

**RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF PLASMA SPRAYED COATINGS  
 ANALÝZA ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ PLAZMATICKY VYTVÁŘENÝCH VRSTEV**

Dolhof V., Musil J., Weinberg O.

A modified method performed with semi-destructive hole-drilling strain gauge technique has been proposed for residual stress measurement of plasma and HVOF sprayed coatings. The contribution describes this method used to measure stress levels in thermal sprayed stellite and WC-17 % Co coatings deposited onto 13 % Cr steel substrates. Results show that it is possible to optimize the process of forming the layers according to a suitable state of residual stresses.

**1. Úvod**

Ve výrobcích (nových i renovovaných) před vlastním vytvářením vrstvy existuje určitý stav zbytkové (vnitřní) napjatosti, způsobený technologickými vlivy při výrobě, případně při jeho provozu. Při plazmatickém vytváření vrstvy vlivem tepelně-napjatostních procesů dochází po vychladnutí rovněž ke vzniku zbytkové napjatosti ve vrstvě a přilehlé oblasti substrátu, která se superponuje k původnímu stavu zbytkové napjatosti.

Obecně platí, že tahová zbytková napětí snižují významně únavovou pevnost, trvanlivost a dobu životnosti konstrukčních materiálů, a proto lze předpokládat i plazmaticky vytvářených vrstev. Přiměřená tlaková napětí/deformace v nanesených vrstvách nebo povlacích jsou v provozu prospěšná a lze všeobecně očekávat zlepšení užitných vlastností a prodloužení životnosti součástí s těmito vrstvami a povlaky.

Zbytková napětí v plazmaticky 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, interdifuze, 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.

## 2. Rozvoj metodiky měření zbytkových napětí ve vrstvách

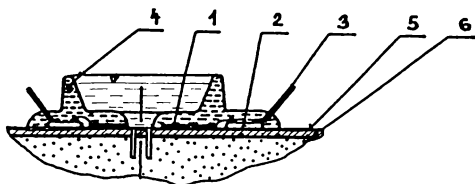
Pro měření zbytkových napětí ve výrobcích ŠKODA, a.s. je nejčastěji používána semidestruktivní navrtávací metoda se soustředným otvorem. Tato dlouhodobě známá metoda byla zpracována a uvedena v americké normě ASTM E 837-89 a tak byl dán impuls k jejímu širokému použití v oblasti technické a technologické kontroly. Pro měření zbytkových napětí v tvrdých plazmaticky vytvářených vrstvách STELLITE 6, WC 17 Co a j. byla tato metoda dále rozvíjena. Zpočátku bylo nutno nalézt vhodný nástroj pro vrtání otvoru o 4 mm resp. 1,5 mm podle typu předpokládané tenzometrické rúžice. Dostupný válcový vrták s vidiovými břity se neosvědčil, vůbec se nedařilo tvrdou vrstvu perforovat a rychle docházelo k otupení břitů. Navíc nebylo možno dodržet přesné ustředění otvoru. Konzultace problematiky perforování těchto tvrdých vrstev se zástupci předních světových firem Hottinger Baldwin Messtechnik, (HBM), GmbH, SRN a Vishay Measurements Group (VMG), USA, rovněž neumožnila řešení problému. Vhodné nástroje pro tyto speciální podmínky žádná z firem nedodává a nemohla ani poskytnout informace o výrobcích speciálních nástrojů.

Po důkladném průzkumu výrobních programů řady výrobců se nám podařilo nalézt výrobce speciálních diamantových trubkových vrtáků DIAZ Trutnov. Po řadě experimentů se podařilo nalézt optimální technologické podmínky (otáčky nástroje, přítlak, chlazení) pro perforování vrstvy a přilehlého substrátu.

Celková hloubka navrtání potřebná pro uvolnění pnutí je dána typem použité rúžice a průměrem použitého vrtáku. Otvor byl hlouben speciálním diamantovým trubkovým vrtákem. Navrtávací operace proběhla za intenzivního chlazení vodou. Krok stupňovitěho navrtávání jsme nepoužili rovnoměrný po celé hloubce otvoru. Do cca 1,5 násobku tloušťky nastříkané vrstvy byly jednotlivé stupně 0,05 mm. Poté, až do konečné hloubky cca 1,6 mm byl stupeň navrtávání 0,1 mm. Při použití vrtáku o průměru 4 mm od hloubky 1,5 mm byly stupně navrtávání 0,5 mm. Pro měření byly užity speciální tenzometrické rúžice 3/120 RY 21 a 1,5/120 RY 61S firmy HBM a rúžice TEA-09-062 RK-120 firmy VGM.

Etapa přípravy zkušební vzorku sestávala z úpravy povrchu vrstvy (lehké přerovnění velice jemným smirkem č.600) v oblasti místa pro nalepení tenzometrické rúžice, přitmelení rúžice jednosložkovým lepidlem Schnellklebstoff Z 70 firmy HBM resp. M-Bond 200 Adhesive firmy VGM, instalace vývodů a dále ochrany tenzometru proti vlhkosti ochranným tmelem Abdeck Kitt AK 22 firmy HBM. Řez měřeným místem je znázorněn na obr.1. Z ochranného tmelu AK 22 byl navíc vytvořen zásobník vody pro chlazení diamantového vrtáku.

Pro odečet změn deformací tenzometrické růžice po navrtání byl užit statický tenzometrický můstek Manual Kompenzátor MK



- 1 - Tenzometr
- 2 - Svorkovnice
- 3 - Vývodní vodiče
- 4 - Tmel AK 22
- 5 - Vrstva WC 17 Co
- 6 - Substrát

Obr.1. Řez měřeným místem

firmy HBM. Pro vyhodnocení byl užit software RESTRESS firmy VMG včetně grafických výstupů zpracování výsledků.

### 3. Výsledky experimentálních prací

Experimentální program stanovení zbytkových napětí v plazmaticky vytvářených povlácích STELLITE 6 a WC 17 Co na základním materiálu z oceli AK 1 TD se uskutečnil na osmi zkušebních vzorcích a tělesech.

Plazmatický nástřik (APS) - STELLITE 6. Shodnými parametry plazmatického nástřiku (APS) ( $Ar = 50$  l/min,  $H_2 = 9$  l/min,  $I_{vyboj} = 550$  A byly připraveny zkušební vzorky Š1 (tloušťka vrstvy 0,25 mm), vzorky S6, S7 (tloušťka vrstvy 0,4 mm) a dva vzorky bez označení (tloušťka vrstvy 0,6 mm).

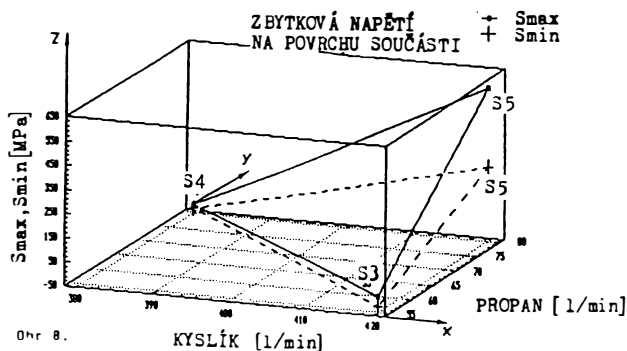
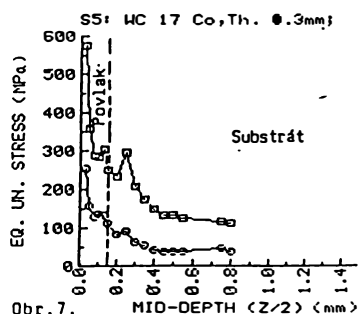
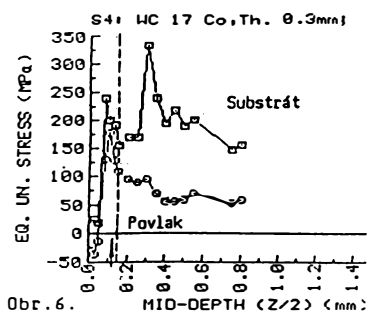
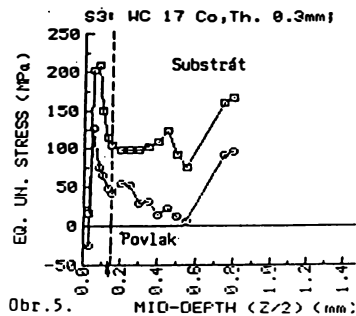
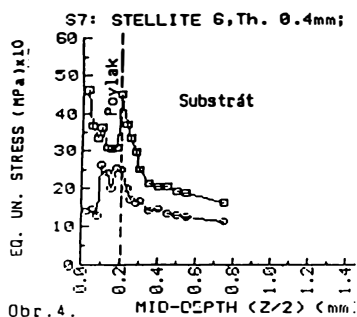
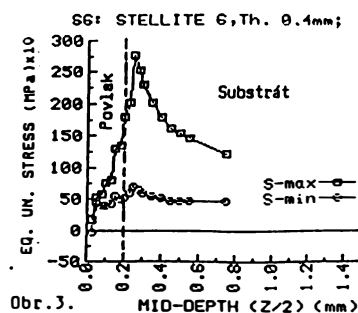
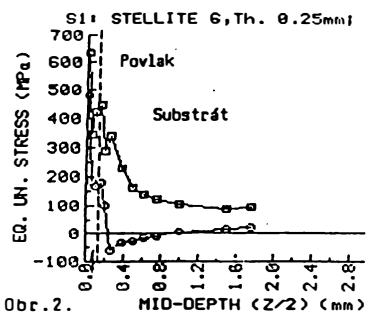
Průběhy zbytkových napětí po hloubce jsou pro všechny zkušební vzorky podobné, zejména pro vzorky S1 (obr.2.) a S7 (obr. 4) s maximálním tahovým napětím ve vrstvě 500 až 700 MPa a tahovým napětím 50 až 150 MPa v substrátu.

Rovněž u vzorku S6 (obr. 3.) byla na povrchu vrstvy STELLITE 6 zjištěna tahová zbytková napětí 100 až 500 MPa, ale v průběhu dalšího perforování došlo k postupnému nárůstu napětí  $S_{max}$  až na hodnotu 2750 MPa (fiktivní hodnota napětí) a  $S_{min}$  na hodnotu 700 MPa. Tento experimentálně zjištěný atypický průběh zbytkových napětí byl zřejmě způsoben narušenou adhesí vrstvy. Tenzometry, přitmeleny na povrch vrstvy vzorku S6, zjištěná vysoká, rovněž fiktivní, napětí pro substrát ( $S_{max} = 1200$  MPa,  $S_{min} = 500$  MPa) tento fakt přímo potvrzují.

Obecně lze uvést, že plazmatický nástřik (APS) STELLITE 6 vyvolá vysoká tahová napětí na povrchu i v celé vrstvě. Lze předpokládat, že s růstem tloušťky vrstvy narůstá i zbytková napjatost ve vrstvě, což může způsobit narušení adheze mezi povlakem a substrátem. Vzhledem k nepříznivým výsledkům s tloušťkami 0,4 mm nebyl vzorek STELLITE 6 s tloušťkou vrstvy 0,6 mm pro zjevné porušení adheze zkoušen.

Nástřik WC 17 Co metodou HVOF. Různými parametry nástřiku (množství průtoku  $O_2$  a propanu) metodou HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), za účelem ověření možnosti optimalizace parametrů procesu nanášení povlaku z hlediska stavu zbytkové napjatosti, byly připraveny zkušební vzorky S3 ( $O_2 = 420$  l/min, propan = 55 l/min), S4 ( $O_2 = 380$  l/min, propan = 80 l/min) a S5 ( $O_2 = 420$  l/min, propan = 80 l/min) s tloušťkou vrstvy 0,30 mm. Průběhy vyhodnocených experimentálně zjištěných napětí jsou uvedeny na obr. 5 až 7.

Pro vzorky S3 (obr. 5.) a S4 (obr. 6.) na povrchu vrstvy vznikají poměrně příznivá napětí ( $S_{max} = + 20$  MPa,



$S_{\text{mip}} = -30 \text{ MPa}$ ). Ve vzorku S5 (obr. 7.) vzniklo na povrchu vrstvy velké tahové napětí 580 MPa ( $S_{\text{max}}$ ) resp. 250 MPa ( $S_{\text{min}}$ ). Z prostorového zobrazení na obr. 8. je zřejmé, že vliv změny parametrů nástřiku nejvíce ovlivňuje úroveň i smysl zbytkové napjatosti ve vrstvě zvláště v povrchové oblasti. Generování tlakových napětí na povrchu vrstvy lze očekávat při parametrech procesu nástřiku, které se nachází na obr. 8. v trojúhelníku vymezeném osou x, y a úsečkou S3 a S4. Pro dosažení vysoké adheze musí být v rovině vrstvy a substrátu dostatečné tahové napětí/deformace, aby deformace ve směru kolmém k rozhraní vyčíslená podle vztahu

$$\varepsilon_3 = - \frac{\mu}{1 - \mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

byla tlaková. V našem případě dosáhla poměrná deformace  $\varepsilon_3$  po vyčíslení pro jednotlivé vzorky hodnot S3 = -207 m/m, S4 = -386 m/m, S5 = -571 m/m a tudíž požadavek tlakové deformace byl splněn. Lze předpokládat dosažení tlakové deformace  $\varepsilon_3$  na rozhraní mezi vrstvou a substrátem i při výše doporučené změně parametrů procesu nástřiku pro generování tlakových napětí na povrchu vrstvy.

Z průběhů zbytkových napětí po hloubce vzorků S3, S4 a S5 v řezech v substrátu (v hloubce 0,6 mm, 1,2 mm a 1,6 mm) vyplývá, že změna parametrů nástřiku úroveň zbytkové napjatosti již výrazně neovlivňuje. V substrátu o hloubce 1,6 mm od povrchu je úroveň zbytkové napjatosti všech vzorků prakticky shodná. Tato poměrně vysoká úroveň zbytkové napjatosti ve zkušebních vzorcích byla pravděpodobně způsobena dodatečným tepelným přeracováním dodaného materiálu za účelem dosažení požadovaných mechanických vlastností a úpravy mikrostruktury heterogenního sorbitu bez následného žhání na odstranění pnutí.

#### 4. Závěr

Na vzorcích s vrstvou WC 17 Co bylo zjištěno, že optimalizací parametrů procesu vytváření vrstev podle stavu zbytkové napjatosti je možno objektivním způsobem provádět a prakticky využívat. V porovnání s konvenčními metodami měření porozity a tvrdosti určení zbytkových napětí/deformací po hloubce vrstvy i substrátu poskytuje objektivnější prostředky zajištění kvality plazmaticky vytvářených povlaků a vrstev.

Vznik a tvorba zbytkových napětí/deformací je významně ovlivněna také geometrií, množstvím tepla a lokální tuhostí. Aby bylo možno výsledky laboratorních zkoušek aplikovat na nové výrobky i součásti v oblasti opravárenství, je nezbytné zaměřit další výzkum jednak na rozvoj metodiky analýzy stavu zbytkové napjatosti a rovněž na získání většího množství experimentálních dat pro postižení závislostí charakteru i úrovně zbytkové napjatosti v souvislosti s vytvářením plazmatických vrstev požadovaných vlastností.

#### Literatura:

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

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