

ZJIŠŤOVÁNÍ ZBYTKOVÝCH PNUTÍ METODOU KŘÍŽOVÉHO ŘEZU

Ing. M. Orna, CSc, k.p. Škoda Plzeň
RNDr. I. Plundrová, SVÚSS Praha

Resumé

V příspěvku je proveden rozbor geometrických závislostí velikosti snímače, délky a hloubky řezu a odhad chyby vzniklé při měření zbytkových pnutí metodou křížového řezu. Uvedené závislosti byly zkoumány numericky řešením deformačního a napjatostního pole v okolí křížového řezu metodou konečných prvků.

Před několika lety přednesl Ing. Havlík z ÚVZÚ k.p. Škoda na konferenci EAH příspěvek, v němž navrhoval pro kontrolu úrovně zbytkové napjatosti použití nové polodestrukční metody. V principu jde o modifikaci trepanační metody vhodné i pro aplikaci v těžkých provozech.

Měření zbytkových pnutí ve srovnání s měřením napjatosti od vnějších sil má své specifické zvláštnosti. Především přesnost výsledků není srovnatelná s běžnými tenzometrickými měřeními. Pole pnutí bývá velice složité, obvykle prostorové, často se značnými gradienty. Velice nepříznivá okolnost při použití odporových tenzometrů tkví v tom, že jde o prvé zatížení snímače a projevuje se tedy v plné míře hysterese. Měření nemůže být opakováno, proto neexistuje ani kontrola naměřených hodnot. Tuto skutečnost je možno poněkud potlačit tím, že měří průběh pnutí, snímače se zdvojují, případně se měří v souměrných bodech součásti. Tyto přístupy však nelze považovat za kontrolu, pouze přispívají k zvýšení důvěry v naměřené hodnoty. Dále je třeba si uvědomit, že pnutí zpravidla nelze uvolnit zcela, ale pouze v menší či větší míře přerozdělit a tak se ke skutečné hodnotě přiblížit. Kromě toho při obrábění hrozí poškození snímače, při použití chladicí kapaliny snížení svo-

dových odporů, při ohřátí posuv nuly snímače. Faktorů, které mohou vnést chybu do měření je celá řada. Z tohoto pohledu vyplývá, že reálné požadavky na přesnost měření jsou podstatně nižší než je obvyklé při měření napjatosti od vnějších sil.

Označením polodestruktivní rozumí se skutečnost, že k uvolnění pnutí dojde přerušením vazby mezi povrchem se snímačem a okolním materiálem. Ze změny deformace určí se pak velikost pnutí. Oddělení je provedeno v tloušťce technologického přídatku. Jde tedy o metodu aplikovatelnou na aktivních výrobcích.

Při kontrole úrovně zbytkových pnutí je obvykle nejdůležitější určení maximálních hodnot, proto skutečnost, že chyba měření roste při zjišťování malých deformací bývá pro praxi přijatelná.

Před aplikací této metody považovali jsme za užitečné provést numerický rozbor napjatostního a deformačního pole v oblasti křížového řezu. Úloha byla zjednodušena tím, že směry hlavních napětí jsou známy - jedná se např. o měření na válcové tlakové nádobě nebo na výkovku rotoru turbíny a cílem je určení většího z obou napětí na povrchu.

Závislost mezi velikostí snímače, délkou řezu, hloubkou řezu a velikostí chyby měření byly numericky zkoumány na čtvercové desce 200 x 200 mm se dvěma na sebe kolmými řezy umístěnými uprostřed. Řešení průběhu deformačního a napjatostního pole v desce s křížovým řezem bylo provedeno metodou konečných prvků ve dvou etapách:

1. jako rovinná úloha za podmínek rovinné napjatosti s řezem v plné tloušťce,
2. jako prostorová úloha s uvažováním vlivu hloubky řezu na pole deformací na povrchu.

V první skupině úloh byly řešeny tři alternativy napjatosti, kdy na okrajích desky působila následující napětí:

$SX = 0,$	$SY = 100 \text{ MPa},$
$SX = 100 \text{ MPa},$	$SY = 100 \text{ MPa},$
$SX = 200 \text{ MPa},$	$SY = 100 \text{ MPa}.$

Vzhledem k symetrii řezu byl vždy počítán pouze jeden kvadrant, rozdělený na 900 prvků. Délka řezu B byla zvolena 30 mm, šířka 2 mm.

Vliv relace délka řezu/ délka snímače byl vyhodnocován tak, že délka řezu byla podle zadané sítě konstantní a délka snímače se měnila. Uvažován byl poměr $D/S = 2 - 10$, odpovídající délce snímače 3 - 15 mm. Vypočtená deformace EX ev. EY v délce snímače byla pak integrována (vytvořena střední hodnota) a porovnávána s deformací v desce před rozříznutím (s rovnoměrným polem napjatosti). Takto vypočtené chyby vlivem geometrie řezu a snímače jsou shrnuty v následující tabulce a vyneseny v grafu na obr. 2.

Délka řezu ----- délka snímače	Velikost chyby v % vztažená k většímu z obou napětí (MPa)		
	Napjatost SX/SY		
	100 / 0	100 / 100	200 / 100
2	6%	25%	12%
3	5	17	10
4	4	12	7
5	3	8	5
7,5	2	4	2
10	1	2	1

Z rovinného rozboru vyplývá, že k minimalizaci chyby vlivem geometrie D/S lze doporučit délku řezu 5-násobnou k délce snímače. Za těchto podmínek lze předpokládat, že chyba v poměrné deformaci nepřesáhne 10%. Ve směru menšího z působících napětí při rovinné napjatosti však chyba může dosahovat značně větších hodnot podle poměru SX/SY.

V druhé etapě bylo sledováno prostorové řešení, které mělo zejména optimalizovat hloubku řezu. Tato skupina úloh zahrnuje 4 varianty numerického řešení trojosé napjatosti v desce s měnící se hloubkou křížového řezu, přičemž

napětí působící na okrajích desky bylo zvoleno $SX = 200 \text{ MPa}$
 $SY = 100 \text{ MPa}$. Prostorová síť obsahovala 484 prvků, které
zahrnují objem jednoho kvadrantu $100 \times 100 \times 65 \text{ mm}$. Délka
řezu byla zvolena 30 mm, hloubky řezu byly 5; 6,5; 8; a
10 mm. Síť byla navržena nerovnoměrná s minimální velikos-
tíelementů v oblasti řezu $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}$. Pole napjatosti a
deformací na povrchu bylo graficky zpracováno vykreslením
izočar. Při vyhodnocování chyby se u těchto případů prosto-
rové napjatosti postupovalo stejně jako při rovinném řeše-
ní. Pro zpřesnění odhadu chyby byla užita zjemnělá prosto-
rová síť podél hloubky řezu. Pole deformací a napětí je v
tomto případě vyhodnocováno v polovině tloušťky povrcho-
vých elementů tj. v hloubce 1 mm.

Závislost velikosti chyby na poměru délky řezu k ve-
likosti snímače a hloubky řezu je uvedena v následující
tabulce a znázorněna diagramem na obr. 3.

Chyba měření v %				
Hloubka řezu/ délka snímače				
D/S	5/6	6,5/6	8/6	10/6
	0,83	1,08	1,33	1,67
30/6 5	19,4%	9,2%	2,9 %	1,6%

Z rozboru vyplývá, že pro délku řezu k délce snímače
 $D/S = 5$ a poměr hloubky řezu k délce snímače $h/S = 1,0$,
chyba vlivem ne zcela uvolněné deformace je menší než 10%
a pro $h/S = 1,2$ je menší než 5%.

Numerický rozbor napjatostních a deformačních poměrů
byl na závěr doplněn experimentálním ověřením, zaměřeným
na vliv hloubky řezu.

Měření bylo provedeno při jednoosé napjatosti zatěžo-
váním na poměrnou deformaci $1\,000/\mu\text{m/m}$. Použit byl snímač
M 120, sledovány byly deformace pro hloubky 6 - 12 mm

při délce řezu 20 a 80 mm. Měření provedl Ing. Zimmerhakl a Ing. Forý z k.p. Škoda. Výsledky jsou shrnuty na obr. 4.

Z měření vyplývá:

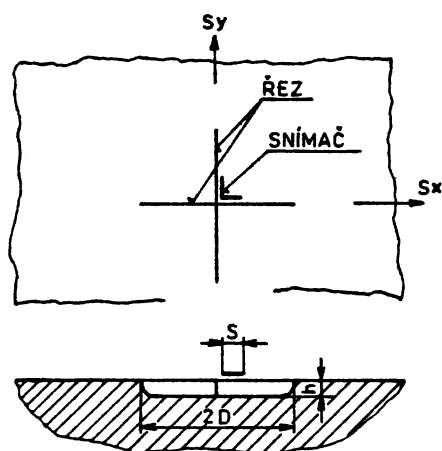
Pro poměr hloubky řezu k délce snímače $h/S = 1,2$ velikost chyby je menší než 10%. Vliv délky řezu k délce snímače v rozsahu $D/S = 5$ až 10 je malý.

Rozdíl mezi velikostí chyby určené výpočtem a experimentálně souvisí se skutečnou vzdáleností řezu od vinutí tenzometru a s charakterem napjatosti S_X/S_Y .

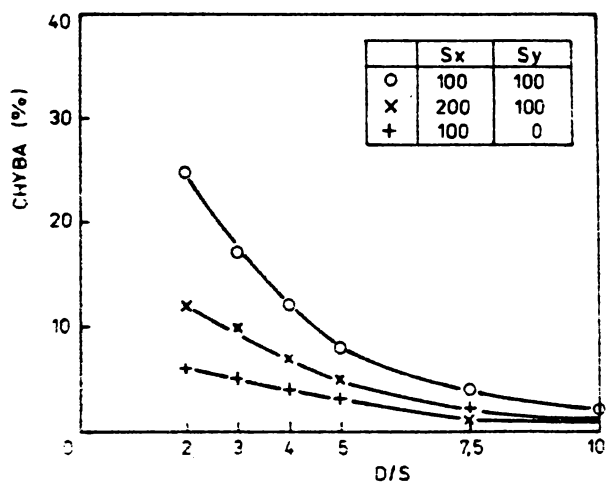
Z á v ě r y:

Při aplikaci metody křížového řezu ke kontrole zbytkové napjatosti se doporučuje:

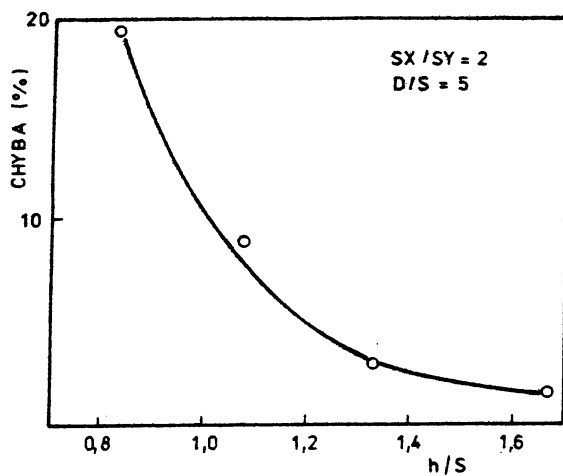
1. Volit poměr délky řezu k délce snímače D/S nejméně 5. Zvětšování D/S nad 10 nemá prakticky vliv na velikost uvolněné deformace.
2. Volit poměr hloubky řezu k délce snímače h/S nejméně 1,0. Hloubky větší než $h/S = 1,2$ nemají podstatný vliv na přesnost měření.



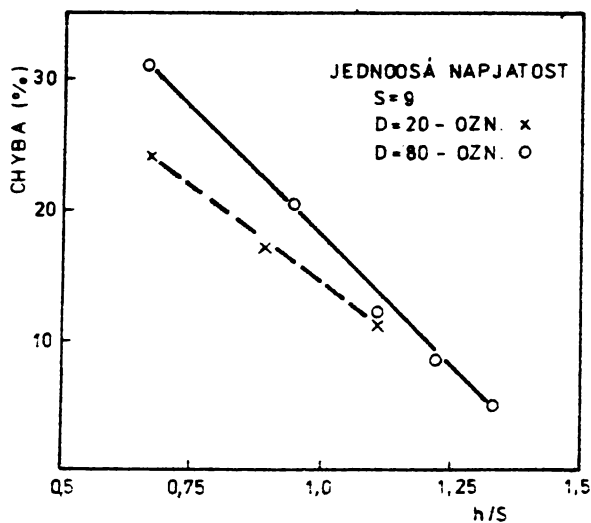
Obr. 1 Princip uvolnění zbytkové napjatosti a umístění tenzometrů při užití metody křížového řezu



Obr. 2 Závislost chyby řešení na poměru délky řezu k tloušťce snímate a poměru působících napětí



Obr. 3 Závislost chyby měření na poměru hloubka řezu k délce snímače pro $D/S = 5$ a $SX/SY = 2$



Obr. 4 Výsledky experimentálního ověření chyby měření v závislosti na h/S pro jednoosou napjatost