

E xperimentální A nalýza N apětí

2004

HOLE DRILLING RESIDUAL STRESS MEASUREMENT OF THERMAL SPRAYED COATINGS

MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ ODVRTÁVACÍ METODOU VE VRSTVÁCH VYTVOŘENÝCH ŽÁROVÝM NÁSTRÍKEM

Michal Švantner¹, Josef Kuneš², Antonín Kříž³, Radek Enžl⁴

Thermal spraying represents an important application of material surface modification. Residual stress is one of the criteria that set the coating quality and its properties. The paper is focused on residual stress determination in HVOF (high velocity oxygen fuel) sprayed coatings. The residual stress is measured by hole drilling method; high velocity air turbine drilling device is used. A possibility of a diamond drilling mills usage is shown and analysed for hard materials drilling. Conditions of the hole drilling method utilization and sources of inaccuracies are discussed in relation to thin coatings residual stress measurement.

Keywords residual stress, hole drilling method, thermal spraying, HVOF

Klíčová slova zbytkové napětí, odvrtávací metoda, žárový nástřík, HVOF

Úvod

HVOF (high velocity oxygen fuel) žárový nástřík [1,2] je významná technologie v oblasti úpravy povrchu materiálu. Vyznačuje se nízkou teplotou plamene a vysokou rychlostí dopadajících částic, umožňuje vytvářet povlaky s vysokou hustotou, přilnavostí a nízkým obsahem oxidů a pórů. HVOF nástříky jsou nejčastěji používány pro nanášení ochranných povlaků odolných proti opotřebení a korozi.

Jednou z důležitých vlastností povlaků je zbytkové napětí [1]. Tahová napětí mohou způsobovat vznik a šíření trhlin, zhoršují únavové vlastnosti povlaku a omezují jeho maximální tloušťku. Tlaková napětí naopak vzniku a rozvoji trhlin zamezují a zlepšují únavové vlastnosti povlaku. V případě vysokých hodnot mohou způsobit adhezni porušení povlaku. Zbytková napětí

¹ Ing. Michal Švantner: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377422102, e-mail: michal.svantner@email.cz

² Prof.Ing. Josef Kuneš, DrSc.: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377632223, e-mail: kunes@ntc.zcu.cz

³ Dr.Ing. Antonín Kříž: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377422102, e-mail: kriz@kmm.zcu.cz

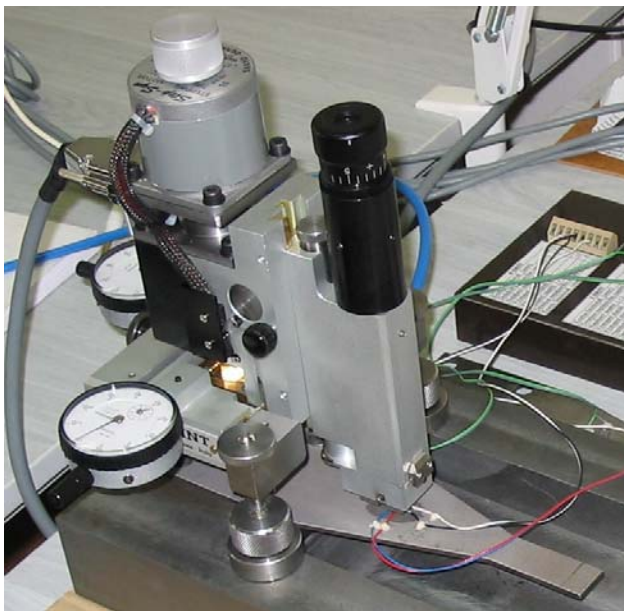
⁴ Ing. Radek Enžl, Ph.D.: Škoda Výzkum, s.r.o., Tylova 1/57, 316 00 Plzeň, Česká republika, tel: +420378132238, e-mail: radek.enzl@skoda.cz

v povlaciích vznikají kombinací vlivu: *quenching stress* (rychlé utužení částice na substrátu), *thermal stress* (rozdíl součinitelů tepelné roztažnosti povlaku a substrátu) a *peening stress* (plastická deformace při dopadu částice na substrát). Vzhledem k významu vlivu zbytkového napětí na vlastnosti povlaku je důležité najít vztah mezi zbytkovým napětím a depozičními parametry. Tento vztah tvoří jeden ze základních parametrů optimalizace procesu nástřiku.

Jednou z používaných metod pro měření zbytkových napětí v povlaciích je odvrtávací metoda [3,4]. Tato metoda je dobře zpracována z hlediska postupu i vyhodnocení pro standardní úlohy měření zbytkových napětí v objemových materiálech. Její použití pro tenké vrstvy má některé zvláštnosti. Jejich vliv na výsledky měření je v příspěvku analyzován a jsou posuzovány možnosti provedení experimentu s danou konfigurací měřicího zařízení. V příspěvku je uveden přehled prací provedených v rámci experimentu měření zbytkových napětí v HVOF povlakových vrstvách a některé dosažené výsledky.

Zařízení pro měření zbytkových napětí

Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí je založena na odvrtání otvoru do povrchu materiálu, který způsobí uvolnění existujících zbytkových napětí. Tato relaxace je provázána deformacemi v okolí otvoru, které jsou měřeny, a z nich je vyhodnocováno původní zbytkové napětí. Odvrtávání je prováděno ve více krocích a uvolněná deformace se měří po každém kroku (incremental hole drilling). To umožňuje vyhodnotit hloubkový profil zbytkového napětí [3,4].

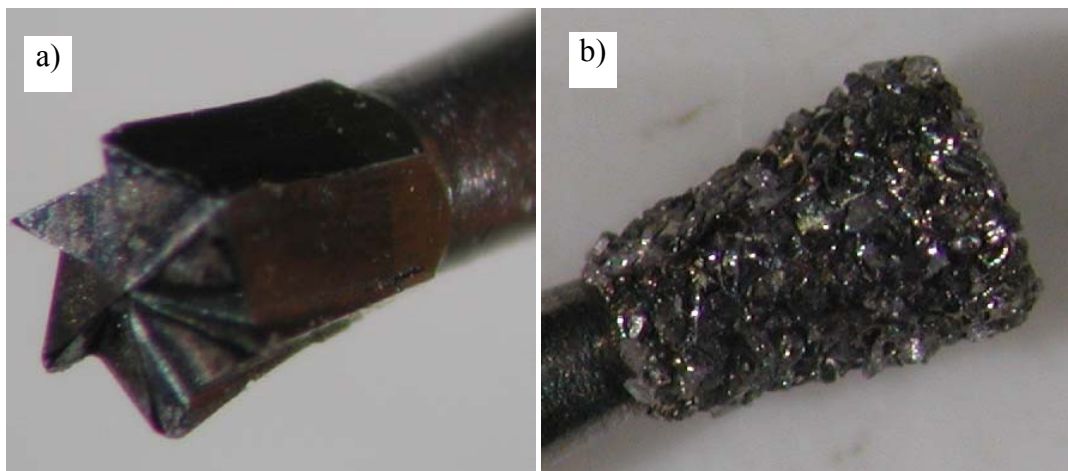


Obr.1: Zařízení pro měření zbytkových napětí SINT MTS3000.

Ke zjišťování zbytkových napětí se používá zařízení SINT MTS3000, ukázaném na obr.1. Uvolněná deformace se měří tenzometry (ružice pro měření zbytkových napětí HBM 1,5/120RY61S). Odvrtávacím nástrojem jsou wolfram-karbidové (obr.2a) příp. diamantové čelní válcové frézy (obr.2b) o poloměru cca 0,8 mm poháněné vzduchovou turbínkou. Toto uspořádání umožňuje dosáhnout velmi vysokých otáček (až 300 000 ot./min) a tedy minimalizuje vznik dalších zbytkových napětí při procesu odvrtávání [3]. Omezení představují problémy použití při velkých rezných odporech.

Výběr frézy a parametrů odvrtávání musí odpovídat materiálu vzorku a způsobu měření. Pro standardní materiály je vhodné použít wolfram-karbidový (SK) nástroj, pro velmi tvrdé materiály je možné použít

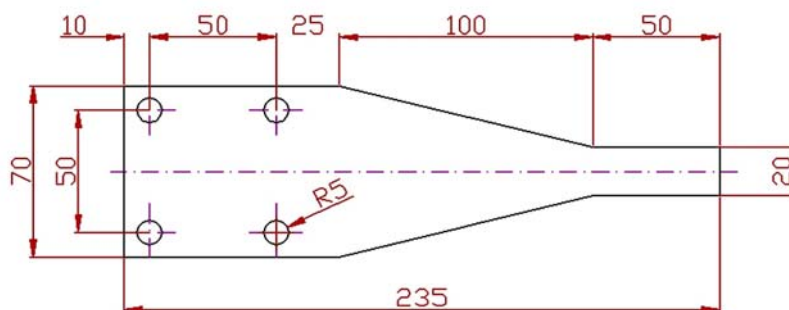
nástroj s diamantovým ostřím. Diamantový nástroj však z technologického hlediska není možné použít pro ocel. V obou případech je podle materiálu vzorku nutné vhodně volit parametry odvrtávání, především axiální posuv nástroje, velikost odvrtávaného úseku v jednom kroku a dobu prodlevy mezi dvěma kroky tak, aby odvrtání bylo proveditelné a aby se minimalizovaly chyby způsobené ohřevem vzorku při odvrtávání [5,6].



Obr.2: Odvrtávací fréza pro měření zbytkových napětí systémem SINT MTS3000; a) wolfram-karbidová fréza, b) s diamantovým ostřím.

Experiment

Vrstvy oceli 316L, NiCrBSi, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ o tloušťkách přibližně $300\ \mu\text{m}$ jsou vytvořeny na HP/HVOF (high pressure/high velocity oxygen fuel) zařízení Tafa JP5000 na pracovišti Škoda Výzkum s.r.o.[1]. Jako substrát jsou použity ocelové pláty (ČSN 11418) ve tvaru nosníku konstantní pevnosti podle obr.3 o tloušťce $3\ \text{mm}$. Substráty jsou před nástřikem žhánuty na 600°C v argonové atmosféře, zbytky okují jsou odstraněny mechanicky. Nástřik vrstev včetně otrýskání korundovou směsí před nástřikem je proveden standardním způsobem podle technologického postupu používaného v Škoda Výzkum.



Obr.3: Schéma zkušební nosníku - plech tloušťky $3\ \text{mm}$.

V průběhu nástřiku jsou měřeny teploty povrchu vzorku termočlánky a termovizí. Mechanické vlastnosti (modul pružnosti, Poissonovo číslo) substrátu i nanesených vrstev jsou následně měřeny ohybovou metodou [7], je provedeno měření průhybu vzorků a zjištěna drsnost vzorků (po úpravě před nalepením tenzometrické růžice).

Zbytková napětí jsou měřena v povlacích, v substrátu před otrýskáním a po otrýskání. Pro substrát a povlak oceli 316L je použita SK fréza, pro tvrdé cermetové vzorky (NiCrBSi, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) nástroj s diamantovým ostřím. Zbytková napětí jsou vyhodnocena programem RESTAN, který je součástí zařízení SINT MTS3000. Vliv parametrů odvrtávání a vlastností měřeného

materiálu na opotřebení nástroje, tvar a výsledná hloubka otvoru jsou prověřovány mikroskopickou analýzou.

Výsledky a diskuze

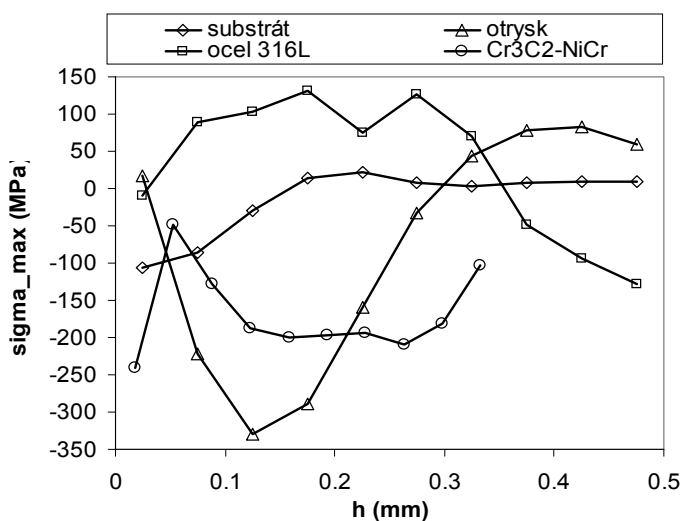
Žihání v argonové atmosféře nezabránilo vniku okují, které vlivem rozdílných termo-mechanických vlastností vzhledem k oceli [8] způsobují vznik napětí ve vzorku. Další napětí vznikají při jejich mechanickém odstranění. Pro minimalizaci vlivu tohoto napětí je vhodnější chemické odstranění okují příp. použití speciálních krycích past, které by oxidaci při žihání zabránily.

Napětí v povlakové vrstvě způsobilo průhyb vzorku a tím jeho částečnou relaxaci, která by se v případě masivnějších vzorků nevyskytovala. Malá tloušťka vzorků rovněž způsobuje jejich větší prohnutí. Jak ukázalo měření při nástřiku, teplota vzorku stoupne v době přejezdu hořáku až na cca. 200°C. V případě masivnějších substrátů takový nárůst není pozorován a teplota nepřesahuje 100°C [1]. Obě tyto skutečnosti mají vliv na zkreslení výsledků vzhledem ke standardně prováděným nástřikům.

Tab.1: Materiálové vlastnosti substrátu a povlaků změřené průhybovou metodou.

Popis	Povlak (μm)	ν (-)	E (MPa)
substrát	-	0.27	205.17
substrát-otrysk	-	0.27	205.40
povlak ocel 316L	400	0.27	115.30
povlak NiCrBSi	320	0.28	134.38
povlak Cr ₃ C ₂ NiCr	290	0.23	181.60

Pro vyhodnocení zbytkových napětí jsou použity hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla zjištěná průhybovým experimentem, uvedené v tab.1. Hodnoty materiálových vlastností odpovídají rozsahu hodnot měřených indentačními technikami uváděných v literatuře [2].

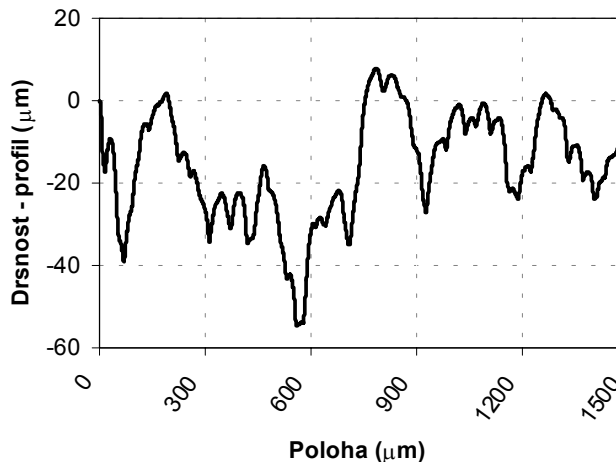


Obr.4: Zbytkové napětí σ_{max} v měřených vzorcích, vyhodnocení integrální metodou.

Na obr.4 jsou průběhy vyhodnocených zbytkových napětí pro substrát, substrát po otryskání a povlaky oceli 316L a cermetu Cr₃C₂-NiCr, v závislosti na hloubce h . Pro vyhodnocení je použita integrální metoda s koeficienty definovanými pro objemový materiál v programu RESTAN. Je vidět slabé tlakové povrchové napětí 50-100 MPa u substrátu, které vzniklo pravděpodobně v důsledku výskytu okují a jejich odstranění a tlakové napětí až 300 MPa u vzorku po otryskání. Cermetový povlak je v tlakovém napětí cca 200 MPa, povlak oceli 316L vykazuje tahové napětí cca 100 MPa, které přibližně na úrovni

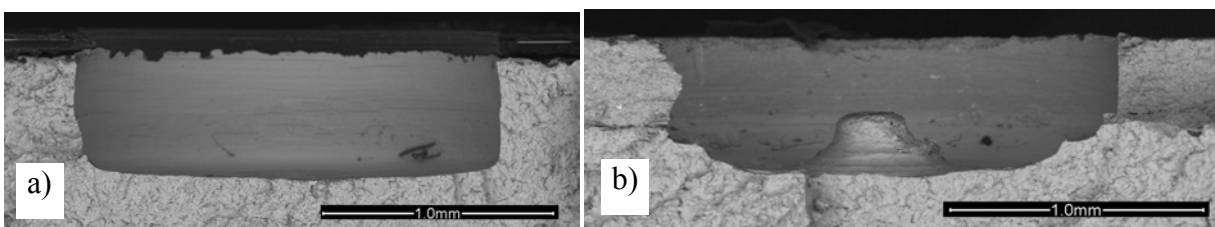
rozhraní vrstvy a substrátu postupně klesá až do tlakového napětí.

Výsledky kvalitativně odpovídají předpokladům. Vyhodnocení dat je však ovlivněno chybným nastavením nulové hloubky, tj. povrchu materiálu při odvrtávání. Při použití SK frézy je možné nulovou hloubku stanovit na základě elektrického kontaktu, pro diamantový nástroj je nulová hloubka stanovena opticky. V obou případech jsou měřená data ovlivněna vlastnostmi povrchu, především drsností, která může u otryskaného vzorku a povlaků dosáhnout až několik desítek μm (R_z), jak ukazuje obr.5. Významná chyba vzniká také použitím standardních kalibračních koeficientů integrální metody, které neodpovídají vícevrstevným povlakovým strukturám.



Obr.5: Profil drsnosti povrchu, povlak oceli 316L.

Experiment prokázal možnost použití wolfram-karbidových fréz pro ocelové vzorky (substrát, nástřík oceli 316L). Výsledky následné mikroskopické analýzy (obr.6a) zároveň prokázaly odpovídající tvar a hloubku otvoru. V případě cermetu $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ byla k odvrtání použita diamantová fréza. Shoda tvaru i hloubky otvoru s teoretickými předpoklady je v tomto případě horší, jak je vidět na obr.6b. Především chybně stanovená hloubka může způsobit zanesení významné chyby při vyhodnocení zbytkových napětí. Při odvrtávání cermetu NiCrBSi nebyla indikována významnější uvolněná deformace. Následná mikroskopická analýza ukázala, že v průběhu experimentu nedocházelo k odvrtávání vzorku, ale k obrušování nástroje. V tomto případě se použití uvedeného zařízení a diamantové frézy nejeví jako vhodné.



Obr.6: Mikroskopický snímek otvoru v lomu po odvrtání; a) substrát z oceli 11418, wolfram-karbidová fréza, b) povlak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, diamantová fréza

Závěr

Výsledky provedených experimentů prokázaly možnosti použití odvrtávací metody a měřicího zařízení pro měření v některých velmi odolných cermetových vrstvách i ocelích. Zároveň se ukázaly některé problémy, které provázejí vlastní měření i vyhodnocení zbytkových napětí v žárově nanášených vrstvách. Jedná se především o stanovení nulové hloubky, vliv tvaru a

velikosti substrátu, přípravu substrátu a vhodnou volbu parametrů odvrtávání. Uvedené skutečnosti, příčiny výskytu a možnosti minimalizace jejich vlivu jsou předmětem dalšího výzkumu a budou uvedeny v připravovaných publikacích.

Poděkování

Tento článek vznikl za finančního příspěví MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084.

Literatura

- [1] Fiala P.: Žárový nástřik povlaků na bázi karbidu chromu, Disertační práce, ZČU, Fakulta strojní, Plzeň, 1999
- [2] Houdková Š.: Hodnocení mechanických vlastností žárových nástřiků, Disertační práce, ZČU, Fakulta Strojní, Plzeň, 2003
- [3] Jian Lu (ed.): *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, Inc., Lilburn
- [4] Grant P.V., Whitehead P.S: *The Measurement of Residual Stress by the Incremental Hole Drilling Technique*, National Physical Laboratory, Teddington, 2002
- [5] Honner M., Litoš P., Švantner M.: Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measurement technics, *Infrared Physics & Technology*, Vol.45, pp.131-142, 2004
- [6] Švantner M., Litoš P., Honner M.: Hole drilling residual stress measurement method-the drilling thermal influence, *Journal of Engineering Materials and Technology* (zasláno)
- [7] Švantner M.: Numerické ověření vztahů pro ohyb nosníků, Sb. 20. uživ. konference Cosmos 2003, Techsoft Engineering s.r.o., Praha, pp.35-48, 2003
- [8] Tošovský J., Pohanka M., Kotrbáček P.: Napjatostní analýza vrstvy okují při procesu odkujení, Sb. 40. Mezinárodní konference Experimentální analýza napětí EAN 2002, ČVUT, Praha, pp.247-252, 2002