

POTENCIÁL APLIKACE TECHNOLOGIE NÁSTŘIKU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

POTENTIAL OF TWIN WIRE ARC SPRAYING TECHNOLOGY FOR APPLICATION IN POWER INDUSTRY

Šárka Houdková, Marek Vostřák, Zdeněk Česánek, Jan Schubert, Sofia Kšiňanová a Jana Nadřová

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň

Abstrakt

Technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem (TWAS – Twin Wire Arc Spray) umožňuje nanášet povlaky o tloušťkách přesahujících 1 mm, z širokého spektra materiálů, s vysokou produktivitou a možností aplikace i mimo specializovaná pracoviště. Tyto výhody, které v některých případech favorizují technologii TWAS oproti sofistikovanějším technologiím nástřiku jsou však vyváženy nižší kvalitou mikrostruktury naneseného povlaku. Analýza možností optimalizace depozičních parametrů nástřiku, kombinovaná s vhodným návrhem materiálu povlaku či více materiálů ve formě multivrstvy však poukazuje na potenciál dosažení funkčních vlastností povlaku naneseného technologií TWAS na dostatečnou úroveň, srovnatelnou s chováním povlaků nanesených konkurenčními technologiemi. Příspěvek představuje vybrané povlaky TWAS určené pro použití při kombinovaném namáhání, jejich základní mikrostrukturní, mechanické a funkční vlastnosti a demonstruje příklady jejich uplatnění v energetickém průmyslu.

Abstract

The Twin Wire Arc Spray (TWAS) technology allows the application of coatings with thicknesses exceeding 1 mm, from a wide range of materials, with high productivity and the possibility of application even outside specialized workplaces. However, these advantages, which, in some cases, favor TWAS technology over more sophisticated spray technologies, are compensated by the lower quality of the microstructure of the TWAS applied coating. However, the analysis of the possibilities of optimizing the deposition parameters, combined with a suitable design of the coating material or more materials in the form of a multilayer points to the potential to achieve the functional properties of the coating applied by TWAS to a sufficient level, comparable to the behavior of coatings applied by competing technologies. The paper presents selected TWAS coatings intended for use in combined stress, their basic microstructural, mechanical and functional properties, and demonstrate their use in power industry.

Úvod

Technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem (TWAS – Twin Wire Arc Spray) představuje v současnosti zavedenou a rozšířenou technologii žárového nástřiku. Její hlavní výhodou jsou nízké provozní náklady a mobilita, umožňující nanášení povlaků přímo na místě aplikace, a to i na velké konstrukce, bez nutnosti jejich demontáže. Vysoká produktivita technologii TWAS favorizuje pro nástřik rozměrných součástí. V energetickém průmyslu existuje řada konstrukcí a komponent, jejichž životnost může být aplikací ochranného povlaku výrazně prodloužena [1-3]. V mnoha případech se jedná o povrchy namáhané kombinovaným zatížením – mechanickým opotřebením v kombinaci s korozivním prostředím a vysokou teplotou. Kromě prvovýroby může být tato technologie použita pro renovaci již opotřebovaných nebo zkorodovaných součástí. Princip technologie TWAS, včetně jejích hlavních výhod je popsán např. v [4]: přídavný materiál ve formě drátu je podáván do nástřikového zařízení, kde je mezi špičkami drátu zapálen elektrický oblouk. Materiál na špičkách drátu je kontinuálně taven a plynem (obvykle tlakovým vzduchem) je unášen a urychlen směrem k povrchu povlakované součásti,

na kterém po dopadu rychle tuhne. Během letu materiálu atmosférou může docházet k oxidaci povrchu roztavených kapek kovu. Po dopadu na substrát se vzniklé oxidické obálky stávají součástí mikrostruktury povlaku. Přítomnost těchto oxidických částic, stejně jako určitá míra pórovitosti a celkově nižší kohezní pevnost je pro povlaky tvořené technologií TWAS typická. Při vhodné volbě parametrů a materiálu povlaku umožňuje tato technologie vytvářet povlaky o tloušťce až několik nižších jednotek milimetrů.

Ačkoli mikrostruktura TWAS nástřiků nedosahuje kvalit nástřiků nanášených sofistikovanějšími technologiemi, jako jsou vysokorychlostní nebo kinetické technologie HVOF, HVAF či CS, ekonomické důvody v mnoha případech upřednostňují právě technologii TWAS. Kvalitu mikrostruktury, a s ní související vlastnosti, lze navíc významně ovlivnit správou volbou depozičních parametrů [5]. V současné době je navíc k dispozici velká škála materiálů ve formě drátů vhodných k aplikaci žárovým nástřikem, včetně vysoce pevných vysoce legovaných slitin na bázi Ni [2, 6, 7] nebo materiálů obsahujících tvrdé částice ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, jejichž ochranné schopnosti se blíží chování povlaků nanesených jinými technologiemi nástřiku [1, 3].

Nicméně, přes nepopíratelné výhody a široké uplatnění v praxi je v odborné literatuře věnována povlakům nanášeným technologií TWAS pouze malá pozornost. Cílem příspěvku je demonstrovat pozitivní vliv optimalizace nástřikových parametrů technologie TWAS a návrh kombinace materiálů povlaku vhodného jako ochrana proti korozi v prostředí vodních elektráren. Prezentované výsledky jsou součástí řešení projektu Národní centrum pro energetiku č. TN01000007.

Optimalizace depozičních parametrů nástřiku TWAS

Výsledky procesu optimalizace depozičních parametrů při nástřiku technologií TWAS jsou demonstrovány na příkladu materiálu povlaku s označením 85T od firmy Praxair Surface Technologies. Chemické složení tohoto materiálu (17,5% Cr, 12% Ni, 2,2% Mo, <0,08% C, Fe-zbytek) odpovídá nerezové oceli, kde nižší obsah uhlíku minimalizuje potenciální precipitaci karbidů v průběhu nástřiku, čímž se zvyšuje odolnost proti mezikrystalické korozi. Materiál povlaku nachází uplatnění v celé řadě aplikací v mnoha oblastech průmyslu.

Tab. 1: Parametry TWAS nástřiku materiálu 85T

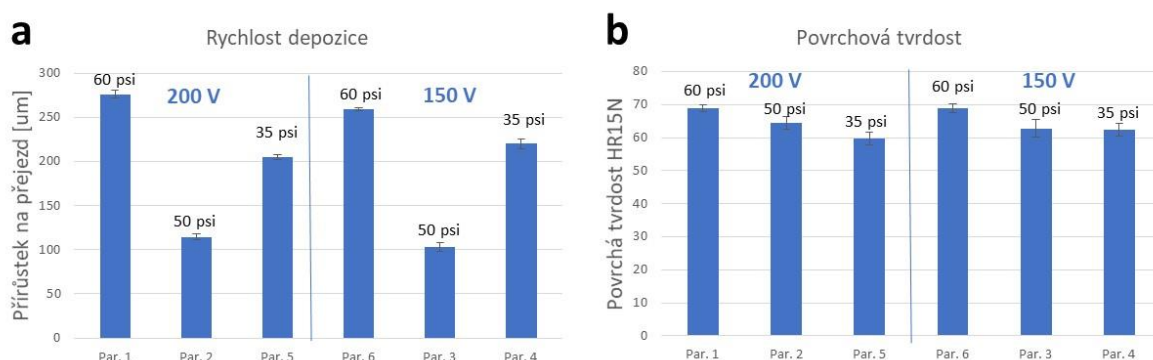
Nástřikové parametry pro materiál 85T							
		Par. 1	Par. 2	Par. 5	Par. 6	Par. 3	Par. 4
Napětí [V]		30	30	30	30	30	30
Proud [A]		200	200	200	150	150	150
Tlak vzduchu [psi]	60	50	35	60	50	35	60
	28	28	28	28	28	28	28
Depoziční vzdálenost [mm]		125	125	125	125	125	125

Nástřik byl realizován pomocí zařízení SmartArc od firmy Oerlikon Metco. Pro účely optimalizace bylo nanášeno 6 povlaků. Při nástřiku byla dodržena konstantní depoziční vzdálenost, variovány byly velikosti proudu (150 A a 200 A) a tlaku stlačeného vzduchu (rozmezí 35 psi až 60 psi). Příprava vzorků pro nástřik proběhla v souladu se standardní procedurou používanou ve společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. – vzorky byly předem tryskány Al₂O₃ se zrnitostí F22 pro dosažení požadované drsnosti povrchu a zajištění dostatečné přilnavosti k základnímu materiálu.

Vzorky byly hodnoceny z hlediska rychlosti depozice, mikrostruktury a povrchové tvrdosti HR15N.

Rychlost depozice: Vzorky byly nastříkány s různým počtem přejezdů pro dosažení dostatečné tloušťky povlaku pro účely dalšího hodnocení. Rychlost depozice je stanovena přírůstkem povlaku na jeden přejezd. Zatímco povlak nanášený pomocí Parametrů 1 (21-080-1) vykazoval přírůstek 276 $\mu\text{m}/\text{přejezd}$, povlak nanášený pomocí Parametrů 3 (21-082-1) pouze 103 $\mu\text{m}/\text{přejezd}$. Očekávaný vyšší vliv velikosti proudu na rychlost depozice nebyl zcela potvrzen (obr. 1a). Naopak, by prokázán vyšší vliv velikosti tlaku primárního vzduchu.

Povrchová tvrdost: Měření povrchové tvrdosti bylo realizováno na zařízení Rockwell HT 8003 podle normy ČSN EN ISO 6508-1. Každá hodnota je průměrem z 8 měření. Na výsledcích měření je pozorován vliv tlaku primárního vzduchu, který je zodpovědný za vyšší rychlost dopadu částic. Vyšší kinetická energie při dopadu může mít vliv na vyšší tvrdost výsledného povlaku.

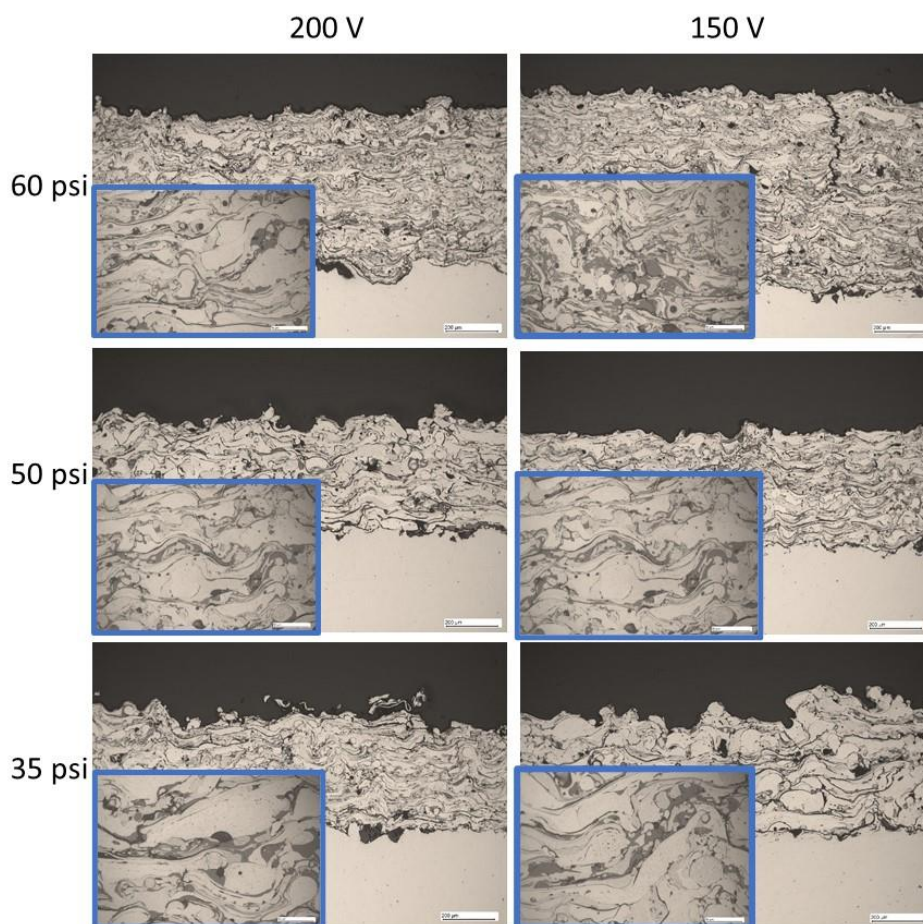


Obr. 1: Vliv depozičních parametrů TWAS nástřiku materiálu 85T na sledované charakteristiky

Vliv variace depozičních parametrů na mikrostrukturu povlaků je zdokumentován na příčných výbrusech povlaky na obr. 2. Na snímcích lze pozorovat vliv tlaku primárního vzduchu na zmenšení jednotlivých částic. Menší částice jsou zodpovědné za menší póry a celkově nižší pórovitost. To může mít pozitivní vliv na schopnost povlaku chránit podkladový materiál před působením okolního prostředí. U povlaku naneseného pomocí Parametrů 6 je patrná vertikální trhlinka, procházející, vycházející z povrchu, dosahující zhruba poloviny tloušťky povlaku. U povlaků nanesených jinými parametry nebyl výskyt trhlín zachycen.

Na základě zhodnocení mikrostruktury a rychlosti depozice byly pro další nástřik zvoleny Parametry 1.

Podobným způsobem, na základě zhodnocení povlaků nanesených z jednoho materiálu různými parametry, byly zvoleny nejvhodnější parametry pro nástřik každého materiálu povlaku. Při volbě parametrů se vycházelo z doporučení výrobce konkrétního drátu, které byly optimalizačním procesem upraveny pro potřeby konkrétního depozičního zařízení.

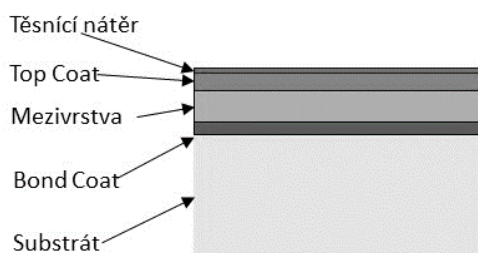


Obr. 2: Vliv depozičních parametrů TWAS nástřiku materiálu 85T na mikrostrukturu povlaku

Multivrstvé povlaky nanášené technologií TWAS

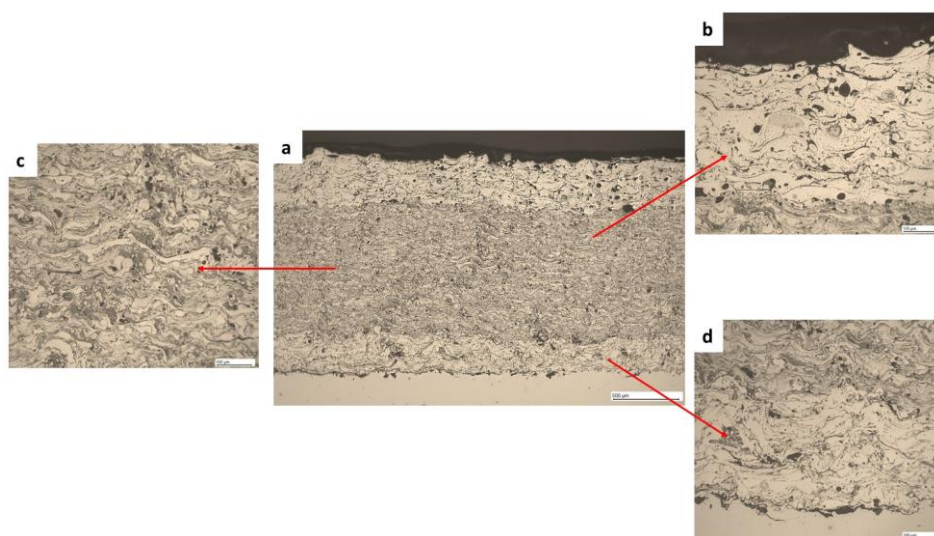
Vlastnosti povlaků nanášených z různých materiálů se navzájem liší. Tvrdé povlaky s vysokou odolností proti opotřebení nemusí být nejvhodnějším řešením pro korozně namáhaná prostředí. V případě kombinovaného namáhání, které je pro součásti pracující v náročném prostředí typické (např. kombinace korozně agresivního prostředí – eroze – vysoká teplota) je často nemožné najít materiál, který by vyhovoval všem požadavkům. V těchto případech lze zvolit řešení, sestávající se z kombinace několika vrstev s různým složením – tzv. multivrstva. Schematicky je návrh multivrstvy znázorněn na obr. 3. Na očištěný a tryskáním připravený povrch materiálu je nanášena vazná vrstva, tzv. „Bond coat“. Účelem vrstvy je zajistit dobrou přilnavost navazujících vrstev k podkladovému materiálu. Sekundární funkcí vazného povlaku je vytvořit bariéru proti průniku korozně agresivního prostředí z okolí k povrchu podkladového materiálu a zajistit ochranu proti oxidaci při vyšších pracovních teplotách. Této funkce je využíváno např. v systémech TBC (Thermal Barrier Coatings), aplikovaných na komponenty spalovacích turbín. Nejčastěji využívanými materiály pro nástřik vazebných povlaků jsou slitiny na bázi Ni (NiCr, NiAl, NiCrAlY či CoNiAlY) [4]. Úkolem navazující mezivrstvy je umožnit dosažení požadované tloušťky povlaku a zároveň přispět ke zvýšení ochranné funkce povlaku proti průniku korozního média. Pro tuto mezivrstvu byl zvolen materiál na bázi nerezové oceli. Ve srovnání s tvrdšími materiály umožňuje nástřik ve větších tloušťkách, aniž by došlo ke vzniku trhlin či delaminací. Horní vrstva multivrstvy (tzv. Top Coat) je tvořena materiálem s vysokou odolností proti opotřebení, nejčastěji s obsahem tvrdých částic. Tato funkční vrstva má za úkol zajistit prodloužení životnosti povlakované součásti, namáhané např. erozí pevnými částicemi. Pro zvýšení odolnosti systému proti průniku korozního média (např. vody

u komponent vodních elektráren) může být povrch systému zatěsněn nátěrem na bázi epoxidu, který utěsní otevřenou pórovitost povlaku v blízkosti povrchu.



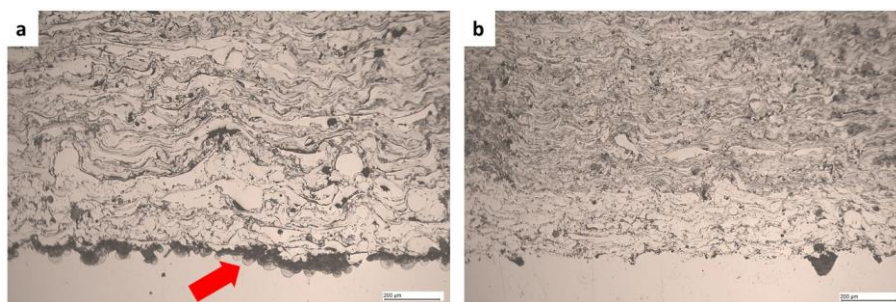
Obr. 3: Schéma multivrstvého žárově stříkaného povlaku

Příklad multivrstvého systému je uveden na obr. 4. V tomto případě byl Bond Coat tvořen materiálem Ni20%Cr, mezivrstva nerezovou ocelí s vyšším obsahem Cr a Top Coat slitinou železa s 13% Cr a 4,5% Ni, s obsahem 26% WC a 6% TiC.



Obr. 4: Multivrstvý povlak: a) řez povlakem; b) detail mikrostruktury Top Coatu, c) detail mikrostruktury mezivrstvy, d) detail mikrostruktury Bond Coatu

Multivrstvé povlaky s různým složením vazného Bond Coatu a protierozního Top Coatu byly porovnány pomocí laboratorních testů erozní odolnosti pevnými částicemi, abrazivní odolnosti pomocí Dry Sand/Rubber Wheel testu dle ASTM G-65 a korozní odolnosti v solné mlze.

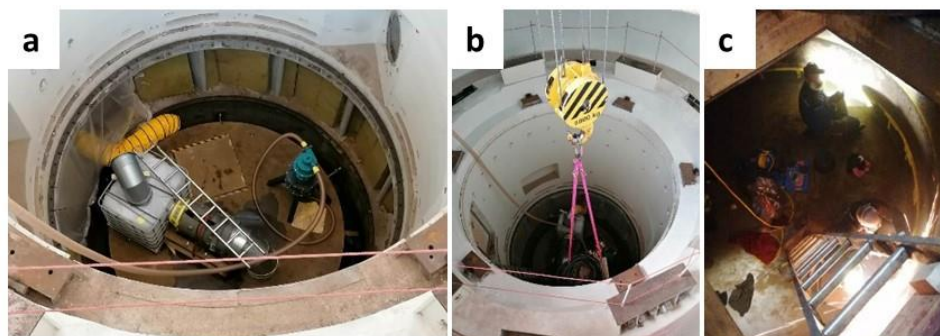


Obr. 5: Detail rozhraní mezi podkladovým materiálem a multivrstvým povlakem po korozním testu v solné mlze: a) napadení podkladového materiálu korozí; b) bez známek koroze

Závěr

Vhodným návrhem materiálu a tlouštěk jednotlivých vrstev lze přizpůsobit funkci povlaku konkrétnímu prostředí. Pro účely aplikace na komponenty vodních elektráren bylo navrženo a laboratorně testováno 6 variant multivrstvého povlaku. Jedna z kombinací byla použita pro

aplikaci na vnitřního povrch horního dílu savky TG2 na vodní elektrárně Kamýk. Multivrstvý povlak s jiným složením byl aplikován na membránové stěny výparníku v oblasti spalovací komory kotle s výrazně redukční atmosférou. Toto řešení bylo v praxi ověřeno nástřikem referenčních ploch kotle K21 ETU II. Aplikace žárových nástřiků mimo specializovaná pracoviště má však svá specifika a představuje výzvu nejen z pohledu vhodné volby technologie a kombinací materiálu, ale také z hlediska zajištění samotné realizace a udržení konstantní kvality nástřiku (obr. 6).



Obr. 6: Nástřik na vodní elektrárně Kamýk: a) utěsnění, b) závoz materiálu, c) krytování

Prezentované výsledky byly získány v průběhu řešení projektu TAČR Národní Centrum pro energetiku č. TN01000007.

Literatura

- [1] Pokhmurskii, V., Student, M., Gvozdeckii, V. et al. (2013): *Arc-Sprayed Iron-Based Coatings for Erosion-Corrosion Protection of Boiler Tubes at Elevated Temperatures*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 22, pp. 808-819. ISSN 1059-9630
- [2] Fantozzi, D., Matikainen, V., Uusitalo, M., Koivuluoto, H., Vuoristo, P. (2017): *Chlorine-induced high temperature corrosion of Inconel 625 sprayed coatings deposited with different thermal spray techniques*. Surface and Coatings Technology, Vol. 318, pp. 233-243.
- [3] Liu, C., Lu, H., Qin, E. et al. (2021): *The FeCr-Based Coating by On-Site Twin-Wire Arc Spraying for Proactive Maintenance of Power Plant Components*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 30, pp. 959-967. ISSN 1059-9630
- [4] Pawlowski, L. (2008): *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. John Wiley & Sons, Ltd., second edition, ISBN 9780471490494
- [5] Fitriyana, D.F. et al. (2020): *The Effect of Compressed Air Pressure and Stand-off Distance on the Twin Wire Arc Spray (TWAS) Coating for Pump Impeller from AISI 304 Stainless Steel*. Springer Proceedings in Physics, Vol. 242. Springer, Singapore.
- [6] Brizuela-Colmenares, N., Muñoz-Saldaña, J. (2021): *Ni-5wt% Al coatings deposited by twin wire arc spraying for molten aluminum attack protection*. *Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference*, May 24–28, 2021, p0700, 2021 ASM International.
- [7] Wang, J.-X., Liu, J.-S., Zhang, L.-Y., Sun, J.-F., Wang, Z.-P. (2014): *Microstructure and mechanical properties of twin-wire arc sprayed Ni-Al composite coatings on 6061-T6 aluminum alloy sheet*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 21, pp. 469-478. ISSN 1674-4799