

MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH PNUTÍ - APLIKACE

Příspěvek seznamuje s některými aplikacemi zjišťování zbytkových pnutí při použití takových způsobů experimentálního měření, které jako měřicí čidlo používají odporový tenzometr. Jsou zde uvedeny způsoby měření a vyhodnocení zbytkových pnutí, které byly hlouběji propracovány na pracovišti ÚVZÚ-VS1/NS z důvodů požadavků některých závodů koncernu Škoda. Tyto požadavky vznikly z praktické potřeby určení velikosti zbytkových pnutí, neb tyto společně s provozním zatížením významně ovlivňují celkové namáhání součásti a tím i životnost a spolehlivost celého zařízení.

Navrtávací metoda je způsob měření zbytkového pnutí, přičemž navrtáváme do měřené součásti otvor \varnothing 4 mm do hloubky 4 až 5 mm. Princip zjištění pnutí v povrchové vrstvě spočívá v tom, že měříme rozdíl čtení tří tenzometrů, tzv. tenzometrické růžice před a po částečném uvolnění pnutí navrtáním. Ze znalosti rozměrů otvoru, tenzometrů a teorie rozložení napětí kolem otvoru lze vypočítat plnou hodnotu pnutí [1,2,4]. Uplatnění tato metoda našla při měření zbytkového pnutí na rotorech turbogenerátorů, pňhových nastavcích vinutí turbogenerátorů, dílech válcovacích stolic a dalších součástkách z běžných ocelí třídy 11 + 15, které jsou sice tepelně zpracované avšak nezpevněné kalením. U materiálů povrchově kalených např. ozubené pastorky, přítlačné válce válcovacích stolic, u nichž materiál vykazoval tvrdost dle BRINELLA až 280 HB byl použit místo dvoubřitové frézy speciální nástroj z rychlořezné oceli [7].

Metoda rozřezu do kříže vychází z teoretického předpokladu, že v ploše přerušené zářezem nemůže do určité vzdálenosti od zářezu být napětí. Nařízne-li se tedy plocha obsahující již napětí (zde zbytkové pnutí), musí se toto pnutí uvolnit, což zaznamená předem nalepený tenzometr s velmi krátkou základnou. Zářez provádíme rozbrušovacím kotoučkem tl. 1 mm do hloubky, 3 až 4 mm šikmo pod nalepený tenzometr. Zářez se provádí křížově a deformace se snímá tenzometrickou pravouhloú růžicí. Vyhodnocení se provádí z běžně známých vzorců pro výpočet hlavních napětí $\sigma_{1,2}$ (MPa) a úhlu poctočení φ ($^{\circ}$) ze znalosti směrů a velikosti deformací $\epsilon_{0,45,90}$ ($\%$ m/m) [5]. Metoda křížového rozřezu se uplatňuje při zjišťování zbytkových pnutí u součásti z materiálu třídy 17 až 19, jejichž materiálové hodnoty (mez kluzu, mez pevnosti, houževnatost) dosahují velmi vysokých hodnot a dále u všech kalených součástí. Prakticky bylo metody použito na bandážích turbogenerátorů, kalených ozubených kolech a dílech válcovacích stolic.

Pro obě výše popsané polodestruktivní metody platí následující. Je-li ponechána na měřené součásti pro finální obrobění taková síla přídavku, že opracováním se odstraní vruby jež vznikly použitím obou metod (otvor, zářezy), lze tyto metody řadit mezi způsoby nedestruktivní. Lze konstatovat, že společnou nevýhodou obou těchto metod je značná pracnost a nezbytnost použití tenzometrů a dovozu, proto se použití omezuje pouze na závažnější experimentální řešení u nichž vyhodnocení

na návaznost na matematické řešení problému.

Způsoby určení zbytkových pnutí, které jsou dále uvedeny, byly navrženy a použity pro některé případy měření u nichž některá hlediska nedovolovala využít metody navrtávací nebo rozřezu do kříže. Pro měření zbytkových pnutí ve svarech na modelu stahovacích desek koster turbogenerátoru o tloušťce 60 mm z materiálu 11378.1 byla použita "sloupková metoda" [6]. Uvolnění pnutí bylo dosaženo obfrézováním dvojice tenzometrů po vrstvách do hloubky, kdy měřená deformace vykazovala skoro nulový přírůstek. Při návrhu pracovního postupu se vycházelo z předpokladu, že vzhledem k souměrnosti podle osy svaru budou mít hlavní pnutí směr rovnoběžný a kolmý na svar. Namísto růžice složené ze tří tenzometrů (používané při obecném směru napjatosti) postačily dvojice tenzometrů. Pnutí se vypočetlo z rozdílu čtení před a po frézování ze vztahu pro dvojnosou napjatost. Jako snímače byly použity tenzometry M 120 Mikrotecna a frézování ostrůvků bylo provedeno válcovou frézou $\varnothing 10$ mm. Tuto metodu je možno řadit mezi metody destruktivní. Při umístění tří tenzometrů na ostrůvek by bylo možno vyhodnotit skutečný směr a velikost hlavních napětí a tak rozšířit možnost využití metody pro obecně definovanou rovinnou napjatost.

Pro zjišťování zbytkových pnutí v rotačně symetrických součástkách byla použita "Sachsova metoda" [3]. Její princip spočívá v postupném odfrézování vrstev materiálu. Je to destruktivní metoda, u níž dojde ke zničení zkoušené části. Na rozdíl od jiných destruktivních metod, lze za použití menšího množství tenzometrů získat průběh napětí v rozsahu odebrané části materiálu. Předpokladem použitelnosti metody je zachování charakteru rozložení pnutí ve všech radiálních řezech.

Odvození Sachsovy metody vychází z předpokladu, že odstraněním vrstvy materiálu na určitém poloměru se zruší účinek pnutí v rozsahu této vrstvy, což se na zbývající části projeví jakoby připojením stejného napětí opačného smyslu. Toto napětí způsobí na protějším povrchu "doplňkové" napětí, z něhož se nazpět vypočte velikost pnutí na tomto poloměru. Při řešení se použilo graficko-početního způsobu vyhodnocení. Metoda byla zavedena za účelem vyšetřování zbytkového pnutí ve velkých prstencích z austenitické oceli, u nichž musí být dosaženo požadované pevnosti mechanickým zpracováním za studena. Při této technologii se nelze vyhnout vzniku zbytkového pnutí.

Jako poslední destruktivní metoda, která je na našem pracovišti používána, je metoda "rozřezu na kostičky" předem polepené tenzometry [5]. Využití této metoda našla při zjišťování zbytkových pnutí všude tam, kde měření proběhlo na zkušebních vzorcích nikoliv na funkčních součástkách. Při použití metody u vzorků bandáží vyrobených z austenitické oceli, byly tenzometry lepeny na zkušební obruč vždy ve dvojicích a to ve směru tečném, osovém nebo radiálním. V tomto případě umístění tenzometrů vyplývalo z předpokladu, že při souměrné součásti a souměrné technologii zpevnování budou směry hlavních pnutí odchýleny od zmíněných geometrických tvarů. U součásti nesplňujících tuto podmínku je nutno opatřit každou měřenou kostičku tenzometrickou růžicí. Pro vyhodnocení se používají vzorce pro rovinnou napjatost a to jak

pro dvojice tenzometrů nebo trojici tenzometrů tzv. tenzometrickou různici. Výhodou metody je možnost použití tenzometrů tuzemské výroby (např. Mikrotechna), nevýhodou je vždy plně rozrušení měřené součásti. Metoda rozřezu byla použita u bandáží turbogenerátorů, na dílech trolejbusů Tr 14,15, svařovaných tenkostěnných vzorcích atd.

Závěrem je nutno podotknout, že metody nařezávání do kříže a navrtávání dopládejí na výhodu malého poškození povrchu určitou (statisticky nezjištěnou) nepřesností, která může být u malých měřených pnutí řádově rovna jejich hodnotě, čili může např. úplně změnit znaménko i úhel pnutí. Proto, pokud by se mělo z naměřených hodnot uvažovat na mechanismus vzniku pnutí, je nutné to provést z větších naměřených hodnot, které nejsou tolik ovlivněny rozptylem měření.

Seznam literatury :

- [1] Redner J.: Measurement of Residual Stresses by Blind Hole Drilling Method, 1971.
- [2] Havlík J.: Vyhodnocení zbytkového pnutí naměřené navrtávací metodou, 1978.
- [3] Havlík J., Weinberg O.: Zjišťování zbytkových pnutí v součástkách tvaru kotouče a jejich ověření, 1979.
- [4] Havlík J., Weinberg O.: Měření pnutí v hrubém obrobku rotoru 500 MW, 1982.
- [5] Havlík J., Weinberg O.: Měření zbytkových pnutí v bandážích rotoru 350 MW z oceli "P 900", 1986.
- [6] Havlík J., Weinberg O.: Měření zbytkových pnutí ve svařech vzorků desek sloupkovou metodou, 1985.
- [7] Weinberg O.: Měření zbytkových pnutí navrtávací metodou na vzorcích ozubených pastorků, 1987.