

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Žilina, 2024

Ing. Petra Drímalová



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Petra Drímalová

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Štúdium náchylnosti vysokopecvných konštrukčných ocelí na vodíkové skrehnutie

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Technické materiály

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej (02.09.2021-27.08.2024) forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre materiálového inžinierstva.

Predkladateľ: **Ing. Petra Drímalová**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra materiálového inžinierstva

Školiteľ: **prof. Ing. František Nový, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra materiálového inžinierstva

Oponenti:

1. **doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.**
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta materiálově-technologická
Katedra materiálového inženýrství a recyklace
17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba
2. **prof. Ing. Peter Palček, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
3. **dr hab. inż. Marek Roszak**
Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, PL – 44-100 Gliwice, Polska

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 27.8.2024 o 08:00 hod. v miestnosti BB 218 na Sjf, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenu odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Technické materiály, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Sjf, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Branislav Hadzima, PhD.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Obsah

ÚVOD	5
STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY	5
CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
METODIKA EXPERIMENTOV	8
VÝSLEDKY	8
DISKUSIA.....	15
ZÁVER.....	18
PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX	19
RESUMÉ.....	19
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	20
LITERATÚRA.....	22

ÚVOD

Bolo vyvinuté, a stále sa vyvíja, množstvo pokročilých vysokopevných konštrukčných ocelí, ktoré sú dobre tvárniteľné a majú vynikajúcu kombináciu pevnosti, ťažnosti a deformačného spevnenia. Pokročilé vysokopevné konštrukčné ocele nie sú ľahšie ako bežné ocele, ale ich vysoká pevnosť umožňuje použitie tenších plechov na zníženie hmotností vozidiel. Na rozdiel od konvenčných vysokopevných konštrukčných ocelí, ktorých medza pevnosti je približne 800 MPa niektoré pokročilé vysokopevné konštrukčné ocele dosahujú medzu pevnosti viac ako 1600 MPa [1][2][3].

Nakoľko v súčasnej dobe prax zvyšuje nároky na pevnostné vlastnosti materiálov, tak sa v čo raz vyššej miere vyžaduje aplikácia vysokopevných ocelí. Komponenty vyrobené z týchto ocelí sú v mnohých prípadoch počas ich výroby alebo prevádzky vystavené rôznym prostrediam. Práve prostredie, ktorému sú vystavené, môže pôsobiť ako zdroj vodíka. Významný vplyv na vodíkové skrehnutie má kombinácia faktorov, ako sú pevnosť materiálu, množstvo nadifundovaného vodíka a napätový stav, súvisiaci s mikroštruktúrou, geometriou súčiastky a pôsobiacim vonkajším napätím [2][4][5].

Atomárny vodík má vďaka svojej malej veľkosti schopnosť rýchlo difundovať do materiálu a to už pri izbovej teplote. Vniknutie atomárneho vodíka do ocelí môže vyvolať značný pokles ťažnosti materiálu, náchylnosť k praskaniu a tvorbe krehkých lomov už pri namáhaní pod medzou klzu. Tento jav je označovaný ako oneskorený, resp. zabrzdený lom. Vodík pri difundovaní do ocelí využíva cesty najmenšieho odporu, ktorými sú poruchy kryštálovej mriežky a predovšetkým hranice zŕn, ktoré krehnú prednostne. Vodík môže vniknúť do materiálu z kvapalného prostredia, najčastejšie po povrchových úpravách, ako sú galvanické pokovenie a morenie, alebo z plynného prostredia. Výraznú zmenu mechanických vlastností v materiáli vyvolávajú vnútorné napätia súvisiace s rekombináciou atomárneho vodíka na molekulárnu formu. So zvyšujúcou sa pevnosťou je zmena mechanických vlastností výraznejšia [6][7].

STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Prítomnosť vodíka v oceli môže spôsobiť rôzne druhy dočasných alebo trvalých zmien vlastností materiálu. Medzi tieto zmeny patria napríklad zmeny mechanických vlastností, elektrického odporu a magnetických vlastností. Z praktického hľadiska je však najdôležitejšie, že zvýšený obsah vodíka v oceliach môže viesť k degradácii materiálu. Táto degradácia sa prejavuje napríklad poklesom plasticity pri ťahovej skúške, zmenami v medzi klzu a pevnosti, zmenami mikromechanizmu porušovania a zníženou odolnosťou voči krehkému porušeniu. Najzávažnejším a najnebezpečnejším prejavom prítomnosti vodíka je však vznik trhlín, ktoré môžu spôsobiť úplnú deštrukciu konštrukcie tlakových nádob, čo môže mať vážne ľudské, ekologické a ekonomické následky [6][8][9].

Množstvo vodíka, ktoré sa dostane do materiálu, závisí od rôznych faktorov, ako sú suroviny použité pri výrobe ocele, spôsob oceľarskeho procesu, režim tepelného spracovania, použité pecné atmosféry, dokončovacie technologické operácie a prevádzkové prostredie [10].

Nebezpečenstvo vodíkoveho poškodenia je možné obmedziť rôznymi opatreniami. Patrí sem úprava prostredia, výber vhodného materiálu odolného proti navodíkovaniu, zníženie obsahu inklúzií a nečistôt v kove, odstránenie H_2S z prostredia, udržiavanie správnej prevádzkovej teploty kovových zariadení a použitie inhibítorov [10][11].

Degradačný účinok vodíka na ocele sa prejavuje tzv. vodíkovou krehkosťou. V praxi sa potvrdilo, že oceľ s vysokou pevnosťou $R_m = 1000$ MPa je veľmi náchylná na vodíkovú krehkosť. Tento jav je kritický najmä pri skrutkách, maticiach, pružných podložkách a poistných krúžkoch pre hriadele. Výskyt rekombinovaného vodíka (H_2 molekulárny stav) na defektoch, póroch, trhlinách a pod. často vedie ku krehnutiu a prasknutiu kovových materiálov [12][13]. Odolnosť ocelí voči degradačnému pôsobeniu vodíka závisí od rôznych metalurgických faktorov, hlavne od chemického zloženia ocelí, ich pevnostnej úrovne a predovšetkým od mikroštruktúrnych charakteristík. Z mikroštruktúrneho hľadiska je dôležité zohľadniť nielen typ, podiel a rozloženie základných štruktúrnych zložiek, ako sú ferit, perlit, bainit, martenzit a austenit, ale aj druh, tvar, veľkosť, množstvo a spôsob vylučovania častíc sekundárnych fáz, nekovových inklúzií a podobne. Rovnako treba brať do úvahy stav hraníc zŕn. Všetky uvedené parametre sú navzájom prepojené a nie je možné ich posudzovať samostatne [6][14][15][16].

Predložená dizertačná práca sa zaoberá štúdiom náchylnosti vysokopevnej konštrukčnej ocele S960MC na vodíkovú krehkosť vzhľadom na chemické zloženie, povrchovú úpravu a parametre prostredia, v ktorom je táto oceľ exponovaná. Odolnosť voči vodíkovej krehkosti bola hodnotená pomocou ťahových skúšok pri pomalej rýchlosti deformácie, tzv. Slow Strain Rate Test (SSRT) na vzorkách, ktoré boli vopred navodíkované a na vzorkách, ktoré boli súčasne vodíkované a mechanicky namáhané až do pretrhnutia priamo v trhacom stroji.

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je štúdium náchylnosti progresívnej vysokopevnej konštrukčnej ocele S960MC na vodíkové skrehnutie. Pre splnenie cieľa dizertačnej práce bolo potrebné realizovať nasledovné úlohy:

- experimentálne preskúmať vplyv prúdovej hustoty pri navodíkovani na zmeny mechanických vlastností ocele S960MC,
- experimentálne preskúmať vplyv typu a koncentrácie elektrolytu pri navodíkovani na zmeny mechanických vlastností ocele S960MC,
- experimentálne preskúmať vplyv synergického účinku navodíkovávania počas pôsobiaceho mechanického zaťaženia vzoriek ocele S960MC,
- experimentálne preskúmať mechanické vlastnosti materiálu bezprostredne po navodíkovani,
- realizovať fraktografickú analýzu lomových plôch s cieľom nájdania korelácie medzi meniacim sa charakterom lomu a meniacimi sa hodnotami mechanických vlastností,
- podať fyzikálno-metalurgickú interpretáciu nameraných výsledkov.

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektov APVV-20-0427 s názvom „*Nové prístupy k zvyšovaniu únavovej životnosti zvarových spojov vysokopevných konštrukčných ocelí*“ a VEGA 1/074/21 s názvom „*Zlepšovanie únavovej životnosti zvarových spojov vysokopevných konštrukčných ocelí s využitím štúdia fyzikálno-metalurgických zmien v teplom ovplyvnenej zóne*“.

METODIKA EXPERIMENTOV

Zvoleným experimentálnym materiálom bola termomechanicky valcovaná progresívna vysokopevná oceľ S960MC, ktorá bola dodaná vo forme plechu o hrúbke 3 mm pre vzorky vo východiskovom stave s vrstvou oxidov na povrchu (O) a pre vzorky po brúsení vrstvy oxidov (B), a materiál vo forme plechu o hrúbke 4 mm pre vzorky s tryskaným stavom povrchu (T). Chemické zloženie experimentálnych materiálov bolo určené pomocou optickej emisnej spektroskopie (OES).

Na metalografickú analýzu mikroštruktúry experimentálnej ocele bol použitý svetelný mikroskop Olympus IX70 (LM) a riadkovací elektrónový mikroskop JEOL 6490LV alebo QUANTA 450 FEG (SEM) v móde sekundárnych elektrónov, ktorý je vybavený EDX analyzátorom.

Na meranie tvrdosti bol použitý univerzálny tvrdomer DuraScan G5 pre meranie tvrdosti podľa Vickersa pri zaťažení od 10 g do 62,5 kg.

Vodíkovanie vzoriek bolo vykonávané elektrolytickým spôsobom vodíkovania v roztoku 0,05 M kyseliny sírovej (H_2SO_4) pri rôznych prúdových hustotách (1; 0,5 a 0,2 mA/cm²). Do roztoku bol tiež pridaný tiokyanatan draselný (KSCN) v rôznych koncentráciách. Bol použitý aj druhý roztok na vodíkovanie, ktorý bol zložený z 5 g chloridu sodného (NaCl) prípadne s prídavkom 1 g KSCN. Počas procesu vodíkovania bola vzorka zapojená ako katóda a poplatinovaná wolframová sieťka ako anóda. Celý proces vodíkovania prebiehal pri laboratórnej teplote približne 20 ± 23 °C po dobu 4 h.

Ťahové skúšobné tyče boli ihneď po vodíkovaní v trhácom stroji zaťažované relatívne pomalou rýchlosťou $v = 0,5$ mm/min, pri vzorkách, ktoré boli súčasne vodíkované a mechanicky namáhané išlo o rýchlosť $v = 0,1$ mm/min. Ťahové skúšky boli vykonané na multifunkčnom servohydraulickom skúšobnom stroji LFV 100 kN.

Po vykonaní ťahových skúšok boli lomové plochy pretrhnutých vzoriek podrobené detailnej fraktografickej analýze pomocou riadkovacieho elektrónového mikroskopu JEOL 6490LV v móde sekundárnych elektrónov (SEM-SE).

VÝSLEDKY

Mechanické vlastnosti ocele S960MC pri zmene prúdovej hustoty

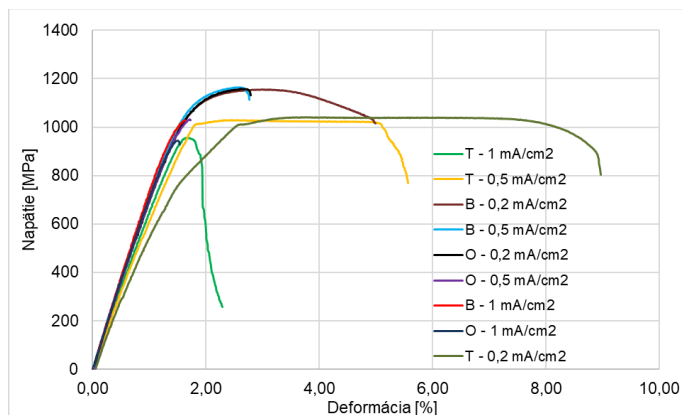
Z plochy vzoriek a požadovanej prúdovej hustoty 1 mA/cm² bol vypočítaný prúd (približne 45 ÷ 49 mA v závislosti od hrúbky vzorky). Z toho boli následne vypočítané hodnoty prúdu pre prúdovú hustotu 0,5 mA/cm² (približne 22 ÷ 25 mA) a tiež pre prúdovú hustotu 0,2 mA/cm² (okolo 9 ÷ 10 mA).

Pri prúdovej hustote 1 mA/cm² boli na vzorkách po vodíkovaní a následných ťahových skúškach zaznamenané najväčšie zmeny v mechanických vlastnostiach (Tab. 1). Vplyvom zmeny prúdovej hustoty sa výrazne menili hodnoty medze klzu a tiež pevnosti. Na vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu nebola hodnota medze klzu po vodíkovaní pri prúdovej hustote 1 mA/cm² stanovená, nakoľko vzorky skrehli natoľko,

že vykazovali obrovský rozptyl hodnôt medze klzu a pevnosti, a preto boli na vyhodnotenie použité maximálne namerané hodnoty (*). To svedčí o výraznom skrenutí materiálu. Pokles mechanických vlastností sa vo veľkej miere prejavil aj na poklese hodnoty ťažnosti pri vzorkách so všetkými tromi stavmi povrchov, pri všetkých zmenách prúdovej hustoty (Obr. 1). Vzhľadom na hodnotu indexu vodíkovej krehkosti I_{emb} , ktorý predstavuje pomernú zmenu medzi vodíkovým a nevodíkovým stavom, možno konštatovať, že najviac skrehli vzorky s vrstvou oxidov na povrchu (O) a vzorky po brúsení (B). Ako najlepšie sa z hľadiska indexu vodíkovej krehkosti javili vzorky s tryskaným stavom povrchu (T).

Tab. 1 Vplyv zmeny prúdovej hustoty pri vodíkovani na mechanické vlastnosti

Vzorka	Prúdová hustota i [mA/cm ²]	Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	Ťažnosť A_{50} [%]	Index HE I_{emb} [%]
O	1	936 ± 382*	943 ± 179*	0,25 ± 0,05	94,97 ± 1,02
	0,5	1009 ± 45	1029 ± 60	0,94 ± 0,55	80,86 ± 11,13
	0,2	1060 ± 4	1170 ± 9	2,70 ± 1,06	45,26 ± 21,52
B	1	970 ± 97	990 ± 97	1,12 ± 0,03	82,84 ± 0,40
	0,5	1070 ± 11	1149 ± 30	0,91 ± 0,30	85,98 ± 4,55
	0,2	1064 ± 3	1175 ± 13	4,21 ± 0,63	35,30 ± 9,74
T	1	969 ± 19	975 ± 27	2,20 ± 0,31	80,26 ± 2,75
	0,5	858 ± 114	1024 ± 3	3,62 ± 0,52	67,54 ± 4,70
	0,2	934 ± 86	1038 ± 3	8,26 ± 0,96	26,03 ± 8,58



Obr. 1 Diagram zmeny mechanických vlastností po ťahových skúškach pri zmene prúdovej hustoty

Mechanické vlastnosti ocele S960MC pri zmene koncentrácie KSCN v roztoku H₂SO₄

V tejto časti práce bolo poukázané na vplyv zmeny koncentrácie tiokyanatanu draselného (KSCN) na zmenu mechanických vlastností experimentálneho materiálu. Použité boli tri rôzne roztoky, a to: 0,05 M kyselina sírová (H₂SO₄) + 1 g tiokyanatanu draselného (KSCN), 0,05 M H₂SO₄ + 0,5 g KSCN a 0,05 M H₂SO₄ bez prídavku KSCN. Všetky tri merania prebiehali pri prúdovej hustote 1 mA/cm².

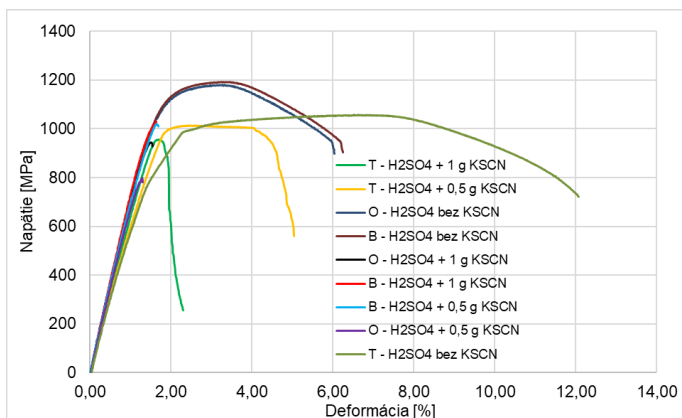
Výrazné rozdiely nastali pri najvyššej koncentrácii KSCN v roztoku (1 g), a to v hodnote medze klzu a pevnosti v ťahu hlavne pri vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu a po brúsení. Na vzorkách po tryskaní rovnako nastal pokles týchto hodnôt, avšak nie tak výrazne ako pri predošlých vzorkách (Tab.2). Pokles ťažnosti sa však prejavil významne na vzorkách so všetkými tromi stavmi povrchu pri koncentrácii KSCN 1 g aj 0,5 g v roztoku 0,05 M H₂SO₄ (Obr. 2).

Mechanické vlastnosti ocele po vodíkovani v roztoku 0,05 m H₂SO₄, v ktorom KSCN nebol pridaný, nevykazovali známky skrehnutia. Nebol zaznamenaný ani pokles ťažnosti, a to pre vzorky so všetkými tromi stavmi povrchov. Potvrdzujú to aj vypočítané hodnoty indexu vodíkovej krehkosti, ktoré sú veľmi nízke, dokonca pri vzorkách s východiskovým a tryskaným stavom povrchu sú tieto hodnoty záporné. Záporné hodnoty indexu vodíkovej krehkosti sú do 5 % ovplyvnené tým, že sa porovnávajú priemerné hodnoty nameranej ťažnosti vzoriek bez vodíkovaní a po vodíkovani, čo predstavuje pomerne veľký rozptyl hodnôt.

Týmto experimentom bolo dokázané, že prítomnosť KSCN v roztoku zohráva pri vodíkovani dôležitú úlohu. Vzorky, ktoré boli počas vodíkovaní vystavené roztoku s vyššou koncentráciou KSCN vykazovali výraznejší pokles mechanických vlastností a s tým súvisiace výraznejšie skrehnutie materiálu v porovnaní so vzorkami, ktoré boli vystavené roztoku s nižším alebo žiadnym prídavkom KSCN.

Tab. 2 Vplyv zmeny koncentrácie KSCN v roztoku 0,05M H₂SO₄ pri vodíkovani na mechanické vlastnosti

Vzorka	Množstvo KSCN [g]	Dohovorená medza klzu R _{p0,2} [MPa]	Pevnosť v ťahu R _m [MPa]	Ťažnosť A ₅₀ [%]	Index HE I _{emb} [%]
O	1	936 ± 382*	943 ± 179*	0,25 ± 0,05	94,97 ± 1,02
	0,5	736 ± 319*	796 ± 56*	0,40 ± 0,24	91,97 ± 4,77
	0	1038 ± 16	1149 ± 32	5,02 ± 0,23	-1,82 ± 4,74
B	1	970 ± 97	990 ± 97	1,12 ± 0,03	82,84 ± 0,40
	0,5	1007 ± 33	1020 ± 38	1,24 ± 0,19	80,87 ± 2,88
	0	1065 ± 7	1190 ± 3	5,27 ± 0,28	18,91 ± 4,34
T	1	969 ± 19	975 ± 27	2,20 ± 0,31	80,26 ± 2,75
	0,5	985 ± 4	1003 ± 9	2,63 ± 1,13	76,46 ± 10,11
	0	798 ± 31	1053 ± 3	11,56 ± 0,70	-3,55 ± 6,29



Obr. 2 Diagram zmeny mechanických vlastností po ťahových skúškach pri zmene koncentrácie KSCN v roztoku H_2SO_4

Mechanické vlastnosti ocele S960MC pri zmene koncentrácie KSCN v roztoku NaCl

V nasledujúcej časti experimentálnych výsledkov bolo poukázané na vplyv prítomnosti tiokyanatanu draselného (KSCN) na zmenu mechanických vlastností experimentálneho materiálu v roztoku 5 g chloridu sodného (NaCl). Použité boli dva rôzne roztoky a to: 5 g NaCl + 1 g KSCN a 5 g NaCl bez prídavku KSCN.

Z nameraných a vypočítaných hodnôt možno konštatovať, že prvý zvolený roztok nemal žiaden vplyv na vodíkovú krehkosť (Tab. 3). Hodnota medze klzu dokonca narástla pri vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu a s tryskaným stavom povrchu v porovnaní s nevodíkovými stavmi. Vzorka s brúseným stavom povrchu mala približne rovnakú hodnotu medze klzu ako nevodíkováné vzorky s rovnakým stavom povrchu. Na pevnosti v ťahu sa prejavil jemný pokles hodnôt pri všetkých vzorkách so všetkými tromi stavmi povrchu. Na ťažnosti sa prejavil jemný nárast pri vzorke s vrstvou oxidov na povrchu. Naopak pri vzorkách s brúseným a tryskaným stavom povrchu ťažnosť mierne klesla (Obr. 3).

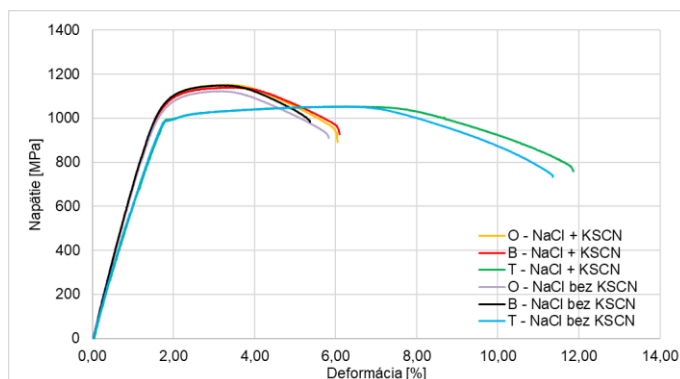
Pri druhom zvolenom roztoku sa medza klzu zvýšila pri vzorkách so všetkými tromi stavmi povrchu v porovnaní s nevodíkovými stavmi. Naopak medza pevnosti jemne klesla pri vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu a s tryskaným stavom povrchu a narástla pri vzorkách s brúseným stavom povrchu. Ťažnosť narástla pri vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu a klesla pri vzorkách s brúseným a tryskaným stavom povrchu.

Rovnako z vypočítaných hodnôt indexu vodíkovej krehkosti možno konštatovať, že ku skrehnutiu ocele nedošlo, nakoľko sú tieto hodnoty tiež veľmi nízke, a rovnako ako pri predošlom experimente dosahujú aj záporné hodnoty.

Celkovo možno konštatovať, že použitý experimentálny roztok, ktorý bol zložený z 5 g NaCl s prídavkom 1 g KSCN alebo bez prídavku KSCN, nemal vplyv na vodíkovú krehkosť materiálu.

Tab. 3 Vplyv zmeny koncentrácie KSCN v roztoku 5 g NaCl pri vodíkovani na mechanické vlastnosti

Vzorka	Množstvo KSCN [g]	Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	Ťažnosť A_{50} [%]	Index HE I_{emb} [%]
O	1	1037 ± 10	1139 ± 13	5,26 ± 0,47	-6,57 ± 9,49
	0	1029 ± 14	1129 ± 6	5,12 ± 0,59	-3,89 ± 11,92
B	1	1038 ± 4	1139 ± 3	5,13 ± 0,34	21,13 ± 5,26
	0	1045 ± 3	1157 ± 9	5,39 ± 0,66	17,16 ± 10,15
T	1	996 ± 1	1056 ± 1	10,77 ± 0,15	3,55 ± 1,34
	0	972 ± 14	1049 ± 3	11,15 ± 0,96	0,16 ± 8,60



Obr. 3 Diagram zmeny mechanických vlastností po ťahových skúškach pri zmene koncentrácie KSCN v roztoku NaCl

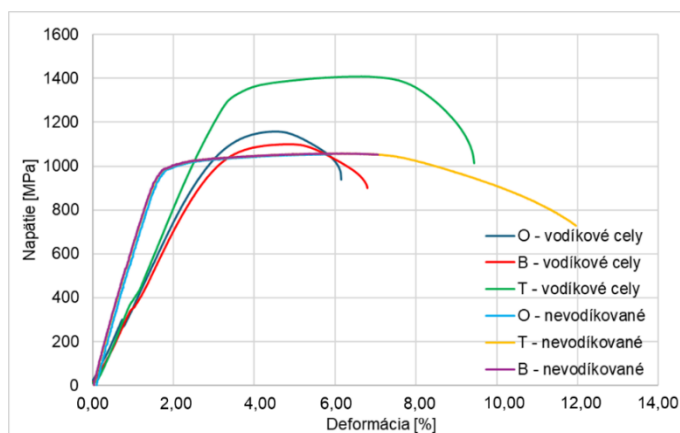
Mechanické vlastnosti ocele S960MC pri vodíkovani a súčasnom ťahovom namáhaní

Cieľom tohto merania bolo zistiť, ako sa budú meniť mechanické vlastnosti experimentálneho materiálu pri vodíkovani a súčasnom ťahovom namáhaní. Bolo zistené, že došlo k poklesu hodnôt medze klzu pre všetky tri typy vzoriek v porovnaní s nevodíkovými stavmi, pričom najmenší pokles bol zaznamenaný pre vzorky s vrstvou oxidov na povrchu (Tab. 4). Naopak pevnosť v ťahu sa zvýšila oproti nevodíkovým stavom pri vzorkách so všetkými tromi stavmi povrchov. Pri ťažnosti sa prejavil len mierny nárast pri vzorke s vrstvou oxidov na povrchu. Pri vzorkách s brúseným a tryskaným povrchom bola hodnota ťažnosti mierne nižšia v porovnaní s nevodíkovými stavmi (Obr. 4).

Z hodnôt indexu vodíkovej krehkosti pre všetky tri študované povrchy vzoriek, je zrejmé, že výrazné skrehnutie vplyvom vodíka v tomto prípade nenastalo.

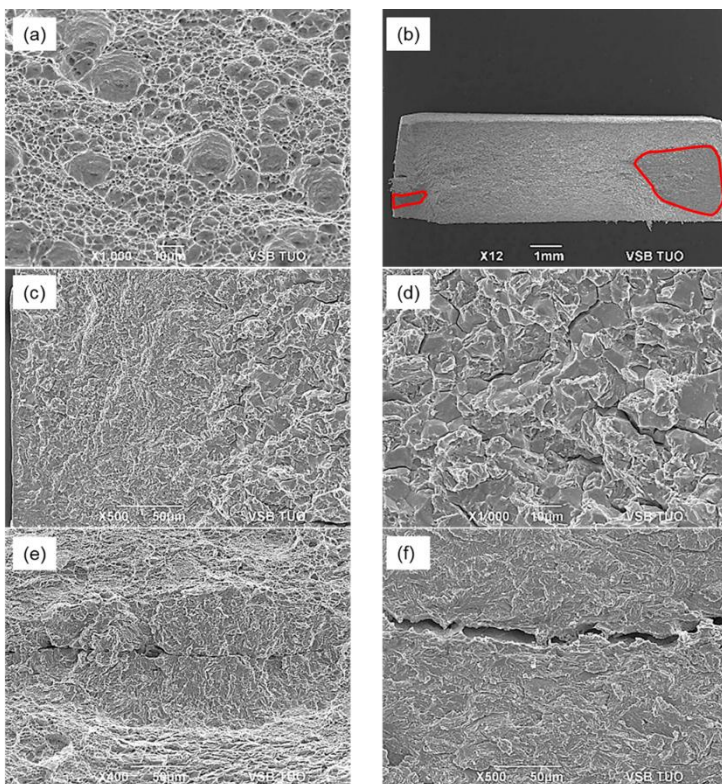
Tab. 4 Mechanické vlastnosti ocele S960MC s tromi stavmi povrchu pri vodíkovanií a súčasnom mechanickom namáhaní

Vzorka	Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	Ťažnosť A_{50} [%]	Index HE I_{emb} [%]
O	963 ± 37	1139 ± 5	4,98 ± 0,14	-0,97 ± 2,89
B	991 ± 53	1145 ± 6	5,81 ± 0,21	10,70 ± 3,30
T	908 ± 61	1039 ± 4	9,20 ± 0,81	17,57 ± 7,21



Obr. 4 Diagram zmeny mechanických vlastností po ťahových skúškach pri súčasnom vodíkovanií

Skrehnutie materiálov vplyvom vodíka sa prejavilo aj na charaktere lomov, ktoré vznikli po ťahových skúškach. Lomová plocha pri vzorkách, ktoré boli pretrhnuté v stave bez vodíkovania mala charakter tvárneho lomu s typickou jamkovou morfológiou (Obr. 5 (a)). Skrehnutie materiálov vplyvom vodíka bolo možné pozorovať už z náhľadových fotiek, kde jasne vidieť výrazne skrehnuté oblasti (Obr. 5 (b)). Lomové plochy mali v týchto skrehnutých oblastiach charakter prevažne transkrystalického kvázištiepneho lomu. Vyskytoval sa však aj interkrystalický lom, ktorý naznačuje výrazne skrehnutie experimentálneho materiálu (Obr. 5 (c,d)). Rovnako sa skrehnutie vplyvom vodíka prejavilo výskytom rybích očí v oblastiach okolo inklúzií (Obr. 5 (e)). Výskyt rybích očí je tiež typickým prejavom skrehnutia materiálu vplyvom vodíka. Vodíkové skrehnutie sa tiež vyskytovalo aj v oblastiach segregáčnych pásov, kde vznikali veľké trhliny (Obr. 5 (e,f)). Tieto oblasti vykazovali prevažne kvázištiepny lom.



Obr. 5 Fraktografická analýza vzniknutých lomových plôch, (a) nevodíkováný stav, tvárny lom s jamkovou morfológiou, (b) náhľad skrehnutých oblastí (červené orámovanie) na lomovej ploche vzorky po vodíkovani, (c) lokálny prechod medzi interkryštalickým lomom a kvázištiepnym lomom, (d) detail interkryštalického lomu, (e) výskyt rybieh očí okolo inklúzií v skrehnutej oblasti segregačného pásu, (f) kvázištiepny lom v oblasti trhliny na segregačnom pásu

DISKUSIA

Výsledky experimentálnej štúdie odolnosti vysokopevných koňštrukčných ocelí voči vodíkovému skrehnutiu poukazujú na významné vplyvy rôznych parametrov vodíkovania na mechanické vlastnosti týchto materiálov (Obr. 6-8).

Je zrejme, že prúdová hustota má významný vplyv na mieru vodíkového skrehnutia ocelí, o čom sa presvedčili vo svojom výskume aj Váňová a kolektív [17], ktorí tiež zaznamenali pokles mechanických vlastností v súvislosti so zvyšujúcou sa prúdovou hustotou. Najvýraznejší pokles bol v našom výskume zaznamenaný pri prúdovej hustote 1 mA/cm^2 , a to hlavne pri vzorkách s vrstvou oxidov na povrchu, čo naznačuje ich vyššiu náchylnosť na krehnutie vplyvom vodíka. Naopak, vzorky s tryskaným povrchom vykazovali relatívne lepšie mechanické vlastnosti a nižší index vodíkovej krehkosti, čo naznačuje ich vyššiu odolnosť voči vodíkovému skrehnutiu. Pri nižších prúdových hustotách ($0,5 \text{ mA/cm}^2$ a $0,2 \text{ mA/cm}^2$) boli zaznamenané menej výrazné zmeny mechanických vlastností. V porovnaní so vzorkami, ktoré boli vodíkované pri najvyššej prúdovej hustote, nastal pri nižších prúdových hustotách nárast hodnôt mechanických vlastností a zároveň klesala hodnota indexu vodíkovej krehkosti. Tieto výsledky naznačujú, že nižšie prúdové hustoty vedú k menšiemu množstvu absorbovaného vodíka, čo následne znižuje mieru vodíkového skrehnutia.

Bolo tiež zistené, že významný vplyv na vodíkové skrehnutie má aj koncentrácia KSCN v roztoku $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Pri najvyššej koncentrácii KSCN v roztoku nastal najvýraznejší pokles mechanických vlastností. V porovnaní s nevodíkovými vzorkami došlo k značnému poklesu medze klzu a pevnosti v ťahu, najmä pri vzorkách s oxidovou vrstvou a po brúsení. Na vzorkách po tryskaní bol pokles týchto hodnôt menej výrazný. Významný pokles ťažnosti bol zaznamenaný pri všetkých troch typoch povrchov, čo naznačuje silný vplyv vodíkového skrehnutia na mechanické vlastnosti materiálu. Pri použití roztoku $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0,5 \text{ g KSCN}$ skrehnutie materiálu spôsobené vodíkom bolo opäť najvýraznejšie pri vzorkách s oxidovou vrstvou. Na vzorkách po brúsení a tryskaní sa hodnoty medze klzu a pevnosti v ťahu zvýšili v porovnaní s predošlým meraním v roztoku $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 1 \text{ g KSCN}$. Zaznamenali sme tiež mierne zvýšenie hodnôt ťažnosti pri všetkých troch typoch povrchov, čo naznačuje, že vodíkové skrehnutie bolo menej výrazné ako pri vyššej koncentrácii KSCN. Potvrzuje to aj mierny pokles hodnôt indexu vodíkovej krehkosti, hoci tieto hodnoty zostali stále vysoké. Pri použití roztoku $0,05 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ bez prídavku KSCN sme zaznamenali zvýšenie hodnôt medze klzu pri vzorkách s oxidovou vrstvou a po brúsení. Pri tryskaných vzorkách došlo k poklesu medze klzu oproti nevodíkovým vzorkám. Malý pokles medze pevnosti bol zaznamenaný pri vzorkách s oxidovou vrstvou a po tryskaní, zatiaľ čo pri brúsených vzorkách hodnota medze pevnosti narástla. Hodnota ťažnosti vzrástla pri vzorkách s oxidovou vrstvou a tryskaných vzorkách, zatiaľ čo pri brúsených vzorkách jemne poklesla v porovnaní s nevodíkovými stavmi.

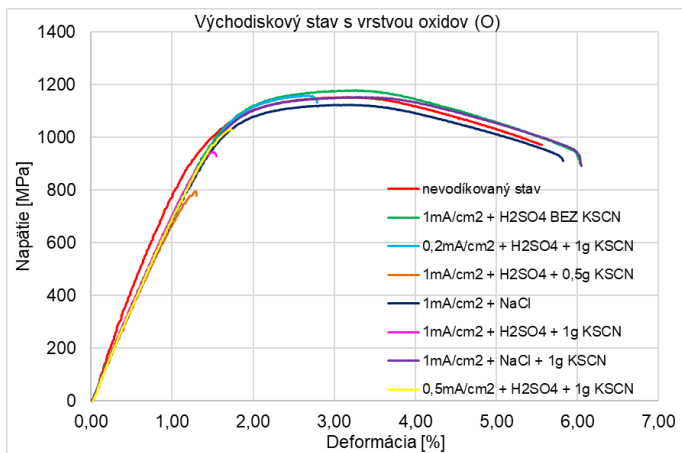
Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že pre vodíkové skrehnutie vysokopevných konštrukčných ocelí sú kľúčové dva faktory, ktorými sú koncentrácia KSCN a výška prúdovej hustoty počas vodíkovania. Tieto závery sú podporené aj výskumami, ktoré vykonali Djukic a kol. [18], Kromm a kol. [19], a tiež Li a kol. [20], ktorí dospeli k podobným výsledkom. Až za týmito dvomi kľúčovými faktormi nasleduje vplyv povrchových úprav. Z hľadiska indexu vodíkovej krehkosti, počítaného z ťažnosti, najnižšiu náchylnosť na vodíkové skrehnutie vykazujú vzorky s tryskaným povrchom, čo naznačuje, že povrchová úprava hrá dôležitú úlohu v zlepšení odolnosti voči tejto forme degradácie. Pre aplikácie, kde je nevyhnutné minimalizovať vodíkové skrehnutie, sa prednostne odporúča používanie tryskaných povrchov.

Na základe získaných výsledkov možno konštatovať, že ani prítomnosť, ani neprítomnosť KSCN v roztoku 5 g NaCl nemá signifikantný vplyv na vodíkovú krehkosť testovaného materiálu. Mechanické vlastnosti, ako sú medza klzu, pevnosť v ťahu a ťažnosť, zostávajú relatívne stabilné bez výrazných zmien, ktoré by naznačovali zvýšenú krehkosť vplyvom vodíka. Fraktografické analýzy podporujú tieto závery, keďže žiadne vzorky nevykazovali indikácie krehkosti spôsobenej vodíkom. Tieto výsledky poskytujú dôležité poznatky pre aplikácie, kde môže byť prítomnosť KSCN alebo iných podobných látok v roztoku potenciálne riziková, a naznačujú, že v týchto podmienkach je pri použití roztoku NaCl riziko vodíkovej krehkosti minimálne.

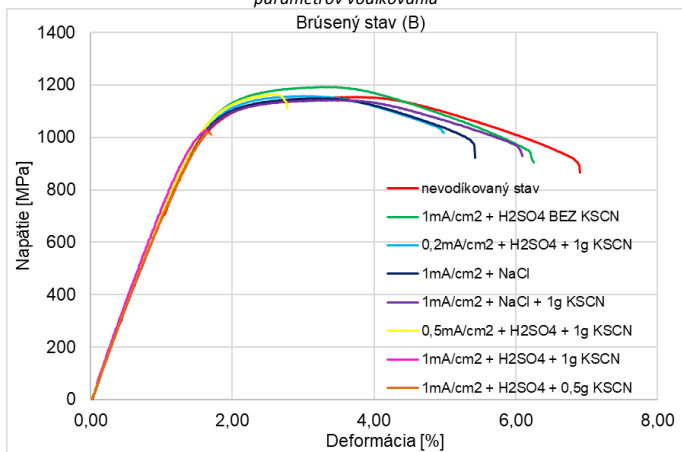
Experimenty vodíkovania pri súčasnom mechanickom namáhaní ukázali, že elektrolytické vodíkovanie v roztoku 0,05 M H₂SO₄ s 1 g KSCN na 1 liter destilovanej vody pri prúdovej hustote 1 mA/cm² má vplyv na mechanické vlastnosti ocele. Pozorovaný pokles medze klzu pre všetky tri povrchové stavy (O - s vrstvou vysokoteplotných oxidov, B - brúsený, T - tryskaný) v porovnaní s nevodíkovými vzorkami poukazuje na oslabovanie štruktúry materiálu vodíkom. Najmenší pokles medze klzu bol zaznamenaný pre vzorky s vrstvou vysokoteplotných oxidov. Na druhej strane, pevnosť v ťahu sa zvýšila pri všetkých stavoch povrchov (Tab. 4.10). Tento paradoxný výsledok môže byť vysvetlený zvýšenou mobilitou dislokácií spôsobenou prítomnosťou vodíka, čo vedie k lokálnym zmenám v mikroštruktúre, ktoré môžu dočasne zlepšiť pevnostné vlastnosti. Ťažnosť vykazovala mierny nárast pri vzorkách s vrstvou vysokoteplotných oxidov, ale poklesla pri brúsených a tryskaných vzorkách. Tento jav naznačuje, že povrchový stav významne ovplyvňuje distribúciu a efekt vodíka v materiáli.

Jedným z ďalších kľúčových faktorov, ktoré ovplyvnili výsledky experimentálneho nasycovania vodíkom pri súčasnom mechanickom namáhaní, bola zrejme dĺžka expozície vzoriek vo vodíkovom prostredí. Skutočnosť, že vodíková krehkosť bola obmedzená na povrchové vrstvy, naznačuje, že vodík nemal dostatok času na preniknutie do hĺbky materiálu. K podobným výsledkom dospela aj Váňová vo svojej habilitačnej práci [21], pričom jej experimenty prebiehali na oceliach TRIP, avšak podobne ako v našom prípade, vodík kvôli krátkemu času expozície vzorky vo

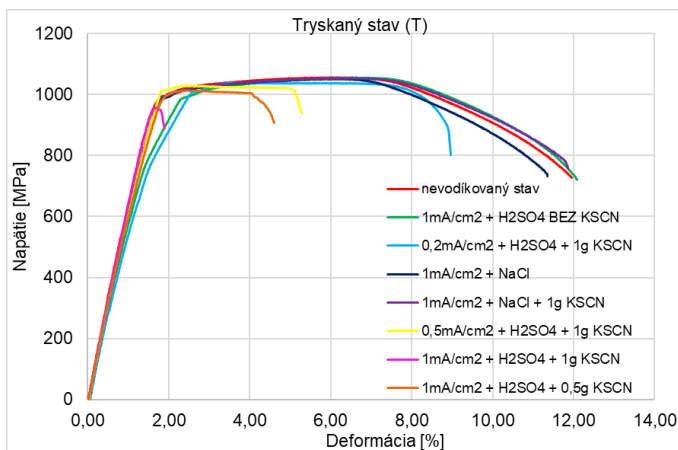
vodíkovom prostredí nestihol difundovať hlbšie do materiálu a spôsobiť výraznejšie skrehnutie. To je podporené rýchlosťou deformácie (10^{-5} s^{-1}), ktorá bola zvolená práve na zabezpečenie dostatočnej doby na prenikanie vodíka. Napriek tomu sa ukazuje, že táto doba nebola postačujúca pre úplnú saturáciu materiálu vodíkom a v budúcnosti by bolo vhodné výskum doplniť ešte o experimenty robené pri oveľa nižších rýchlostiach deformácie.



Obr. 6 Priebehy ťahových skúšok vzoriek s oxidovou vrstvou na povrchu (O) pri všetkých zmenách parametrov vodíkovania



Obr. 7 Priebehy ťahových skúšok vzoriek s brúseným povrchom (B) pri všetkých zmenách parametrov vodíkovania



Obr. 8 Priebehy ťahových skúšok vzoriek s tryskaným povrchom (T) pri všetkých zmenách parametrov vodíkovania

ZÁVER

Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce poukazujú na dva kľúčové faktory, ktoré sú významné pre vodíkové skrehnutie vysokopevných konštrukčných ocelí, a to výšku prúdovej hustoty počas procesu vodíkovania a tiež prítomnosť KSCN v roztoku, ktorý pôsobí ako zdroj vodíka. Ďalšími faktormi, ktoré vplyvajú na mieru vodíkového skrehnutia materiálov sú chemické zloženie použitých elektrolytov a povrchová úprava skúšobných vzoriek. Z hľadiska indexu vodíkovej krehkosti, ktorý bol počítaný pri všetkých zmenách parametrov vyplýva, že ako najviac náchylné sa javili vzorky s kompaktnou vrstvou oxidov na povrchu, ktoré boli používané v stave (okujenom) takom, akom bol plech dodaný od výrobcu. Plechy s okujeným povrchom sa preto pri expozíciách v prostrediach obsahujúcich atomárny vodík správajú z hľadiska rizika vodíkového skrehnutia oveľa nepredvídateľnejšie ako plechy s mechanicky upraveným povrchom.

To znamená, že akákoľvek mechanická úprava povrchu, ktorá aspoň čiastočne (tryskanie) alebo úplne (brúsenie) odstráni povrchovú vrstvu vysokoteplotných oxidov, ktorá vznikla pri výrobe plechu, zvýši odolnosť materiálu proti vodíkovému skrehnutiu a umožní aspoň čiastočne predvídať správanie sa materiálu v prostrediach obsahujúcich atomárny vodík.

PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRE PRAX

Jedným z kľúčových výsledkov výskumu je, že povrchová úprava ocelí výrazne ovplyvňuje ich mechanické vlastnosti a odolnosť voči vodíkovému skrehnutiu. Ocele s vrstvou vysokoteplotných oxidov, ktoré na povrchu vznikli počas výroby plechu vykazovali vyššiu náchylnosť na vodíkové skrehnutie, čo môže byť kritické pre bezpečnosť a spoľahlivosť ocelových konštrukcií. Na druhej strane, tryskané alebo brúsené povrchy vykazovali lepšiu odolnosť voči vodíkovému skrehnutiu.

Ďalší zásadný prínos je zistenie, že veľký vplyv na vodíkové skrehnutie skúmanej ocele má aj veľkosť prúdovej hustoty, ktorá bola použitá počas vodíkovanania vzoriek. Rovnako tak má na vodíkovú krehkosť vplyv aj zloženie použitého elektrolytu, ktorý pôsobí ako zdroj vodíka.

Výsledky poukazujú na dôležitosť povrchovej úpravy a podmienok vodíkovanania pri hodnotení odolnosti voči vodíkovému skrehnutiu vysokopevných konštrukčných ocelí. Tieto zistenia môžu byť aplikované pri výrobe, prevádzke a údržbe ocelových konštrukcií vyrobených z vysokopevných konštrukčných ocelí, aby sa minimalizovali riziká spojené s vodíkovým skrehnutím a zabezpečila dlhodobá spoľahlivosť konštrukčných prvkov.

RESUMÉ

The results obtained in this dissertation point to two key factors that are significant for the hydrogen embrittlement of high-strength structural steels, namely the amount of current density during the hydrogenation process and also the presence of KSCN in solution, which acts as a source of hydrogen. Other factors that influence the degree of hydrogen embrittlement of the materials are the chemical composition of the electrolytes used and the surface treatment of the test specimens. In terms of the hydrogen embrittlement index, which was calculated for all parameter changes, it appears that the samples with a compact oxide layer on the surface, which were used in the condition (tainted) as the sheet was supplied by the manufacturer, were the most susceptible. Sheets with a scaled surface therefore behave much more unpredictably in terms of the risk of hydrogen embrittlement than sheets with a mechanically treated surface when exposed to environments containing atomic hydrogen.

This means that any mechanical surface treatment that at least partially (blasting) or completely (grinding) removes the surface layer of high-temperature oxides that has been formed in the manufacture of the sheet will increase the resistance of the material to hydrogen embrittlement and allow at least partial prediction of the behaviour of the material in environments containing atomic hydrogen.

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

Skupina C – Publikácie v časopisoch, ktoré nie sú karentované, ale sú registrované v databázach WoS alebo SCOPUS

MEDVECKÁ, D., NOVÝ, F., ŠTALMACH, O., **DRÍMALOVÁ, P.**, 2023. Application of a high-speed infrared thermographic camera to the study of HAZ softening in S960 welded joints. *Materials Today: Proceedings* Vol 93, No. 4, pp. 748-751. ISSN 2214-7853

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., MEDVECKÁ, D., VÁŇOVÁ, P., 2023. The Influence of Hydrogen Embrittlement on Mechanical Properties of Advanced High-Strength Structural Steel S960MC. *Materials Research Proceedings* Vol. 34, pp. 62-67. DOI: 10.21741/9781644902691-8

CHVALNÍKOVÁ, V., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., SLEZÁK, M., ŠIKYŇA, L., **DRÍMALOVÁ, P.**, 2023. Austenitic Steel AISI 304 under Static and Cyclic Loading. *Manufacturing Technology* Vol. 23, No. 5. ISSN 2787-9402

SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., CHVALNÍKOVÁ, V., **DRÍMALOVÁ, P.**, ŠIKYŇA, L., 2023. Effect of Plasma Nitriding and Sensitization on the Microstructure and Microhardness of AISI 304 Austenitic Steel. *Manufacturing Technology* Vol. 23, No. 6. ISSN 2787-9402

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., **DRÍMALOVÁ, P.**, SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., CHVALNÍKOVÁ, V., 2023. Hydrogen Embrittlement of 11SMn30 Free-cutting Steel. *Manufacturing Technology* Vol. 23, No. 6. ISSN 2787-9402

NOVÝ, F., MEDVECKÁ, D., TRŠKO, L., BOKŮVKA, O., **DRÍMALOVÁ, P.**, 2023. Effect of Welding Methods on Mechanical Properties of Domex 700MC Steel. *Materials Research Proceedings* Vol. 34, pp. 1-5.

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., UHRÍČIK, M., VÁŇOVÁ, P., ŠIKYŇA, L., CHVALNÍKOVÁ, V., SLEZÁK, M., 2024. Effect of Change in Current Density on Hydrogen Embrittlement of Advanced High-Strength Steel S960MC during Hydrogenation. *Manufacturing Technology* Vol. 24, No. 1. ISSN 1213-2489

Skupina D – Ostatné publikácie

AFC – Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., MEDVECKA, D., VÁŇOVÁ, P., KONČNÁ, K., 2023. Effect of potassium thiocyanate on hydrogen embrittlement of advanced high-strength steel S960MC. 38th International Colloquium: Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, pp. 123-126. ISBN 978-963-9058-48-4

UHRÍČIK, M., PALČEK, P., BELAN, J., PASTIEROVIČOVÁ, L., ŠURDOVÁ, Z., MIKOLAJČÍK, M., **DRÍMALOVÁ, P.**, SLEZÁK, M., 2023. The effect of Heat Treatment on The Nitriding Layer on Austenitic Steel AISI304. 38th International Colloquium: Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, pp. 123-126. ISBN 978-

AFD – Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

DRÍMALOVÁ, P., ZATKALÍKOVÁ, V., NOVÝ, F., 2022. *Influence of sensitization of aisi 304 stainless steel on its resistance against pitting corrosion*. 37th International Colloquium: Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, pp. 32-37. ISBN 978-80-554-1975-9.

UHŘÍČÍK, M., PALČEK, P., CHALUPOVÁ, M., SAPIETA, M., **DRÍMALOVÁ, P.**, OBERTO VÁ, V., 2022. *The stress and deformation analysis of stainless steel during three-point bending cyclic loading*. 37th International Colloquium: Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, pp. 147-151. ISBN 978-80-554-1975-9.

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., MEDVEČKÁ, D., VÁŇOVÁ, P., 2023. *Vplyv vodíka na mechanické vlastnosti progresívnej vysokopevnej ocele S960MC*. 26th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-1947-3.

VICEN, M., **DRÍMALOVÁ, P.**, BOKŮVKA, O., NOVÝ, F., MEDVEČKÁ, D., 2023. *Tribological properties of thin coatings*. 26th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-1947-3.

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., UHŘÍČÍK, M., VÁŇOVÁ, P., ŠIKYŇA, L., CHVALNÍKOVÁ, V., SLEZÁK, M., 2024. *Vplyv prúdovej hustoty na vodíkovú krehkosť progresívnej vysokopevnej ocele S960MC*. 27th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-2076-9

CHVALNÍKOVÁ, V., UHŘÍČÍK, M., PALČEK, P., SLEZÁK, M., ŠIKYŇA, L., **DRÍMALOVÁ, P.**, ŠURDOVÁ, Z., 2024. *Statické a cyklické zaťažovanie austenitickej ocele AISI 304*. 27th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-2076-9

SLEZÁK, M., UHŘÍČÍK, M., PALČEK, P., CHVALNÍKOVÁ, V., **DRÍMALOVÁ, P.**, ŠIKYŇA, L., 2024. *Vplyv plazmovej nitridácie a scitlivenia na mikroštruktúru a mikrotvrdosť austenitickej ocele AISI 304*. 27th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-2076-9

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., **DRÍMALOVÁ, P.**, CHVALNÍKOVÁ, V., SLEZÁK, M., UHŘÍČÍK, M., 2024. *Vodíková krehkosť feritickej ocele 1.4104*. 27th International Seminar of Ph.D. Students. ISBN 978-80-554-2076-9

LITERATÚRA

- [1] DEMERI, M., Y., 2013. Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications. ASM International. ISBN 978-1-62708-005-7
- [2] LOVICU, G., BOTTAZZI, M., D'AIUTO, F., DE SANCTIS, M., DIMATTEO, A., SANTUS, C., VALENTINI, R., 2012. Hydrogen Embrittlement of Automotive Advanced High-Strength Steels. In: Metallurgical and Materials Transactions A 42 (11), pp. 4075-4087. DOI: 10.1007/s11661-012-1280-8
- [3] MORAVEC, J., MIČIAN, M., MÁLEK, M., ŠVEC, M., 2022. Determination of CCT Diagram by Dilatometry Analysis of High-Strength Low-Alloy S960MC Steel. In: Materials 15 (12), pp. 4637. DOI: 10.3390/ma15134637
- [4] ZHAO, J., JIANG, Z., 2018. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. In: Progress in Materials Science 94, pp. 174-242. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.01.006
- [5] ŚLĘZAK, T., ŚNIEŻEK, L., 2015. A Comparative LCF Study of S960QL High Strength Steel and S355J2 Mild Steel. In: Procedia Engineering 114, pp. 78-85. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.044
- [6] SOJKA, J., 2007. Odolnost ocelí voči vodíkovej krehkosti. VŠB–Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1648-7
- [7] BERGMANN, C., 2020. Hydrogen embrittlement resistance evaluation of advanced high strength steel grades in automotive applications. PhD Thesis. Dissertation, Bochum, Ruhr-Universität Bochum. [Cit. 05.01.2024]
- [8] JIANG, D. A., CARTER, E. A., 2004. Diffusion of interstitial hydrogen into and through bcc Fe from first principles. In: Physical Review B 70 (6). DOI: 10.1103/PhysRevB.70.064102
- [9] NAGUMO, M., 2016. Fundamentals of Hydrogen Embrittlement. Springer Singapore. ISBN 978-981-10-0160-4
- [10] NANNINGA, N. E., LEVY, Y. S., DREXLER, E. S., CONDON, R. T., STEVENSON, A. E., SLIFKA, A. J., 2012. Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments. In: Corrosion Science 59, pp. 1-9. ISSN 0010-938X
- [11] HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R., ČAPLOVIČ, L., 2010. Degradáčny procesy a predikcia životnosti materiálov. Vydavateľstvo STU. ISBN 978-80-227-3334-2
- [12] MCGUIRE, M. F., MATWAY, R. J., 2022. A Mechanism for Hydrogen Embrittlement in Martensitic Steel Based on Hydrogen Dilatation. Preprint

- [13] SCHAUPP, T., ERNST, W., SPINDLER, H., KANNENGIESSER, T., 2020. Hydrogen-assisted cracking of GMA welded 960 MPa grade high-strength steels. In: International journal of hydrogen energy 45 (38), pp. 20080-20093. ISSN 0360-3199
- [14] ENNIS, B. L., JIMENEZ-MELERO, E., MOSTERT, R., SANTILLANA, B., LEE, P. D., 2016. The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel. In: Acta Materialia 115, pp. 132-142. ISSN 1359-6454
- [15] TSAY, L. W., CHI, M. Y., WU, Y. F., WU, J. K., LIN, D. Y., 2006. Hydrogen embrittlement susceptibility and permeability of two ultra-high strength steels. In: Corrosion science 48 (8), pp. 1926-1938. ISSN 0010-7058
- [16] ZHANG, B., ZHU, Q., XU, CH., LI, CH., MA, Y., 2022. Atomic-scale insights on hydrogen trapping and exclusion at incoherent interfaces of nanoprecipitates in martensitic steels. In: Nature communications 13 (1), p. 3858. ISSN 0223-1665
- [17] VÁŇOVÁ, P., SOJKA, J., KULOVÁ, T., HORSKÝ, P., KONEČNÁ, K., MATÝSEK, D., 2018. The effect of hydrogen and deformation on the mechanical properties of TRIP 780 steel. In: Metal. Brno.
- [18] DJUKIC, M. B., ZERAVCIC, V. S., BAKIC, G., SEDMAK, A., RAJICIC, B., 2014. Hydrogen embrittlement of low carbon structural steel. In: Procedia Materials Science, 3, pp. 1167-1172.
- [19] KANNENGIESSER, T., BABU, S. S., KOMIZO, Y., RAMIREZ, A. J., KROMM, A., STEPPAN, E., KANNENGIESSER, T., 2014. High-Energy Synchrotron Study of the Stress-Strain Behavior of Hydrogen-Charged High Strength Structural Steel. In: In-situ Studies with Photons, Neutrons and Electrons Scattering II. Springer International Publishing. ISSN 978-3-319-06144-3
- [20] LI, X., WANG, Y., ZHANG, P., LI, B., SONG, X., CHEN, J., 2014. Effect of pre-strain on hydrogen embrittlement of high strength steels. In: Materials Science and Engineering: A, 616, pp. 116-122.
- [21] VÁŇOVÁ, P., 2019. Vodíková křehkost a difúzní charakteristiky vodíku v ocelích TRIP. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. [Cit. 03.02.2024]