EAN '96

34th Conference of Experimental Stress Analysis
34. konference o experimentální analýze napětí
3. - 6.6. 1996, Plzeň, Czech Republic

RESIDUAL STRESS DETERMINATION WITHIN THICK PLASMA SPRAYED COATINGS
STANOVENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V PLAZMATICKY VYTVÁŘENÝCH VRSTVÁCH VELKÉ TLOUŠŤKY

Dolhof V., Václavík J., Weinberg O.

The residual stresses of thick plasma sprayed coatings on CSN 11 523 steel were studied for different coating thicknesses and layers combination. The strains distribution within three test samples with respect to the depth was measured using incremental hole-drilling strain gauge method. The Young's modulus and Poisson's ratio of coatings were determined using a cantilever beam specimen method to evaluate the corresponding residual stresses. A high level of residual stresses can limit the maximum thickness of coatings that can be deposited prior to spallation or cracking.

1. Úvod

Při renovaci motorů a hřídelů velkých průměrů (řádově až 1 m) je nutné nanášet tepelně na funkční plochy vrstvy velkých tlouštek, které dosahují až 25 mm. Funkční plochy se opracují a renovovaný výrobek lze opět provozovat.

Zbytková napětí v tepelně vytvářených povlacích vznikají podle současných znalostí [1] z následujících příčin:

a) Objemové smršťování během tuhnutí roztavených zrn
b) Deformace vyvolané výsledkem změn v objemu spojené s fázovou transformací v pevném stavu
c) Anizotropie tepelné roztažnosti
d) Nedokonalé přizpůsobení tepelné roztažnosti mezi substrátem a vrstvou (vrstvami) povlaku

e) Deformace vyplývající z teplotních gradientů mezi povlakem a substrátem během nástřiku a ochlazování na teplotu okolí
f) Tuhost, množství tepla a vodivost
g) Deformace vytvořené v průběhu posledních průchodů nástřiku, kdy tloušťka povlaku a povrchová teplota vzrůstá, kdežto rychlost ochlazování se zmenšuje.

Všechny výše zmíněné příčiny zbytkových deformací/napětí se uplatní do určité míry komplexním způsobem. Navíc by měl být uvažován také spolupůsobící mechanismus uvolňující deformace t.j. procesy jako plastické tečení, interdifuse, nukleace a růst fází (způsobující vznik mikrotrhlin), které ovlivňují zbytková napětí a tím i obecně mechanické vlastnosti povlaků , ale i substrátu. Porozumění mechanismu vzniku a uvolňování deformací je základem pro optimalizaci plazmaticky vytvářených povlaků.

Vysoká úroveň zbytkové napjatosti může omezit maximální tloušťku vrstvy, která může být nanesena, aniž by docházelo k tvorbě trhlin případně odlupování povlaku.

2. Materiály a experimentální postup

Zbytková napětí v tepelně vytvářených vrstvách velké tloušťky byla zkoumána na třech kruhových vzorcích o průměru 150 mm a tlouštce 20,5 mm, vyrobených z konstrukční oceli ČSN 11 523, při různých tloušťkách vrstev a kombinaci materiálů vrstev. Nanášené vrstvy byly tvořeny vaznou mezivrstvou NiAl (95/5), přechodovou graduovanou vrstvou 50% NiAl - 50% Metcoloy 2 a funkčním povlakem Metcoloy 2. Tepelný nástřik (Wire Electric Arc Spraying) byl prováděn zařízením METCO 4R.

Pro vyhodnocení zbytkových napětí bylo nutné určit modul pružnosti a Poissonovo číslo vytvářených povlaků. Pro tento účel byly vyrobeny rovněž z materiálu ČSN 11 523 dva zkušební nosníky o rozměrech 30x3 ... 220 mm, z nichž jeden byl jednostranně povlakován vrstvou NiAl o tloušťce 1,3 mm a druhý vrstvou Metcoloy 2 o tloušťce 0,7 mm.

Modul pružnosti a Poissonovo číslo povlaků i substrátu byly určeny experimentálně na vetknutém krakorcovém nosníku s využitím odporových foliových tenzometrů, nalepených na povrchu substrátu i povlaku v podélném i příčném směru. Z rovnic rovnováhy (1) pro síly a momenty,

$$0 = F_x = \iint \sigma_x \, dx\, dy \qquad P \cdot l = M_x = \iint \sigma_z \, z\, dz\, dy$$
$$0 = F_y = \iint \sigma_y \, dz\, dx \qquad 0 = M_y = \iint \sigma_y \, z\, dz\, dy \qquad (1)$$

za předpokladu lineárního rozdělení poměrné deformace po průřezu nosníku s povlakem, byly stanoveny modul pružnosti a Poissonovo číslo (viz Tab.1).

Tab. 1. Experimentálně stanovené hodnoty E a ν

Materiál	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [1]
ocel 11 523	210 000	0,3
NiAl (95/5)	60 000	0,15
Metcoloy 2	81 000	0,17

3. Metoda měření a vyhodnocení zbytkových napětí

Pro určení průběhu zbytkového napětí v povlaku byla užita přírůstková semidestruktivní navrtávací metoda, popsaná např. v [1]. Komerčně dodávané tenzometrické růžice jsou dostupné pouze pro průměr vrtaného otvoru 4 mm. Proto pro vrstvy velké tloušťky byla tenzometrická růžice vytvořena z jednotlivých tenzometrů HBM 6/120LY11, nalepených na roztečné kružnici 25,6 mm. Otvor o průměru 10,1 mm byl vrtán stupňovitě po 0,5 mm diamantovým trubkovým vrtákem. Všechny rozměry byby odvozeny z tenzometrické růžice EA 031 RE-120 (měřítko 10:1).

Po vyhodnocení průběhů zbytkového napětí byla modifikována metoda MPA Stuttgart [2]. Tato metoda, na rozdíl od všeobecně používaného software RESTRESS, (který vychází z rovnoměrného rozdělení napětí po hloubce a vyhodnocuje ekvivalentní napětí), zahrnuje do kalibračních konstant a vyhodnocení hlavních napětí i průběh naměřených poměrných deformací po hloubce vrtného otvoru.

Kalibrační konstanty jsou určeny výrazy

$$K_x(\xi) = \frac{E}{\sigma} \cdot \frac{d\varepsilon_x(\xi)}{d\xi}, \qquad K_y(\xi) = -\frac{E}{\nu \cdot \sigma} \cdot \frac{d\varepsilon_y(\xi)}{d\xi}, \tag{2}$$

kde normovaná hloubka $\xi = z/D_0$ (D_0 ... průměr vrtaného otvoru, z ... hloubka vrtaného otvoru). Kalibrační konstanty je možno vyjádřit ze Shajerových konstant $\bar{a}, \bar{b}$ [3] po matematické úpravě výrazy

$$K_x(\xi) = -\frac{1}{2}\left[(1+\nu)\frac{d\bar{a}(\xi)}{d\xi} + \frac{d\bar{b}(\xi)}{d\xi}\right] \tag{3}$$

$$K_y(\xi) = \frac{1}{2\nu}\left[(1+\nu)\frac{d\bar{a}(\xi)}{d\xi} - \frac{d\bar{b}(\xi)}{d\xi} \right] \quad , \tag{4}$$

které je možno ověřit i experimentálně.
Dále lze vypočítat i složky zbytkových napětí v jednotlivých měřených směrech:

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2}\left[K_x(\xi)\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi)\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right] \tag{5}$$

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2}\left[K_x(\xi)\frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi)\left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} \right) \right] \tag{6}$$

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2}\left[K_x(\xi)\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi)\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right] \tag{7}$$

Pomocí vztahů Mohrovy kružnice lze určit dále i hlavní zbytková napětí

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_a(\xi)+\sigma_c(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \tag{8}$$

a úhel jejich orientace od osy tenzometru a

$$\alpha = \frac{1}{2}\arctan\frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \tag{9}$$

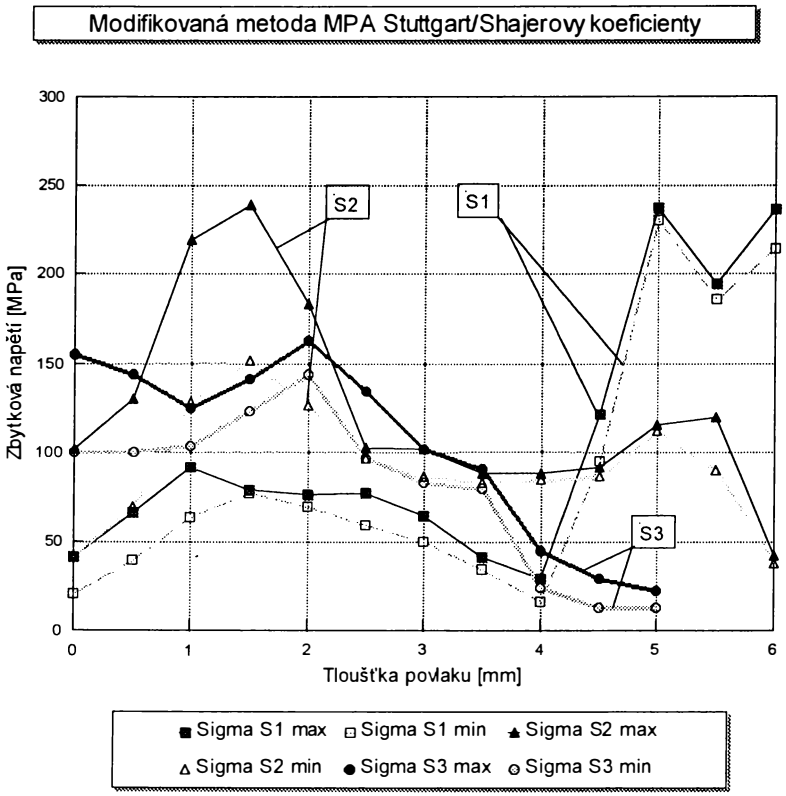
4. Experimentální výsledky

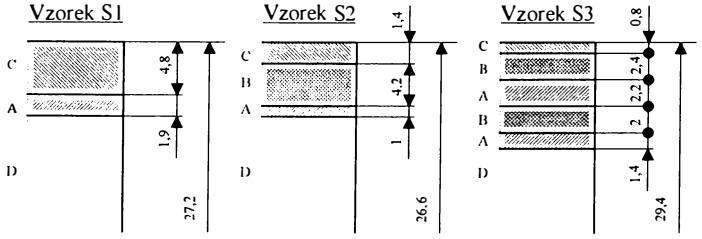
Průběhy zbytkových napětí v závislosti na tloušťce povlaku jsou pro všechny tři vzorky S1, S2, S3, včetně zobrazení kombinace a tlouštek povlaků, uvedeny na obr. 1.

Tloušťky vrstev a celková hloubka vývrtu byla stanovena z SEM snímků leštěných povrchů výřezů vzorků, zhotovených na mikroskopu JOEL JSM 840 (Obr.2).

Největší tahová zbytková napětí až +250 MPa byla zjištěna v povlacích vzorků S1 a S2. Ukazuje se rovněž, že není vhodné vytvářet jednotlivé, zejména funkční a přechodové povlaky velkých tlouštek, ale z hlediska dosažení nižší úrovně zbytkové napjatosti je výhodnější kombinace povlaků menších tlouštek jako u vzorku S3.

Obr. 1. Průběh zbytkových napětí po tloušťce povlaků





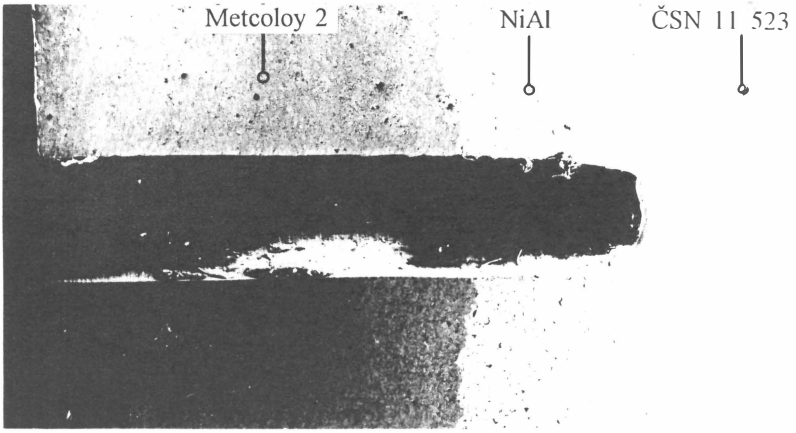
A .... povlak: Ni Al

B .... povlak: 50% Ni Al + 50% Metcoloy 2

C .... povlak Metcoloy 2

D .... substrát

Obr. 2. SEM leštěného povrchu výřezu vzorku S1



5. Závěr

Jedná se o první aplikaci přírůstkové semidestruktivní navrtávací metody a modifikované metody MPA Stuttgart při vyhodnocování zbytkových napětí v plazmaticky vytvářených vrstvách velkých tlouštek. Získané výsledky a zkušenosti naznačují schůdnost řešení této problematiky. Bude nezbytné experimentálně ověřit kalibrační konstanty z rovnic (3,4) a uskutečnit výzkum vytváření vrstev velkých tlouštek na větším počtu vzorků resp. výrobků.

Literatura

[1] Dolhof V., Václavík J., Weinberg O.: Pevnostní problémy spojené s vytvářením tenkých vrstev. Výzkumná zpráva ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Plzeň 1994.

[2] Schwartz T., Kockelmann H.: Die Bohrlochmethode - ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. Messtechnische Briefe 29 (1993), Helf 2.

[3] Measurements Group TECH NOTE TN-503-4, Residual Stress Measurement, 1993.

Václav Dolhof /Ing.,CSc.- Jaroslav Václavík /Ing. - Otakar Weinberg /Ing.
ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Tylova 57, 316 00 Plzeň
Telefon: (+4219) 7044861 / Fax: (+4219) 533358