

APLIKACE NÁVARU NÁBĚŽNÝCH HRAN OBĚŽNÝCH LOPATEK KONCOVÝCH STUPŇŮ PARNÍ TURBÍNY

APPLICATION OF SURFACING ON LEADING EDGES OF ROTOR BLADES OF STEAM TURBINE OUTPUT CASCADES

Tomáš Glusa

Doosan Škoda Power s.r.o.

Abstrakt

Hlavní cílem projektu je úspěšné vyhotovení návaru kobaltové slitiny na náběžné hraně oběžných lopatek. Tato ochranná vrstva má vynikající účinnost proti působení vodních kapek a jejich degradačnímu mechanismu, eroze vodními kapkami. Příspěvek poukazuje na zvládnutí úlohy navaření dílů v Doosan Škoda Power a poukazuje na jejich testování a aplikaci.

Abstract

The main objective of the project is successful copy surfacing cobalt alloy on the leading edge of rotor blades. This protective layer has excellent effectiveness against the action of water droplets and their degradation mechanism, erosion by water droplets. The article shows the mastery of the task of welding parts in the Doosan Škoda Power and points out their testing and application.

Úvod

Již po velmi dlouhou dobu jsou známy vynikající vlastnosti kobaltových slitin v aplikaci pro energetický průmysl. Zde se využívá jejich výborná odolnost proti působení tepla, prostředí a času. Využívají se jako ochrana proti zadření, bariera proti působení prostředí páry. Jejich předností je i dobrá aplikovatelnost na stávající feritické a martenzitické oceli [1].

Těchto předností kobaltových slitin se již s mnoha historickými i nedávnými pokusy snaží využít zde prezentovaný způsob ochrany náběžné hrany oběžných lopatek.

Laserové navařování náběžné hrany lopatek

Při vývoji oběžné lopatky parních turbín se musí vyřešit mnohé technické úlohy. Tento díl musí v sobě spojit svět výpočtů proudových, napěťových, životnosti a poskytnout provozovateli parní turbíny ve výsledku stroj, jenž oproti historickým pravidlům se nyní ve světě obnovitelných zdrojů, musí vypořádat se stále zvyšujícími nároky na jejich provoz. Časté provozování v okrajových režimech s nízkým výkonem turbíny ve spojení s nízkými protitlakami na koncových stupních dává velmi výhodné podmínky pro vznik nepříznivé eroze náběžné hrany. Efekt eroze vodních kapek, při těchto režimech provozu, je schopný již během krátké doby nechráněný povrch lopatky poškodit úběrem materiálu a tím oslabit konstrukci lopatky. Na základě těchto zkušeností a progresivního vývoje v oblasti laserového navařování byla vyvinuta a zavedena i metoda laserového navařování náběžné hrany kobaltovou slitinou pomocí laseru.

V posledních letech se těmito negativním projevům společnost Doosan Škoda Power (DSPW) významně věnuje a toto úsilí dalo vzniknout novým typům aktivní ochrany pomocí hydrofobních povlaků tak i pasivních ochran typu laserové kalení [2], aplikace nových PVD tenkých vrstev. Na základě těchto zkušeností a progresivního vývoje v oblasti laserového navařování byla vyvinuta a zavedena i metoda laserového navařování náběžné hrany kobaltovou slitinou pomocí laseru.

Oběžná lopatka parní turbíny je velmi komplexní výrobek, zahrnuje v sobě jednak vynikající materiálové vlastnosti, konstrukční návrh, životnost, tak musí být tento díl co nejvíce produktivní. Z důvodu výrobních postupů DSPW a nároků na co nejefektivnější implementaci do stávajících procesů bylo nutné spolu s vývojem vlastní optiky laseru vyvinut i systém aktivního

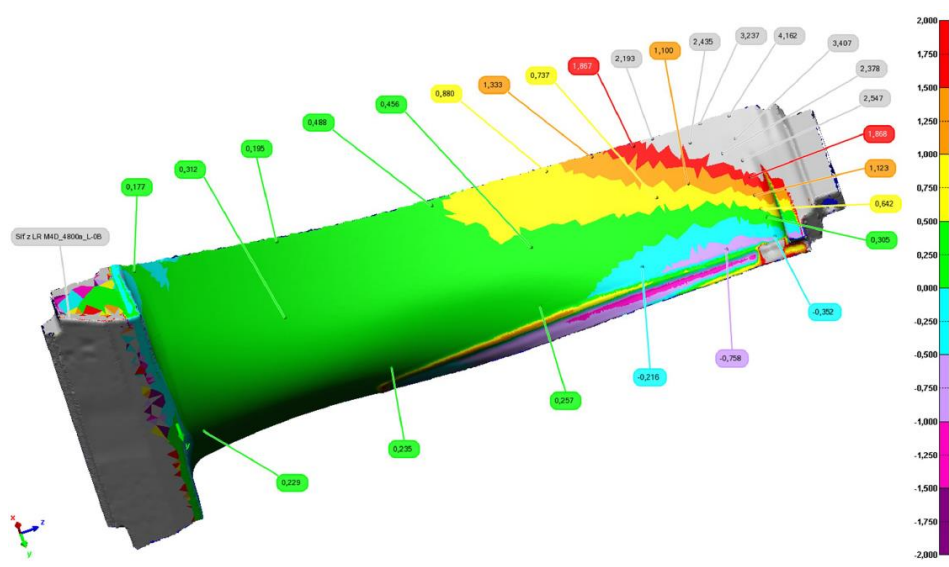
navádění laserového paprsku v závislosti na unikátní výsledné geometrii každé lopatky. Tento nový nástroj pro navařování zaručuje vynikající opakovatelnost procesu navařování a zaručuje vysokou kvalitu návaru.



Obr. 1: Ustavení pracoviště, příklad z průběhu ladění housenek návaru

Díky součinnosti navařování a výroby a vhodných nástrojů je proces navařování velice přesný a jsou splněny podmínky deformací listu po navařování do 1 mm. Proces nevyžaduje aplikaci dodatečného vyrovnání dílu.

Touto metodou je DSPW schopná navařit jak lopatky s volným konce, tak i lopatky s bandáží včetně lopatek s výčnělkovou tlumící vazbou (tie-boss) a je tímto pokryto portfolio společnosti DSPW.



Obr. 2: Příklad měření deformací lopatky po navaření pomocí laseru

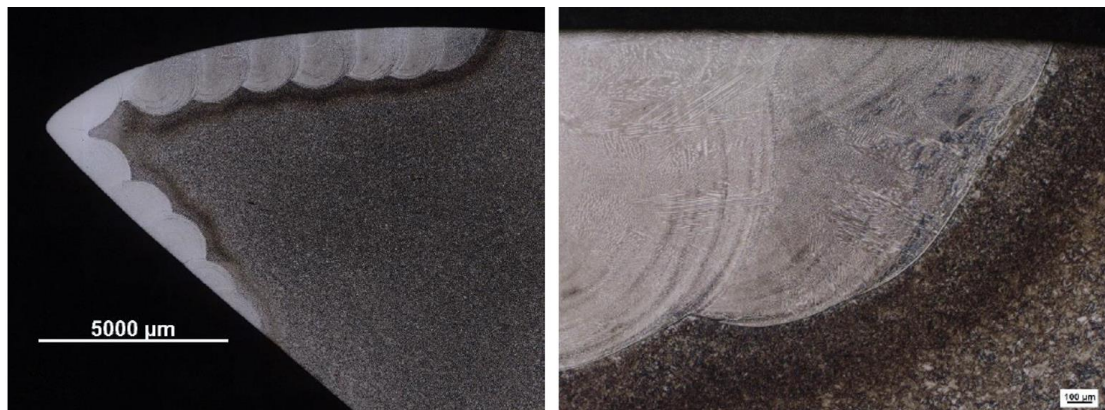
Z nabízených variant kobaltových slitin pro přídavný materiál byly vybrány čtyři jejich varianty a ty podrobeny specifickým režimům tepelného zpracování. V rámci výběru vhodného přídavného materiálu byl každý navařený vzorek podroben testům na erozní odolnost. Na základě výsledků odolnosti proti působení vodních kapek byl vybrán jeden nejlepší zástupce pří-

datného materiálu a jeho režim navařování. Dále se pracovalo na jeho technologickém vylepšení, které spočívá ve správných podprogramech zakončení navařování, parametrech a geometrii.

Vlastní konstrukce návaru je prováděna s ohledem na požadavek co nejméně měnit stávající postup opracování, minimalizovat potřebu přípravků a nástrojů. Řešení konstrukce navařování je optimalizováno pro zamezení vzniku studených spojů a neprůvarů. Jelikož je nutné aplikace s co nejmenšími přídávky pro opracování je potřeba dodržet maximální možné deformace listu. Toho je dosaženo a lopatky se pohybují ve stávajících přídávkách pro opracování. Příklad měření je uveden na obr. 2.

Se zaváděním postupu navařování vzniknul výpočetní model, jenž dovoluje predikovat chování návaru, jeho vlastnosti a jeho největší předností je predikce deformací listu. Díky tomu se podstatně zrychlilo odladění technologie návaru.

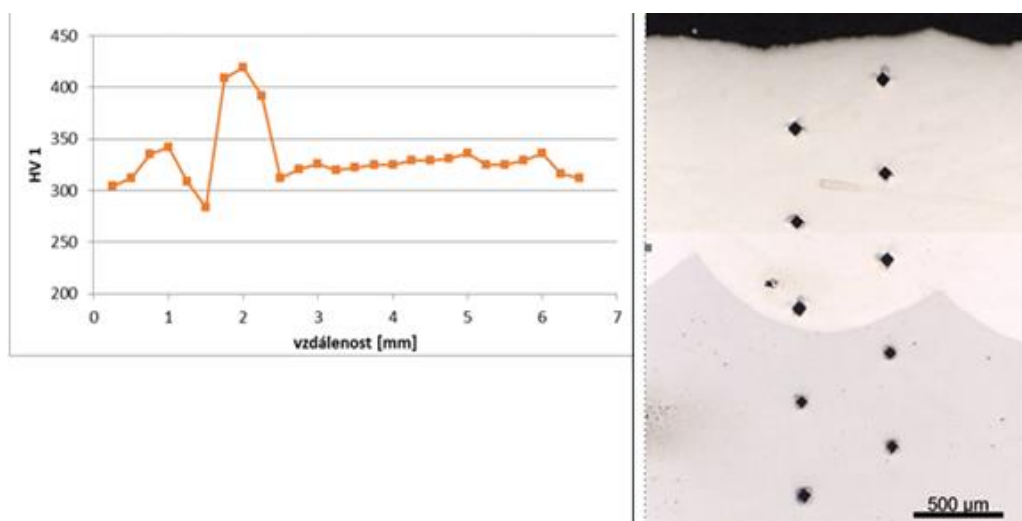
Prototypy lopatek jsou podrobovány zkouškám pomocí soustav řezů. Pozorování má za cíl ověřit jak vnitřní jakost návaru pomocí makroskopických pozorování, tak i jeho vliv na základní materiál pomocí podrobného studia pomocí mikroskopu.



Obr. 3: Makrostruktura a mikrostruktura návaru náběžné hrany

Mezi zavedenými typy základních materiálů patří martenzitické oceli s 12 % chromu, typu T552, tak i precipitačně vytvrditelné oceli martenzitické oceli s velmi jemnými precipitáty, typu T671, zaručující vysokou mez pevnosti slitiny.

Při pozorování jakosti návaru na obr. 3 je struktura bez výskytu neprůvarů a trhlin. Návar má nízké ovlivnění základního materiálu a nezpůsobuje vysoce tvrdou martenzitickou strukturu v oblastech s velmi tenkým listem.



Obr. 4: Řez návarem a průběh tvrdosti napříč návarem

Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti je bez výskytu nevyhovujících hrubých fází a částic. Průběh mikrotvrdosti na obr. 4 potvrzuje pozorování a vylučuje vznik výrazně křehkých pásem návaru. Tepelně ovlivněná oblast plně odpovídá podmínkám pro lokální tepelné zpracování oběžných lopatek. [2]

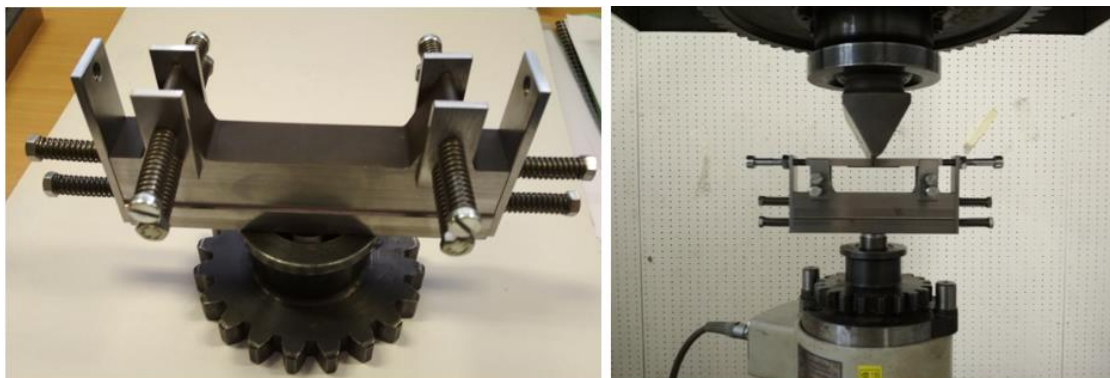
Obsahuje tvrdší martenzitickou strukturu, než je základní materiál, která podporuje efekt bariery proti působení eroze a dodatečně přináší benefit navaření.

Mezi úkoly pozorování mikrostruktury patří i potřeba porovnání výsledků z vlastních lopatek se vzorky pro měření vysokocyklové únavy. Jen tak lze zaručit objektivitu měření vlastností návaru.

Vysokocyklová únava

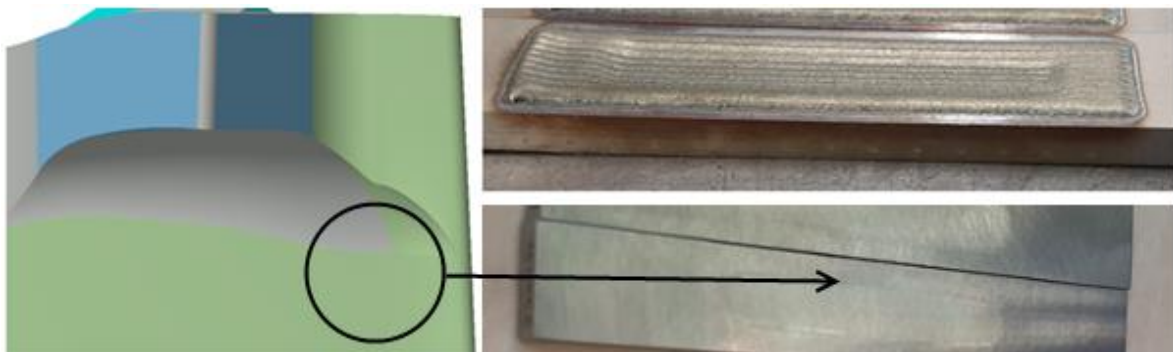
Spolu s procesy optimalizace navařování a opracování je přikročeno ke komplexnímu testování, a to vysokocyklové únavě. Vysokocyklová únava v sobě spojuje ovlivnění základního materiálu, vlivu tepelně ovlivněné zóny a charakteru vlastního návaru. Jelikož neexistuje jednotný postup, jak takový návar na náběžnou hranu v podmínkách vysokocyklové únavy otestovat, muselo se přikročit k úpravě předchozích modelů. Nelze totiž plně využít klasické vzorky z důvodu okrajových podmínek na lopatce, stejně tak nebyl vhodný model trámek s návarem.

Nově vzniklý postup zkoušky dovoluje měřit dvě kritická místa konstrukce lopatky a pochopit vliv návaru na provozuschopnost oběžné lopatky. Využívají se konstrukční podmínky stejné jako na vlastní lopatce, kapsy pro návar mají stejné partie výběhu i vlastní tvar. Ustavení zkoušky a přípravek je na obr. 5.



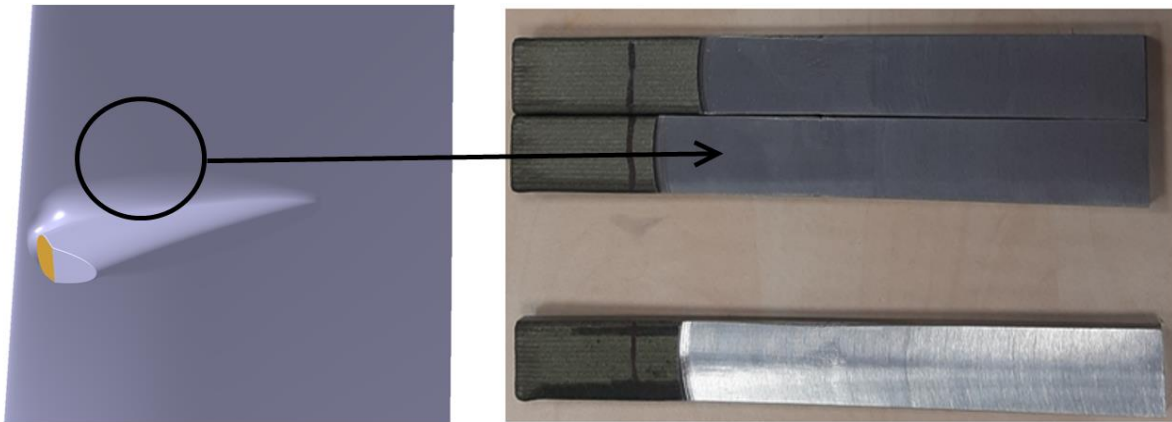
Obr. 5: Přípravek pro měření HCF a ustavení zkoušky

Z postupných rozborů výsledků v průběhu vývoje se dospělo k finálním tvarům a provedením navařovaných vzorků. Při rozměrech 120 mm délky a tloušťky po opracování vzorku 6 mm se tvar a provedení vzorku ustálilo na dvou variantách.



Obr. 6: Příklad listu lopatky v místě bandáže a vzorky před opracováním připravené pro testování, místo „A“

Varianta „A“ na obr. 6, má za cíl stanovit hodnotu vysokocyklové únavy v oblastech bandáže. Vzorek dovoluje studovat chování vysokocyklové únavy napříč jednotlivých vrstev návaru. Vzorky jsou po navaření na model kapsy návaru opracovány do finálního provedení pro zkoušku HCF.



Obr. 7: Přříklad listu lopatky v místě tie-bossu a připravený opracovaný vzorek pro testování, místo „C“

Na obr. 7 je předvedena varianta vzorku „C“. Ta sleduje chování návaru v místě ukončení navaření a je určena pro stanovení meze únavy návaru v partiích tie-bossu.

Cesta k odladění vzorků nebyla snadná a zahrnovala testování desítek zkušebních vzorků. I přes svojí vysokou časovou a finanční náročnost dovolují vyvinuté varianty „A“ a „C“ nejlépe popsat provedení navařování ve vztahu k finálnímu provedení oběžné lopatky.

Testy dovolují stanovení meze únavy 10^6 cyklů při působení konstantního předpětí vzorku a míjivému zatěžování. Výsledné hodnoty meze únavy obou vzorků, „A“ a „C“ jsou plně použitelné pro správný konstrukční návrh lopatky a jejího provozování.



Obr. 8: Polotovary z výroby s finálním broušeným návarem, projektová fotografie

Závěr

Vznikl soubor znalostí o chování návaru z pohledu technologického, opracování, mikrostruktury i vysokocyklové únavy. Byly vytvořeny potřebné etalony a technologické postupy výroby.

Zkoušky erozní odolnosti potvrdili vysokou odolnost homogenní navařené vrstvy spolu s tepelně ovlivněnou zónou základního materiálu proti působení vodních kapek v nestandardních provozech parní turbíny.

Výběr přídavného materiálu, technologický postup navařování, matematický model, aktivní navádění umožnily významně snížit deformace listu po navaření. Díky tomu je výroba efektivní a není zasáhnuто významně do stávajícího technologického postupu výroby oběžných lopatek.

Technologie navařování se ustálila do jednoho konkrétního řešení a umožnila aplikaci laserového návaru náběžné hrany oběžných lopatek parní turbíny v aplikacích, jako jsou spalovny odpadu, biomasy a provozy, které jsou náročné z pohledu erozního působení vodních kapek. Stále zvyšující se nároky na provoz parních turbín je možné s novými pohledy na ochranu proti erozi splnit.

Literatura

- [1] Glusa, T. (2019): *Interní předpis pro navařování dílů parní turbíny pomocí laseru*. Předpis, Tp0029P, Doosan Škoda Power s.r.o., Plzeň.
- [2] Glusa, T. (2017): *Interní předpis pro kalení lopatek parní turbíny pomocí laseru*. Předpis, Tp0030P, Doosan Škoda Power s.r.o., Plzeň.
- [3] Vlasák, J. (2020): Zvyšování životnosti nízkotlakých lopatek parních turbín pracujících v prostředí mokré páry. *15. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní.
- [4] Ruml, Z., Straka, F. (1995): *A new model for steam turbine blade materials erosion*. *Wear*, Vol. 186-187, pp. 421-424. ISSN 00431648