

77.9.18

Prof. Ing. Emil Evin, CSc., Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta, Technická
univerzita v Košiciach, Mäsiarska 74, 040 01 Košice

OPONENTSKÝ POSUDOK

na dizertačnú prácu

Téma: „Degradace vlastností vysokopevnostních materiálu vlivem vodíkové křehkosti“

Doktorand: Ing. Lukáš Zuzánek

Školiteľ: doc. Ing. Pavel Solfronk, PhD.

Študijný odbor: Strojnírenská technológia

Pracovisko: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojná

Rozsah práce: 150 strán včítane, príloh, zoznamu 55 bibliografických odkazov, 76 obrázkov,
2 tabuliek a 18 záznamov publikácií autora.

Aktuálnosť zvolenej témy

Predložená práca je zameraná na využitie martenzitických ultra-vysokopevných ocelí pri stavbe automobilov za účelom zníženia emisií pri zachovaní cenovej dostupnosti, výkonnosti a bezpečnosti automobilov. Zníženie emisií je možné dosiahnuť znížením aerodynamického odporu karosérie, zvýšením účinnosti spaľovacieho motora, znížením odporu pri prenose energie, aplikáciou nových zdrojov palív, znížením hmotnosti automobilov aplikáciou vysokopevných a ľahkých materiálov. Z tohto pohľadu je téma práce veľmi aktuálna a svojim obsahom spadá do študijného programu „P 2303 Strojnírenská technológia“.

Hodnotenie náplne a dosiahnutých výsledkov

Práca je rozdelená do 13 kapitol. V úvodných kapitolách doktorand analyzuje postupy výroby výliskov z vysokopevných ocelí lisovaním s následným kalením v nástroji, z laserom zváraných prístrihov na mieru a flexibilným valcovaním. Ďalej popisuje možnosti ochrany PHS pred tvorbou okruží nepovlakovaných a plechov s povlakmi Al-Si, Zn, Zn-Ni. Na oceľové plechy určené pre deformačné zóny sa kladú vyššie nároky než na plechy určené na výrobu dielov karosérie hlbokým ťahaním. Aby plech disponoval vysokými hodnotami pevnostných vlastností musí mať definovanú štruktúru, subštruktúru a textúru. U vysokopevných mangán - bórových oceliach je vysoká pravdepodobnosť, že bude dochádzať k degradácii mechanických vlastností v dôsledku vzniku vodíkovej křehkosti. Plechy pre povrchové diely karosérie sú by mali byť čo najčistejšie, oproti tomu u vysokopevných mangán - bórových ocelí je lepšie, keď je plech znečistený nekovovými vtrúseninami ako i uhlíkom vo forme cementitických častíc. Intersticiálne atómy najmä uhlík a dusík sú rafinačným procesom u IF ocelí na oceliarni znížené a potom ešte procesom mikrolegovania vyviazané na karbonitridy pomocou Ti a Nb. V práci nie je uvedené chemické zloženie použitého materiálu a zdôraznený vplyv chemického zloženia na vodíkovú křehkosť a BH efekt. Vodíkovej křehkosti, možnostiam jej odstránenia a skúškam vodíkovej křehkosti je venovaná kap.4. Po lisovaní nasleduje lakovanie a sušenie karosérie pri teplote 170 °C po dobu 20 minút. Pri tejto teplote dochádza k obmedzeniu pohybu dislokácií (k starnutiu), čo by sa malo prejaviť zvýšením medze klzu a znížením ťažnosti. Následne doktorand popisuje základné princípy lomovej mechaniky a röntgenovej difrakcie.

V experimentálnej časti autor uvádza, že pre experimentálny výskum bola použitá vysokopevná mangán bórová oceľ a popisuje spôsoby prípravy vzoriek pomocou laserového

lúča a vodného lúča. Z výsledkov skúšok mechanických vlastností vyplýva, že pri výrobe vzoriek vodným lúčom a laserovým lúčom dochádza k zmene mechanických vlastností, preto je správne, že vzorky boli pripravené kombináciou laserového delenia a brúsenia.

Degradácia mechanických vlastností v dôsledku vodíkovej krehkosti sa prejavuje pri dlhodobom namáhaní. Doktorand navrhol pripravok pre upínanie ťahových vzoriek. Vzorky boli podrobené cyklickému namáhaniu pri skúške ťahom a ohybe. Porušené vzorky (s lomom) boli podrobené fraktografickej analýze a analýza prvkov. Analýza obsahu vodíka v štruktúre materiálu bola vykonaná pomocou analyzátoru vodíka ALTRA OHN 2000 a detekcia zostatkových napätí bola detekovaná pomocou difraktromera PROTO iXDR COMBO. Namerané hodnoty boli spracované vo forme grafov. Kde bolo vhodné a potrebné doktorand použil regresnú analýzu.

Prínos práce pre ďalší rozvoj vedy, techniky a umenia

Prínosom sú rozširujúce poznatky o vplyve vodíkovej krehkosti na degradáciu mechanických vlastností vysokopevných mangán - bórových ocelí s využitím štandardných aj neštandardných metód a stanovenie kritérií pre predikciu vodíkovej krehkosti. Aplikácia navrhutej metodiky prispeje k skráteniu procesov zavedenia vysokopevných mangán - bórových ocelí do sériovej výroby.

V diskusii žiadam doktoranda zodpovedať nasledujúce otázky

- 1) Aký iný spôsob prípravy vzoriek by bolo možné použiť, aby nedošlo k ovplyvneniu výsledkov skúšok mechanických vlastností?
- 2) Pri teplote vypaľovania laku u neupokojených ocelí dochádza k starnutiu tzv. BH efektu. V práci nie je uvedené chemické zloženie použitého materiálu. Aké bolo chemické zloženie skúmaného materiálu?
- 3) Prejavil sa BH efekt na zázname ťahovej skúšky a zmene mechanických vlastností?
- 4) Výsledky naznačujú, že závislosť zostatkových napätí na vodíkovej krehkosti. Na základe pozorovania častíc druhej fázy analyzovaných pomocou svetelnej a elektrónovej mikroskopie nebolo možné popísať závislosť zostatkových napätí na priepustnosti atomárneho vodíka resp. ako boli stanovené kritéria pre predikciu vodíkovej krehkosti?
- 5) Ak si vysvetľujete skutočnosť, že vzorky s BH efektom vykazovali najväčšie hodnoty zostatkových napätí, avšak z hľadiska kinetiky vzniku lomu sa to prejaví pozitívne?

Záver

Dizertačná práca je spracovaná chronologicky, použité metódy boli vhodne zvolené. Práca nadväzuje na výskumnú a tvorivú činnosť doktoranda a je podporená dostatočnou publikačnou činnosťou. Ciele práce tak ako boli formulované boli splnené. Výsledky práce sú v plnej miere aplikovateľné v praxi.

Predložená dizertačná práca Ing. Lukáša Zuzánka a publikačná činnosť dokazujú dobré odborné schopnosti a erudíciu doktoranda. Predložená dizertačná práca a auto referát vyhovujú požiadavkám pre obhajobu DP, preto ju odporúčam k obhajobe a po úspešnej obhajobe odporúčam doktorandovi Ing. Lukášovi Zuzánkovi udeliť akademický titul „philosophiae doctor“ v skratke „PhD“.

V Košiciach 10.09.2018

prof. Ing. Emil Evín, CSc.



Recenzní posudek doktorské disertační práce

Název práce: **Degradace vlastností vysokopevnostních materiálů vlivem vodíkové křehkosti**

Autor práce: Ing. Lukáš ZUZÁNEK

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel SOLFRONK, Ph.D.

Recenzent: Doc. Ing. Pavel RUMÍŠEK, CSc.

Předkládaná disertační práce obsahuje na 111 stranách textu a 39 listech dokumentačních příloh kapitoly, týkající se teoretické, experimentální a tabulkové části, doplněné anotací s prohlášením, přehledem použitých symbolů a zkratk, seznamem literatury a publikační činnosti autora k tématu disertační práce.

Jak plyne z názvu práce, doktorand řešil poměrně složitou část výzkumu, zabývajícího se degradací materiálů vlivem vodíkové křehkosti. Řešení bylo zaměřeno na degradační procesy mechanických vlastností PHS ocelí při technologickém zpracování v sériové výrobě.

Po prostudování práce musím již úvodem hodnocení konstatovat, že práce je zpracována logicky správně a je patrná rovněž dostatečná orientace doktoranda v celé oblasti, týkající se této problematiky. Cíle disertační práce jsou definovány přehledně a nemám k nim žádné připomínky.

Teoretická část práce je přehledná, literárními odkazy dokumentována, a mimo drobných formálních nedostatků a překlepů je obsahově i věcně správná. Mimo vlastní výrobu PHS ocelí a ochranu jejich povrchu proti tvorbě okují pojednává i o vzniku a působení vodíkové křehkosti a příslušných zkouškách a metodách měření vodíku při svařování. Velmi hodnotná je zde především část, popisující detailně působení vodíku v oceli, důležitou částí práce jsou rovněž kapitoly, týkající se vlivu BH efektu na mechanické vlastnosti materiálu a taktéž kapitola 6, týkající se teorie lomů a lomové mechaniky. Poslední kapitola této části pak velmi dobře popisuje i zbytkové napětí a rentgenovou difrakci.

Přestože je práce zpracována velmi pečlivě, musím konstatovat, že i v teoretické části se vyskytují některé drobné formální nedostatky, kde bych jako příklad uvedl alespoň některé:

Str.21 liší se od přímého procesu v před deformací... (vypustit „v“)

Str.28 ...dobrá na základě hrubého povrchu (z důvodu)

Důležitá je také hodnota času výdrže ponechání materiálu ... (doba výdrže)

Str.30 ... mezi povlakem a lisovnicím nástrojem. (lisovacím)

Str.42 ... křehkost způsobené působením vodíku (způsobenou)

Str.46 Z tohoto důvodu zvýšené teploty ... (vypustit „tohoto“)

Uvedené, a rovněž některé drobné nepřesnosti textu v části experimentální, však v žádném případě nesnižují poměrně vysokou obsahovou a odbornou úroveň této kvalitní práce.

Experimentální část práce se v souladu s názvem zabývá degradací mechanických vlastností vysokopevnostních PHS ocelí vlivem vodíkové křehkosti a již v úvodu v 6 bodech specifikuje přehled zkoušek a analýz, které byly při experimentu provedeny. Velmi detailně a kvalitně je zde popsána zvláště část přípravy vzorků a graficky a tabulkově dokumentovaná analýza jejich mechanických vlastností, doplněná protokoly a vyhodnocením. Zde velmi kladně hodnotím i popis vlivu BH efektu u různých způsobů přípravy zkušebních vzorků.

Vynikající kvalitu a komplexnost celé práce potvrzuje i popis a grafická dokumentace výroby zkušebních přípravků pro tahové a ohybové zatěžování a velmi důležitá kapitola, popisující realizaci mechanických zkoušek na vodíkovou křehkost s jejich následným vyhodnocením. Jako drobnou připomínku zde mám pouze to, že u realizace zkoušky tahovým namáháním mohl být mimo popisované detaily průběhu zkoušky uveden dílčí odkaz i na ČSN EN 2832.

Z důvodu detailní identifikace možných příčin porušení materiálu a komplexnosti práce byla ve spolupráci s externími pracovišti provedena i strukturní (fraktografická) analýza lomových ploch testovaných materiálů (kap.10), analýza obsahu vodíku v materiálové struktuře (kap.11) a rovněž analýza vlivu působení vodíku rentgenovou difrakcí (kap.12), doplněná množstvím zobrazení lomových ploch a grafů s následným vyhodnocením.

Je nutno konstatovat, že i v tomto případě přinesly všechny uvedené zkoušky velmi zajímavé a hodnotné závěry a budou kvalitním přínosem pro praxi zvláště při sériové výrobě výlisků. Toto je akcentováno i v závěrečné kapitole, kde je provedeno shrnutí cílů a přínosů práce s tím, že řešení bylo zaměřeno právě na možné degradační procesy mechanických vlastností, vznikajících jako důsledek technologických procesů v sériové výrobě.

Po prostudování experimentální části ji z mého pohledu hodnotím kladně a rovněž poslední kapitola potvrzuje odpovědné zpracování a komplexnost celého projektu.

Závěrem mého hodnocení bych chtěl opakovaně poukázat na to, že předložená práce je zpracována logicky, věcně i obsahově správně, navržená metodika zkoušek využívá moderních metod, dosažené výsledky jsou vyhodnoceny se statistickou průkazností a k práci nemám mimo uvedených drobných formálních připomínek žádné výhrady.

Jako obecnou připomínku zde pouze uvádím, že podle platné směrnice, závazné pro zpracování disertačních prací, a jejich obsahové členění, by měla být krátce a samostatně rozvedena i část, pojednávající o současném stavu řešené problematiky.

Téma celé práce je aktuální a po prostudování mohu konstatovat, že práce splnila ve všech směrech předem stanovené cíle. Řešením doktorand prokázal, že ovládá nejen odbornou problematiku, týkající se daného oboru, ale jsou mu blízké i vědecké metody a jejich uplatnění, vedoucí cíleně k hodnotným závěrům, přinášejícím nové poznatky v oboru.

Výsledky práce poskytují informace nejen pro další pokračování výzkumných prací v dané problematice, ale mohou být velmi cenné rovněž pro konstruktéry a technology, řešící aplikaci materiálů v praxi a to zvláště s ohledem na kvalitu finálních výrobků.

Celkovou kompozicí, obsahovou náplní, volbou cílů a metodiky, jakož i pečlivým provedením a dokumentováním výsledků experimentů, byl dostatečně prokázán též vlastní vědecký přínos doktoranda a jeho orientace v dané problematice na základě hlubokých teoretických znalostí, svědčících o jeho schopnosti samostatně vědecky pracovat.

Zde je však nutno konstatovat, že úroveň, obsah a kvalitní zpracování celé práce svědčí nejen o dobrém přístupu a znalostech doktoranda, ale též o jeho kvalitním vedení ze strany vedoucího práce.

V průběhu obhajoby by bylo vhodné položit doktorandovi ještě následující dva dotazy, související se zadáním a hlavním tématem práce:

- 1) Vysvětlíte, proč např. oceli s austenitickou strukturou nejsou náchylné na vodíkovou křehkost?
- 2) Jaký je důvod a příčina negativního působení některých prvků (kyslík, síra, hliník, uhlík, nikl, mangan) na odolnost oceli vůči vodíkové křehkosti?

Na základě uvedených závěrů doporučuji předloženou práci jednoznačně k obhajobě, a po jejím úspěšném ukončení doporučuji, aby doktorandovi byla udělena vědecko – akademická hodnost a titul Ph.D.



Doc. Ing. Pavel Rumišek, CSc.

V Brně dne 1.8.2018

12. 2. 18

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Vážený pan děkan

Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Věc: oponentní posudek PhD. práce Ing. Lukáše Zuzánka

Téma: Degradace vlastností vysokopevnostních materiálů vlivem vodíkové křehkosti

Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní

Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Solfronk

Práce předložená k oponentuře obsahuje:

Celkem 160 str. Z toho 62 str. teoretického pojednání, experimentální část v rozsahu 81 str., včetně 6 příloh obr. a tab. v rozsahu 27 str., literatura 5 str. 55 pramenů, publikační činnost 2 str. 18 odvolávek.

V teoretickém pojednání řeší teorii všech nutných oblastí souvisejících s použitým materiálem, možnostmi jeho zpracování. Dále podrobně řeší vodíkovou křehkost, BH efekt, elastickou lomovou mechaniku.

Těžiště práce je v experimentální části. Ta je logicky rozvržena do 5 ti odstavců.

Je obvykle zvykem experimentální části začínat obvyklými údaji o zkoušeném materiálu. Jeho chemickým složením, specifikací dle ČSN nebo jiné normy, základní mechanické vlastnosti a dále uvést alespoň tloušťku zkoušeného plechu a výchozí specifikaci výchozího polotovaru. Toto vše zde chybí. Důvodem k tomu je snad snaha o utajení výrobce, chemického složení a výchozí mechanické vlastnosti. To ovšem snižuje možnosti při hodnocení práce. Uvádí pouze, že se jedná o mangan-borovou martenzitickou ocel o pevnosti 1900 až 2000 MPa. Plech byl dodáván ve formátu A4.

V **kap. 8** volí dva způsoby řezání laserem nebo vodním paprskem, s uvedením výhod a nevýhod příslušné metody. Z obrázku 32 a textu není jasné zabroušení řezné hrany s úběrem 0,3 mm. Zda to je v ploše plechu či v kolmé ploše k ní v ploše řezu. Plech byl snímkován pomocí optického mikroskopu. Byly prováděny rovněž metalurgické výbrusy zaleptané 3% roztokem kyseliny dusičné. Uvádí, že při použití vodního paprsku vzniklé rýhy v řezu mohou působit jako zárodek vzniku trhliny a ovlivnit tak výslednou pevnost materiálu. Testovaný materiál je opatřen vrstvou AlSi 30 μm a difuzní vrstvou 8 μm . V oblasti střížné hrany byly provedeny zkoušky mikrotvrdosti HV a statická zkouška tahem vzorků s určením mechanických vlastností. Vzorky byly buď s BH efektem nebo bez něho v provedení řezání laserem nebo vodním paprskem. Byla provedena analýza rozptylu vlivu BH efektu pomocí programu Exel Annova pro $R_{p0,2}$ a R_m . Byl zjištěn významný vliv BH efektu na R_m . Vliv na tažnost A50mm je méně výrazný. Zabroušené vzorky vykazují vyšší hodnoty R_m a $R_{p0,2}$. Tvařitelnost byla hodnocena dle komplexního ukazatele tvařitelnosti KUT. Podobné je hodnocení při dělení vodním paprskem. Z analýzy rozptylu vyplývá vliv BH efektu R_m snižuje a $R_{p0,2}$ zvyšuje, změna tažnosti je nevýznamná. Pro všechny další vzorky bylo zvoleno dostupné a rychlé řezání laserem, a také odpadá koroze vzorků.

Dále byly provedeny zkoušky s plechy se zvýšeným obsahem H_2 . Dělo se tak po galvanickém nanášení zinku. Byly posouzeny vzorky vždy řezané laserem se zabroušenou hranou, s BH a bez BH efektu a bez navodíkování nebo s ním.

V **kap. 8.5** je pojednáno o zkušebních přípravcích pro jednoosé tahové namáhání a přípravek pro tříbodový ohyb. Je zde uvedena navržená jejich konstrukce s ohledem na požadavky zatížení až stovek hodin. Velikost přípravku pro tříbodový ohyb je omezena požadavkem možnosti vložení do klimatické komory, pro sledování vodíkové křehkosti při změně okolního prostředí. Výkresy konstrukční části jsou uvedeny v příloze. Tahové zkoušky probíhaly na trhacím stroji Zwick Amsler 100 HFP 5100. Pro tříbodový ohyb byl navržen speciální přípravek uvedený příloze 5).

Kap. 9 pojednává o mechanických zkouškách na vodíkovou křehkost. Kriteriem bylo korozní praskání prováděné na trhačce Amsler výše uvedené. Zatěžování může být tahové, tlakové nebo střídavé s maximální možností síly 100 kN. Tato technologie vychází ze znalostí získaných u výrobců vysokopevnostních ocelí. Doba zatěžování byla 100 hod. a počet vzorků byl 5 ks. Pro tři sady zkušebních vzorků ze základního materiálu s BH efektem, po experimentálním nasycení vodíkem. U vzorků kde došlo k destrukci byly provedeny strukturní analýzy. Stejná byla metodika pro hodnocení navodíkováných vzorků. Jednalo se o tahové zatěžování a o zatěžování tříbodovým ohybem. Na obr. 55 je zkušební přípravek s implementovaným siloměrem a úchylkoměrem k měření průhybu. Na obr. 56 je zkušební přípravek bez siloměru pro provádění experimentů v klimatizační komoře, kde by se siloměr mohl porušit. Zkoušky byly kombinovány i s BH efektem. Doba zatížení byla pro všechny vzorky stejná 100 hod.

V **kap. 9.3** bylo provedeno **hodnocení mechanických zkoušek**. Velký vliv na vodíkovou křehkost má BH efekt, díky kterému dojde ke snížení vnitřních pnutí a meze pevnosti. Souhrnné výsledky pro tříbodový ohyb jsou uvedeny na obr. 60. Největší změna nastala při zkouškách s BH u zkoušek se zvýšenou vlhkostí a teplotou. Zde se zřetelně projevilo nízkoteplotní popouštění během vzniku BH efektu. Bylo to provedeno jak u vzorků porušených tříbodovým ohybem tak tahovým.

V **kap. 10** byla provedena strukturní **analýza lomové plochy** z důvodů identifikace příčin porušení namáháním. Byly sledovány lomy vzorků s nebo bez BH efektu v klimatické komoře, zkoušky po experimentálním difuzním nasycení vodíkem. Byla provedena fraktografická analýza lomových ploch. V **kap. 11** dále **analýza obsahu vodíku ve struktuře materiálu**. Ta proběhla ve spolupráci s Báňskou univerzitou v Ostravě – s Ústavem materiálového inženýrství na analyzátoru vodíku ELTRA ONH 2000. Vzorky byly použity stejné jako při ohybových zkouškách. Byl sledován nárůst obsahu vodíku vzorků v klimatické komoře po nebo bez BH efektu. Nárůst byl od 1 do 1,3 ppm. Největší nárůst potom po experimentálním sycení vodíkem v galvanickém pokovovacím procesu. Vliv prostředí a tepelné úpravy je uveden souhrnně na obr. 71.

V **kap. 12** proběhla **analýza vliv působení vodíku pomocí rentgenové difrakce**. Bylo sledováno zbytkové napětí, které negativně ovlivňuje výsledné chování materiálu. Měření byla provedena na difraktoměru PROTO iXRD COMBO v uspořádání tzv. omega-goniometru se zářením rentgenky s chromovou anodou viz obr. 72. Je provedeno sledování zbytkových napětí pro různé povrchové úpravy speciálně pro ohybového zatížení zkušební vzorku. Na obr. 75 je konkrétní průběh zbytkových napětí v závislosti na čase. Bylo prokázáno působení vodíku převážně v podpovrchové oblasti, proto byla snaha měřit co nejvíce u povrchu, kde již nejsou zbytky povlakové vrstvy ovlivňující výsledné hodnoty.

V **kap.12.3** je provedeno **fraktografické vyhodnocení rentgenografické analýzy**. Z hlediska soudržnosti materiálu se požadují makroskopická zbytková pnutí tlakového charakteru, která zmenšují možnosti vzniku vnitřních mikrotrhlin a jejich šíření. Na tato pnutí má prokazatelný vliv

obsah vodíku na povrchu materiálu. Všechny hodnoty u navodíkováného materiálu vykazují hodnoty bližší tahovým napětím, které reprodukuje větší náchylnost vzniku lomu při zatížení. Největší tlakové napětí je naměřeno u vzorku s BH efektem. Je to způsobeno nízkoteplotním popouštěním během tepelného procesu. Z tohoto hlediska je nejvíce odolný vůči porušení.

Shrnutí a závěr hodnocení.

Disertant ve své práci podrobně řeší širokou problematiku hodnocení degradace vysokopevnostních ocelí vlivem vodíkové křehkosti. Podrobně pro jeden materiál mnoha způsoby hodnotí náchylnost oceli k vodíkové křehkosti. V úvodu a v závěru mluví ovšem o možnostech hodnocení pro sériovou výrobu. To je ovšem pojem daleko širší v rámci této práce neřešitelný. Použitelnost zvolené oceli závisí dále na řadě použitých technologických operací, včetně ekologie a ekonomiky, seriovosti výroby atp. Jsou to všechno dílčí problémy při navrhování technologií tváření plechů za tepla. Téma je **velice aktuální z hlediska snižování hmotnosti karoserie, ekologie, spotřeby pohonných hmot a stále vrůstajícímu trendu v používání tváření vysokopevnostních plechů ve stavbě karoserií**. Volba materiálu pro karoserii je první důležitý problém, ale těch je více. Náchylnost k vodíkové křehkosti by měla být první vstupní parametr při volbě jakosti materiálu. Je to tedy otázka při řešení celého projektu linek pro tváření plechů za tepla. Vysokopevnostní oceli pro tyto díly karoserií jsou speciální materiály a není mnoho jejich výrobců. Přesto se domnívám a nepovažuji za postačující, že ocel bez udání mechanických hodnot, tloušťky, pouze s konstatováním že se jedná o vysokopevnostní martenzitickou ocel je postačující. Tyto vstupní parametry mě chybí při hodnocení výsledků práce. Z hlediska vlastního hodnocení náchylnosti zvolené oceli k vodíkové křehkosti disertant zvolil tyto metody, nebo se zabýval touto problematikou:

- Přípravou vzorků včetně ovlivnění řezné hrany
- Statická zkouška tahem a tříbodovým ohybem, včetně konstrukce přípravků
- Jejich zatěžováním s ohledem na navodíkované a BH vzorky
- Strukturní analýza lomové plochy
- Zatěžování v klimatizační komoře
- Experimentální nasycení vzorků vodíkem
- Vyhodnocení fraktografické analýzy lomových ploch
- Analýza vlivu působení vodíku pomocí rentgenové difrakce

K práci mám tyto dotazy či připomínky:

- a) Příprava vzorků pro zkoušky a z toho plynoucí závěr, že bude používat metodu dělení řezáním laserem s následným obroušením s úběrem 0,3 mm, není blíže specifikováno co odbrušoval. Zda na čelní ploše či na ploše řezu. To může mít vliv na vznik a rozvoj mikrotrhlin může tak ovlivnit iniciaci vodíkové křehkosti.
- b) Zvyšování citlivosti galvanickým zinkováním neodpovídá technologii tváření za tepla. Z hlediska sledování materiálu je to však vhodné. Podobné je to i s klimatizační komorou.
- c) Na str.46 uvádí, že BH efekt je využitelný pro měkké oceli. Zde se jedná o vysokopevnostní oceli. Jak to tedy je. Na tom závisí všechny navržené mechanické zkoušky prováděné po iniciování BH efektu.
- d) Použitelnost navržených metod zjišťování citlivosti vysokopevnostního plechu k navrhování technologie tváření plechů za tepla pro sériovou výrobu a zejména reálné možnosti jak se vodík může dostat do výlisku při výrobě. Jaké jsou reálné možnosti .
- e) Všechny tyto zkoušky byly vyvíjeny pro jakou technologii tváření za tepla (přímá metoda, nepřímá, diferencované kalení ?

f) Rozsah spoluúčasti VŠB Ostrava, TU v Pardubicích při řešení.

Téma je velice aktuální. Disertant splnil cíle uvedené v úvodu práce, nejedná se o citaci v samostatné kapitole jak je obvyklé. Výsledky jsou uvedeny v závěrech každé kapitoly a v celkovém závěru na str. 107 až 111. Výsledky mají význam pro navrhování –projektování linek pro tváření vysokopevnostních plechů za tepla. Dále pro rozvoj vědního oboru Strojírenská technologie a pro Strojírenský obor Materiálové inženýrství. Po grafické gramatické stránce je práce provedena velice pečlivě, nemá chyb.

Práce prokázala, že disertant ovládá vědecké metody práce, má hluboké teoretické znalosti a přináší nové poznatky do oboru.

Doporučuji připustit jej k obhajobě a po obhájení před komisí udělení titulu PhD.

13.9.2018



Doc. Ing. Jan Šanovec CSc.

ČVUT Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie