Oponentský posudek

doktorská disertace ve studijním oboru Strojní inženýrství

Ing. Zbyněk Špirit

Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening (LSP)

Obor doktorského studia:	3911V016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Předložená disertace:	ZČU v Plzni, Fakulta strojní, KMM
Školitel:	Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž. – ZČU v Plzni, FS
Oponent:	Doc. RNDr. Josef Kasl, CSc. – Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Předmětem doktorského studia bylo ověření možností aplikace technologie Laser Shock Peening (LSP) k povrchovému zpevnění dílů energetických zařízení, které by zvýšilo jejich odolnost proti korozně-únavovému porušování a korozním praskání. Experimenty byly provedeny pro dvě standardně používané oceli: vysoce legovanou Cr-Ni-Mo ocel Böhler T552 (X12CrNiMoV12-3; 1.4938/1.4939), dále označovanou MO, a austenitickou Cr-Ni titanem stabilizovanou ocel GHOST 08Ch18N10T (AISI 321; 1.4541), dále označovanou AO.

Práce, včetně příloh, má 150 stran. Formálně je rozdělena do dvanácti částí. Po obecném Úvodu následuje stručné shrnutí současného stavu řešené problematiky. Po nich následuje Rešeršní (teoretická) část (celkem 30 stran), kterou je možné rozdělit do dvou částí, a to technologické a metodické. V první je podán popis tradičních metod zpevňování tryskáním a kuličkováním, dále pak ultrazvukem a vodním paprskem. Hlavní pozornost je věnována studované technologii LSP. V druhé části se autor věnuje popisu zbytkových napětí a jejich měření a degradaci únavou a korozním praskáním. Na závěr této kapitoly autor rozebírá možnosti „aplikace LSP v energetickém sektoru ČR". Tento popis je stručný a fakticky se omezuje na obecný výčet potenciálních možností. Teoretická část mohla být zpracována mnohem podrobněji a rovněž působí poněkud nevyváženým dojmem, co se týče rozboru jednotlivých částí.

Pátá kapitola je věnována „genezi výzkumné práce". Téma práce je zasazeno do kontextu řešení předmětné problematiky v CV Řež s.r.o. Není úplně jasný důvod zařazení této takto formulované kapitoly, jejíž některé odstavce by spíše patřily zčásti do popisu přípravy vzorků a zčásti do doktorandova odborného životopisu. Šestá kapitola (14 stran) je uvozena zdůvodněním jednak výběru dvou studovaných materiálů na základě potřeb tuzemských průmyslových partnerů z hlediska výroby i opravárenství, jednak vhodnosti volby použitých metodik. Dále jsou shrnuty stručné charakteristiky obou materiálů a popsány dvě laserové stanice, na kterých byly vyrobeny vzorky pro měření zbytkových napětí a mikrotvrdosti resp. zkušební tělesa tahových zkoušek, únavových zkoušek trojosým ohybem (varianty bez a se zpevněným vrubem), zkoušek vysokocyklové únavy s korozním vrubem (jen pro MO) a zkoušky korozního praskání (jen pro AO). Celkem bylo připraveno sedm typů vzorků pro různé testy v celkovém počtu 22 variant nastavení parametrů laserů. V další části jsou pro jednotlivé testy uvedeny popisy zkušebních těles a metodiky měření sledovaných vlastností – zbytkových napětí, mikrotvrdosti, mechanických vlastností při tahové zkoušce, odolnosti proti únavě při tříbodovém ohybu (ve vzduchu), odolnosti proti únavě při tříbodovém ohybu se

zpevněným vrubem (ve vzduchu), odolnosti proti koroznímu praskání v prostředí chloridu hořečnatého při teplotě do 155 °C a odolnosti proti únavě v režimu tah/tlak na vzduchu a v parním kondenzátu při statickém předpětí 300 MPa. Popsán je dále postup při fraktografické analýze a zařízení pro ni použité.

Sedmá kapitola shrnuje získané výsledky. První část je věnována měření zbytkových napětí na povrchu a jejich hloubkovému průběhu. V případě AO jsou v jednotlivých třech oblastech měření výrazně různá zbytková napětí, což poněkud komplikuje interpretaci výsledků po LSP. Hodnoty napětí se rovněž liší pro měření prováděná ve dvou navzájem kolmých směrech pro obě ocele. Z tabulky 7.1 není jasné, kolik měření bylo prováděno v jednotlivých směrech. Dále jsou uvedeny výsledky získané po aplikaci LSP, z nichž vyplývá, že do hloubky asi 0,8 mm došlo k vytvoření stavů s tlakovými napětími. Z práce není jasné, pro kterou oblast platí výsledky uvedené na obr. 7.1-3 až 7.1-5. Pro všechny lokality byly změřeny hloubkové profily mikrotvrdosti HV0,05. U AO je mikrotvrdost po aplikaci LSP vesměs vyšší než v nezpevněném stavu a s hloubkou klesá. U MA, zejména ve směru 0 °, rozdíly v mikrotvrdostech nejsou tak výrazné.

Další experiment byl věnován stanovení mechanických vlastností. U AO opět po aplikaci LSP došlo k navýšení meze kluzu i pevnosti, zatímco u MA byly nárůsty nevýrazné. V další části jsou uvedeny výsledky únavových zkoušek trojbodovým ohybem. Zpevněné vzorky MO oceli vykazovaly horší únavové vlastnosti a větší rozptyl hodnot než vzorky nezpevněné. To je přičítáno výrobě vzorků resp. horší mikročistotě oceli. Naproti tomu zpevněné vzorky AO vykazovaly lepší únavové vlastnosti ve srovnání s nezpevněnými, rozptyl hodnot je však také velký. Při zpevňování vrubu u vzorků AO bylo při zkoušení dosaženo zlepšení únavové pevnosti. Zpevnění u vzorků pro zkoušku korozního praskání vedlo k posunu doby pozorovaných trhlin ze dvou na dvacet hodin.

V další části byly optimalizovány parametry LSP na základě pozorování stavu zpevněných vrubů a vybrány dvě varianty pro zpevnění zkušebních těles pro testy vysokocyklové únavy. Aplikace LSP na vzorky s vrubem ukázala při zkouškách na vzduchu výrazné zvýšení meze únavové pevnosti z 80 MPa na cca 250 MPa (380 MPa pro vzorky bez vrubu a bez aplikace LSP). Zkoušky v parním kondenzátu vedly ke snížení meze únavové pevnosti asi o 100 MPa a vykazovaly výrazný rozptyl. U rozlomených zkušebních tyčí byl proveden rozsáhlý fraktografický rozbor s bohatou obrazovou dokumentací uvedenou v Příloze.

Osmá kapitola obsahuje na dvou stranách diskusi a na další stránce plán dalších aktivit v oblasti výzkumu LSP. Jsou shrnuty získané výsledky a konfrontovány s výsledky jiných prací, většinou však v obecné rovině („odpovídají", „podobné" ...). Po ní následuje jednostránkový závěr. V něm jsou uvedeny nejvhodnější nalezené parametry LSP pro obě oceli, je zhodnoceno dosaženého zlepšení vlastností u jednotlivých typů zkoušek a nastíněny potenciální aplikace.

V seznamu použité literatury (kapitola 10) je uvedeno 58 prací včetně pěti položek pocházejících z pracoviště autora a spolupracujících institucí.

a) *zhodnocení významu pro obor*

Snaha o omezení korozního napadení a s ním spojené iniciace a šíření korozně únavových trhlin a korozního praskání dílů energetických zařízení probíhá permanentně od začátku jejich provozování. Za tuto dobu byla navržena, testována a do výroby zařazena řada postupů povrchových úprav. Každé vylepšení funkčních vlastností je spojeno s významnými ekonomickými i ekologickými přínosy. Avšak při variabilitě součástí energetických zařízení, jejich materiálů a typů prostředí nemůže existovat jedna univerzální technologie. Je proto nutné neustále hledat a zkoušet nové přístupy, které nabízejí nově vyvinuté nebo vylepšené jak materiály, tak technologie výroby dílů a jejich povrchových úprav. Povrchové úpravy

pomocí laserového zpracování umožňují efektivně zvyšovat užitné vlastnosti strojních dílů a je jim proto věnována v současné VaV široká pozornost. Disertační práce je zaměřena na ověření možností jedné z těchto technologií. Cílevědomé dosažení vhodné kombinace užitných a technologických vlastností materiálu je podmíněno hlubším pochopením procesů probíhajících během jeho výroby a souvislostí mezi mikrostrukturou a výslednými vlastnostmi. Z tohoto pohledu je možné konstatovat, že předkládaná práce řešila aktuální a technicky důležitou problematiku uplatnění technologie LSP u ocelí.

b) *vyjádření k postupu řešeného problému, k použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle*

V práci jsou její cíle explicitně uvedeny v kapitole 2. Snahou bylo pro dvě oceli stanovit vliv technologie LSP na jejich mechanické a fyzikální vlastnosti a optimalizovat parametry této technologie tak, aby pomocí ní bylo možné zlepšení užitných vlastností (odolnost proti korozní únavě a korozním praskání) dílů používaných v energetických zařízeních. Práce působí poněkud roztříštěným dojmem s řadou aktivit, které ne vždy byly dotaženy do konce, a do práce byly zařazeny proto, aby měla dostatečný rozsah. Experimenty mohly být provedeny promyšleněji, více systematicky a do větší hloubky. Nicméně chápu problémy s omezením výroby vzorků na externích pracovištích na špatně dostupných zařízeních i to, že se jedná o novou u nás nezmapovanou technologii. U připravených vzorků se vyskytovaly heterogenity, které mohly výrazně ovlivnit dosažené výsledky a jejich následnou interpretaci. Některé dotazy jsou uvedeny jako otázky do diskuse.

c) *stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu*

Práce má charakter experimentálního vývoje technologického postupu povrchového zpevňování metodou LSP, kterou by bylo možné zlepšit odolnost proti korozní únavě a korozním praskání pro dvě standardní oceli používané k výrobě dílů pro energetická zařízení. Sám autor vidí hlavní přínosy své práce ve vyvinutí a ověření metodiky aplikace LSP pro studované ocele a popisu mechanismu šíření trhlin při únavových zkouškách. V prvním případě je třeba uvážit, že se jedná jen o první krok v případném systematickém vývoji optimalizovaného technologického postupu, neboť technologie zpevňování pomocí LSP ani zkušebních vzorků natož reálných výrobků jistě není úplně dotažená, jak vyplývá i z formulace plánovaných prací. V druhém případě se autor zabýval problematikou, která je mu dobře známá, a odvedl hodně práce se zajímavými výsledky. Je třeba kladně hodnotit to, že doktorand se věnoval nové technologii s potenciálem průmyslového využití. Doktorand ukázal, že je schopný na základě literárních znalostí, z realizovaných experimentů a z nich naměřených hodnot interpretovat dosažené výsledky. V tomto smyslu jsou autorovy výsledky přínosné zejména s ohledem na případné následující návazné práce.

d) *další vyjádření (k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce)*

Poznámky k formální úpravě. Práce je napsána celkem přehledně a má logické členění, byť v některých pasážích je poněkud nekonvenční. V práci se vyskytují překlepy, stylistické neobratnosti a terminologické prohřešky, je jich však relativně málo. Např. jediný výraz v ČJ je žáropevný (ne žárupevný), mikron není jednotka délky, překlep u definice zbytkových napětí 3. druhu, mezery mezi číselnou hodnotou a jednotkou fyzikálních veličin a použití mezery před znakem %. Nízká je kvalita některých převzatých obrázků a vložených vzorců.

e) *vyjádření k publikacím disertanta*

V kapitole 11 je uvedena úplná publikační činnost doktoranda, která zahrnuje 36 položek. Poněkud nelogicky jsou uvedeny v kapitole 12 (přílohy) tři nejvýznamnější

příspěvky v oblasti studia LSP. Publikační činnost považuji za dostatečnou. Je třeba kladně hodnotit i měsíční stáž na Technické univerzitě v Cincinnati v USA na pracovišti zabývající se řešenou problematikou LSP.

f) závěrečné vyjádření

I přes uvedené připomínky po zodpovězení uvedených dotazů/námětů do diskuse **doporučuji disertační práci k obhajobě.**

Otázky a náměty do diskuse:

1) Jak má čtenář rozumět informaci na str. 18, že „vnesení tlakového napětí vede ke zvýšení únavové pevnosti **o 1000 %**“?

2) Jaké fyzikální vlastnosti byly studovány (viz cíle programu)?

3) Proč nebyly do práce zařazeny výsledky získané danou technologií na dalších materiálech (Böhler T671, GOST14Ch17N2) uvedených v kapitole 5?

4) Jak byly připraveny vzorky, resp. jejich povrchy, (před povrchovým zpevněním LSP)? Je popsáno jen u zkušebních těles pro únavové zkoušky tah/tlak. Jak byla ovlivněna podpovrchová vrstva u vrubů při jejich přípravě laserem?

5) Z kolika měření byly spočteny hodnoty uvedené v tabulce 7.1?

6) Vysoká naměřená mikrotvrdost povrchové vrstvy u MO je zdůvodňována vlivem broušení vzorků. Byla předpokládaná plastická deformace ověřována metalograficky na příčném řezu?

7) Jaká je doktorandova představa o využití LSP v případě zpevňování povrchu korozních důlků při jejich komplikovaném tvaru a částečné výplni korozními zplodinami a úsadami?

V Plzni dne 8. 1. 2022

doc. RNDr. Josef Kasl, CSc.

Oponentský posudek k disertační práci

Ing. Zbyněk Špirit: Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní

Disertační práce Ing. Zbyňka Špirita s názvem Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening (LSP) se zabývá aktuální problematikou modifikace vlastností a chování povrchů kovových komponent pomocí moderních laserových technologií. Technologie, využívající k modifikaci povrchu laser, se díky zvyšující se dostupnosti laserových zdrojů a související laserové optiky stávají standartními metodami běžně využívanými v průmyslu. Běžně rozšířené technologie laserového čištění povrchů, značení, obrábění, svařování a tepelného zpracování jsou doplňovány technicky náročnějšími postupy laserového navařování vrstev a aditivní výroby. Pozitivní zkušenosti vedou k rozšiřování využití laserových technologií i do dalších oblastí průmyslového využití. Hlavním tématem předložené disertační práce je zhodnocením potenciálu využití laserové technologie k povrchovému zpracování typu „Shot Peening". Samotný princip zpevňování povrchů vnesením plastické deformace a souvisejícího tlakového pnutí do podpovrchových vrstev kovových materiálů není nijak nový – na tomto principu je založena celá řada metod, jejichž přehled je uveden v rešeršní části práce. Aktuální a nové je však právě využití energie laseru ke generování vysokotlakého plazmatu, které umožňuje prostřednictvím rázových vln vnášet do povrchové vrstvy plastickou deformaci, spojenou s tlakovým zbytkovým napětím.

Aplikace technologie označované jako Laserového Shot Peening (LSP) byla ověřena v rámci disertační práce na materiálech, používaných v českém energetickém sektoru – austenitická ocel GOST 08CH18N10T a vysocelegovaná ocel CrNiMnV ocel Böhler T552. Důvodem volby materiálu je předpokládané využití technologie v energetickém průmyslu, konkrétně v případě materiálu GOST 08CH18N10T v jaderné energetice, v případě vysoce legované oceli Böhler T552 v energetice klasické. Aplikace, na které jsou vybrané materiály používány, jsou namáhány kombinovaným zatížením – cyklickým mechanickým zatěžováním v korozním prostředí. Hlavním odborným cílem práce je ověření hypotézy o možném potlačení vzniku a šíření trhlin při únavovém namáhání pomocí technologie LSP a popis změny v tomto chování pomocí fraktografických metod. Dalšími cíli je posouzení vlivu aplikace technologie LSP na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti zvolených materiálů. Aplikační potenciál realizovaného výzkumu je zohledněn v jednom z vedlejších cílů práce – posouzení možnosti aplikace technologie LSP pro opravy lopatek parních turbín.

Kromě přínosu práce k hlubšímu porozumění souvislostem mezi působením energie laseru, změnami vnitřního napětí a únavové životnosti, jsou výsledky práce přímo využitelné v oblasti zvyšování životnosti energetických zařízení. Aktuálnost řešené problematiky byla v disertační práci doložena citacemi relevantní literatury i výsledky vlastní publikační činnosti. Originalita

dosažených výsledků je doložena i poddáním patentové přihlášky na téma Způsob zvyšování únavové životnosti turbínových lopatek ovlivněných důlkovou korozí a jejími důsledky, jejíž je autor disertační práce spoluautorem.

Samotná disertační práce je logicky členěna do několika hlavních kapitol.

Cíle disertační práce jsou uvedeny v jedné z prvních kapitol. Navazující rešeršní část práce zdůvodňuje volbu tématu i definici jejích hlavních cílů.

Rešeršní část práce obsahuje přehled tradičních (tryskání, kuličkování) i méně tradičních metod (ultrazvuk, vodní paprsek) zpevňování povrchu, popis principů použité metody LSP a jejich vzájemné porovnání. Druhá část rešerše se zabývá vlastnostmi povrchů, které jsou předmětem modifikace, a obvyklými způsoby jejich hodnocení. Pozornost je zaměřena na problematiku zbytkových napětí, únavového poškozování včetně vlivu korozního prostředí na únavovou životnost, metodiky fraktografického hodnocení vzniklých lomových ploch a popisu mechanismu korozního praskání. V souvislosti s uvažovanou aplikací je rešerše vhodně doplněna i kapitolou, zabývající se metodikou hodnocení únavové životnosti lopatkových ocelí s uměle vyrobenými vadami a rozborem aktuálního stavu poznání v této oblasti v rámci energetického sektoru ČR.

Rešeršní část práce považuji zdařilou. Pokrývá všechna zásadní témata, kterých se práce dotýká – samotnou technologii LSP, dotčené materiálové charakteristiky i metody jejich hodnocení, a neopomíjí ani kapitoly poukazující na potenciál uplatnění metody. Rozsah jednotlivých kapitol je přiměřený jejich významu a zaměření práce. Porozumění problematice je zřejmé i z kapitoly 5 – Geneze výzkumné práce, ve které autor popisuje okolnosti vzniku práce, včetně svého podílu na řešených projektech, diplomových pracích a publikovaných výsledcích.

Cílem navrženého experimentálního programu bylo ověření vlivu aplikace technologie LSP na vlastnosti vybraných materiálů. Motivace volby konkrétních materiálů je v práci dostatečně zdůvodněna. Pro dosažení stanoveného cíle byla navržena série experimentů s různým nastavením procesních parametrů laseru a strategie zpracování, které jsou popsány v kapitolách 6.2. Metody hodnocení samotného materiálu a vlivu aplikace LSP jsou uvedeny v kapitole 6.3., 6.4. a jejich podkapitolách. Tyto jsou však dle mého názoru nelogicky číslovány, a jejich číslování neodpovídá číslování v Obsahu práce – předpokládám tedy, že se jedná o chybu v editaci. Obsah těchto kapitol je však dostatečně vypovídající, přehledně popisují provedené experimenty.

V kapitole 6.4.2 a 6.4.3, popisující únavové zkoušky v tříbodovém ohybu a ověření strategie střelby na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost však chybí informace návaznosti provedených operací. Kombinace informací uvedených v k kapitolách 6.2.3 a 6.4.2 se lze domnívat, že vzorky pro únavové zkoušky v tříbodovém ohybu vyrobeny z předem zpevněných desek, a to včetně V-vrubu. Není však jasné, zdali v případě vzorků pro ověření strategie „střelby" byl V-vrub vyroben z před aplikací LSP, stejně jako v případě vzorků s uměle vyrobeným vrubem, nebo až následně.

Naměřené výsledky jsou prezentovány přehledně pomocí tabulek a grafů v kapitole 7.

V kapitole 7.1. jsou uvedeny a komentovány výsledky měření zbytkových napětí pomocí XRD a analýzy a hloubkového profilu zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody. V případě měření pomocí odvrtávací metody není uvedeno, zdali se jedná o měření v oblastech zpracovaných 1, 2 nebo 3 vrstvami LSP. Interpretaci výsledků ztěžuje fakt, že do experimentu vstupovaly materiály s nehomogenním stavem napjatosti. Dále postrádám vysvětlení nebo alespoň komentář k faktu, že hodnoty naměřené pomocí XRD metody a metody odvrtávání se výrazně liší. I přes tyto nejasnosti lze však získané výsledky zobecnit a dojít závěrům shodným se závěry autora práce.

Měření hloubkového profilu mikrovrdosti, uvedené v kapitole 7.2., ukazuje na cca 1.3-1.7 mm (v závislosti na orientaci) u materiálu OGOST 08CH18N10T a 1.7 mm pro materiál Böhler T552. V souvislosti s nejasností s výrobou V-vrubů (viz kapitola 6) ve vzorcích pro únavové zkoušky v tříbodovém ohybu se nabízí otázka, zdali nejednoznačné výsledky únavové životnosti nemohou souviset s hloubkou vrubu, který v případě OGOST 08CH18N10T může procházet téměř celou zpevněnou vrstvou.

Vliv ověření strategie „střelby" na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost (kap. 7.5.), zkoušky korozního praskání (kap. 7.6) a zejména zkoušky VCÚ s uměle vyrobeným vrubem (kap. 7.6) potvrzují hypotézu o pozitivním vlivu LSP na únavové vlastnosti a potenciál použití LSP jako opravné technologie pro lopatky turbín, poškozené důlkovou korozí. Zejména provedené a systematicky popsané fraktografické analýzy únavových lomů považuji za přínos k porozumění souvislostem mezi aplikovanou technologií a očekávanému zvýšení životnosti zpracovávaných komponent.

V samostatné kapitole 8. autor vhodně diskutuje získané výsledky s relevantními publikačními zdroji a vysvětluje vzájemné souvislosti. Závěry práce (kap. 9) shrnují podstatná pozorování.

Výsledky uvedené v disertační práci demonstrují přínos doktoranda k prohloubení současného stavu poznání v oboru. Množství naměřených dat a způsob jejich zpracování potvrzují schopnost doktoranda navrhovat a realizovat experiment na základě navržených hypotéz, dosažené výsledky analyzovat a dojít k závěrům. Ačkoli ke zpracování některých typů výsledků lze vznést námitky (vyš výše), celkově považuji předloženou práci za zdařilou.

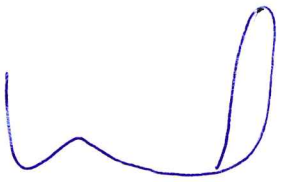
Formální úprava a jazyková úroveň disertační práce je i přes drobné nedostatky, vyhovující.

Na základě výše uvedeného hodnocení předložené disertační práce **doporučuji** udělení akademického titulu Ph.D.

Otázky k obhajobě:

1) Doplňte informaci o návaznosti provedených operací a komentujte případný vliv V-vrubu vs. hloubka ovlivněné vrstvy v experimentu „Únavové zkoušky v tříbodovém ohybu".
2) Uvádíte, že experiment „Ověření vlivu strategie „střelby" na vnesené zbytkové napětí a únavovou životnost" byl navržen na základě numerických simulací, publikovaných

v práci [37]. Vysvětlete souvislost navržené strategie s numerickou simulací a výsledky provedeného experimentu.



V Plzni, 26.11.2021

Doc. Ing. Šárka Houdková Šimůnková, Ph.D.

Nové Technologie – Výzkumné Centrum
Západočeská Univerzita v Plzni

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Autor: **Ing. Zbyněk Špirit**

Název práce: **Inovativní metoda úpravy povrchu ušlechtilých ocelí metodou Laser Shock Peening**

Rozsah práce: 152 stran, 172 obrázků, 34 tabulek, 58 literárních pramenů.

Posouzení předložené práce:

V úvodní části disertační práce byla odolnost materiálu proti cyklickému zatěžování dána do souvislosti s integritou povrchu, kterou lze modifikovat různými metodami, které vytváří tlakové napětí v povrchových vrstvách.

V 2 kapitole „Cíle disertační práce" byl definovány hlavní cíle disertační práce – ověření vlivu metody Laser shock peening (LSP) na materiálové vlastnosti a zejména na možnost jejich zvýšení u ocelí používaných v české energetice. Dalším cílem bylo posouzení možnosti využít LSP na opravu lopatek parních turbín.

Kapitola 3 „Současný stav problematiky" se zabývá metodami zajišťujícími zvýšení tlakového pnutí v povrchových vrstvách materiálu kinetickým účinkem dopadajících tělísek a tlakovými vlnami, zejména metodou LSP. Uvedená metoda umožňuje prostřednictvím rázových vln vytvářených pulzním laserem vnést do povrchových vrstev kovových materiálů tlakové napětí, které příznivě působí na jejich únavovou životnost.

Kapitola 4 byla zpracována jako rešerše tradičních metod zpevňování povrchových vrstev otryskáním a kuličkováním, ultrazvukovým zpevňováním, zpevňováním vodním paprskem kovových materiálů a LSP. Podrobně byl popsán princip LSP, interakce laserového paprsku s materiálem a požadavky na pulsní laser a procesní parametry.
Byly též podrobně popsány metody měření zbytkových pnutí, včetně jejich omezení. Další část kapitoly byla zaměřena na únavové poškozování materiálů, vliv korozního prostředí, na fraktografické hodnocení lomových ploch únavových trhlin a možnosti hodnocení únavové životnosti ocelí používaných na výrobu lopatek parních turbín.

Kapitola 5 „Geneze výzkumné práce" stručně informuje o současném stavu využívání metody LSP a možnostech její využití pro řešení problémů s degradací materiálů v energetice.

Kapitola 6 „Popis a zdůvodnění experimentálního programu" obsahuje podrobné zhodnocení základních mechanických vlastností zkoušených ocelí 08CH18N10T (podle GOST) a Böhler T552. Popsány byly zvolené parametry LSP pro zpracování vzorků ze zmíněných ocelí na měření zbytkových pnutí, mikrotvrdosti, na únavové zkoušky i zkoušky korozního praskání.

Kapitola 7 „Výsledky" shrnuje výsledky experimentů, které prokázaly příznivé působení povrchového zpevnění zkoušených ocelí metodou LSP na odolnost proti únavovému porušování i proti korozním praskání. Velmi zajímavá byla zkouška s uměle vytvořeným korozním bodem, která umožnila prokázat pozitivní vliv zvolených parametrů LSP na zvýšení odolnosti proti únavovému porušení. Podrobně byla zpracována fraktografická analýza lomových ploch vzorků po únavových zkouškách.

Kapitola 8 „Diskuse výsledků" stručně shrnula získané výsledky experimentů a konfrontovala je s dostupnými poznatky z literatury. Na podkladě výsledků z experimentů uskutečněných v rámci disertační práce byly navrženy další směry výzkumných prací a možnosti aplikace LSP v praxi.

Kapitola 9 „Závěr“ shrnula získané poznatky z experimentálního programu, včetně doporučených parametrů LSP při řešení problémů s únavovým porušováním ocelí 08CH18N10T a Böhler T552. Předpokládané cíle byly splněny.

Připomínky k předložené práci:

Připomínky v žádném případě nesnižují hodnotu předložené disertační práce. Jedná se především o některé nekonvenční termíny:

- damadge – str.26
- špice trhliny – str. 40
- fosilní elektrárny – str. 42 + 46
- stopovací podmínka – str. 57
- SMODCH – není v seznamu zkratek
- V tab. 7-3 + 7-4 +7-6 + 7-7 + 7-8 + 7-9 – místo čárky použita tečka (převzato z publikací v angličtině)

Nekonvenční je též struktura disertace, spíše má charakter výzkumné práce – cíle práce jsou před teoretickým rozborem problematiky řešené v disertaci.

Zhodnocení:

a) Předložená disertační práce přináší řadu nových poznatků o technologii Laser shock peening a možnostech jejího využití při řešení problému s únavovým porušováním ocelí používaných v energetice. Získané poznatky mají velký význam pro aplikaci LSP v praxi.
b) Postup zvolený k řešení problematiky i zvolené metody řešení jsou v souladu se současným stavem poznání. Cíle disertační práce byly splněny.
c) Výsledky disertační práce jsou přínosem pro hlubší poznání vztahů mezi parametry LSP a možnostmi aplikace v oblasti energetiky. Řadu získaných poznatků lze využít i při řešení problémů únavovým porušováním v dalších technických oblastech.
d) Předložená práce je uspořádána ve studijní části systematicky a přehledně. Experimentální program je velmi rozsáhlý, zahrnuje široké spektrum nových experimentálních postupů.
a) Disertant prezentoval výsledky svých prací v recenzovaných časopisech, na prestižních mezinárodních konferencích i na konferencích a seminářích v ČR.
b) Doporučuji předloženou disertační práci k přijetí. Dále doporučuji po vyjasnění připomínek k disertaci udělit akademický titul „Ph.D.“

V Praze, dne 16.12.2021

Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.