije polej plastičeskien deformacij metodom Muara." Mašinostrojenije Moskva 1972.
- [2] -P.Theokaris : "Muarivyje deformaciji pri issledovaniji deformacij." Mir-Moskva 1972 .
- [3] -J.Bednár: "Experimentální pružnost".SNTL/Alfa-Praha 1970.
- [4] -A.J.Durelli.V.S.Parks: "Analiz deformacij s izpolzovanijem Muara." Mašinostr.Moskva 1970.
- [5] -P.I.Poluchin, Voroncov, Kudrin, Čičeněv: "Deformaciji i naprjaženija pri obrabotke metalov davlenijem." Metalurgija Moskva 1974.
- [6] -M.Jindra: "Experimentální zjišťování zbytkových napětí a deformací po plastické deformaci kovů tvářením za studena metodou sítí. Dipl.práce ČVÚT-FSI 1973."
- [7] -J.Kahovec: "Proměření velikosti a rozložení deformace na modelovém pouzdru z oceli 17 455 po deformaci za studena." ČVÚT-FSI Praha 1974-dipl.práce.
- [8] -Z.Kautský: "Proměření velikosti a rozložení deformace na modelovém pouzdru z oceli 17 455 po deformaci za studena." ČVÚT-FSI Praha 1975-dipl.práce.



foto. 3.1 - protlačovaný kroužek se sadou 5-ti protlačovacích trnů



Tabulka č.I -obvodová deformace u modelu č.5

číslo operace	f /mm/	$\epsilon$ naměř. /‰/	$\epsilon$ vypoč. /‰/
I	3,4	3,84	4,5
II	2	6,68	6,5
III	1,2	11,6	12,5
IV	0,9	16,1	16,5
V	0,7	21,8	19,8

Tabulka č.II -obvodová deformace u modelu č.15

číslo operace	f /mm/	$\epsilon$ naměř. /‰/	$\epsilon$ vypoč. /‰/
I	3,3	3,96	4,5
II	1,9	7,05	6,5
III	1,2	11,6	12,5
IV	1,0	14,3	16,5
V	0,8	18,5	19,8

Tabulka III-axiální deformace modelu č.5

číslo operace	f/mm/			naměř.			v <sub>m</sub> /mm/	ε <sub>s</sub> /‰/	F /Mp/
	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>			
I	6	5	4,5	2,02	2,44	2,7	73	2,66	34,5
II	3,5	3	2,5	3,44	4	4,75	71,5	4,65	41,5
III	2,5	2,5	2	4,75	4,75	5,3	70,5	6	45
IV	2	1,8	1,5	5,9	6,5	7,7	69,5	7,4	48,5
V	1,6	1,5	1,1	7,3	7,7	10,2	68	3,35	48

Tabulka č.IV-axiální deformace modelu č.15

číslo operace	f/mm/			naměř.			v <sub>m</sub> /mm/	ε <sub>s</sub> /‰/	F /Mp/
	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>			
I	5	4,5	4	2,44	2,7	3,03	73	2,66	36
II	3,2	2,8	2,5	3,75	4,27	4,75	71,5	4,65	43
III	2,5	2	1,8	4,75	5,3	6,5	70,5	6	44
IV	2	1,5	1,3	5,9	7,7	8,8	69	8	51
V	1,8	1,5	1,2	6,5	7,7	9,4	68	3,35	50