Elektrochemické korózne charakteristiky vysokopevnej ocele Domex 700 po mechanických úpravách povrchu v prostredí chloridov

Electrochemical corrosion characteristics of high strength low alloy Domex 700 steel after mechanical surface treatment in chloride environment

Borko K.¹, Pastorek F.², Hadzima B.^{1,2}

¹ Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva

² Žilinská univerzita v Žiline, Výskumné centrum Žilinskej univerzity

E-mail: kamil.borko@fstroj.uniza.sk

V súčasnosti sa v priemyselnej praxi využíva veľké množstvo mechanických úprav povrchov konštrukčných materiálov, predovšetkým úprava povrchu ocelí. Účelom tejto štúdie (výskumu) bolo vyhodnotenie vplyvov mechanickej predúpravy povrchu (brúsením a tryskaním) na koróznú odolnosť vysokopevnej nízkolegovanej ocele Domex 700. Vhodná mechanická povrchová predúprava môže slúžiť pre zrovnomenenie povrchu (napr. brúsenie) alebo pre zlepšenie mechanických, pevnostných a únavových vlastností (tryskanie). Ako testovacie prostredie pre elektrochemické testy bol zvolený roztok 0,1M NaCl o teplote okolitého prostredia. Hodnotenie vplyvu mechanickej úpravy povrchu ocele Domex 700 na jej koróznú odolnosť bolo vyhodnotené prostredníctvom elektrochemických testov: potenciodynamické polarizačné skúšky (využitie Tafelovej analýzy) a elektrochemická impedančná spektroskopia (využitie ekvivalentných obvodov). Z nameraných a získaných výsledkov je možné konštatovať, že proces mechanickej úpravy povrchu tryskaním pri zvolených parametroch znižuje koróznú odolnosť ocele Domex 700.

ÚVOD

V súčasnej dobe je trendom nahrádzať bežné konštrukčné ocele vysokopevnými nízko legovanými (HSLA) oceľami. Pri použití HSLA (vysokopevné nízkolegované ocele) ocelí namiesto bežných uhlíkových ocelí je možné ušetriť až 20 % hmotnosti pri zachovaní vysokej pevnosti, tuhosti a húževnatosti konštrukcie. Vysokopevné nízkolegované ocele boli vyvinuté predovšetkým ako náhrada nízkouhlíkovej a uhlíkovej ocele pre automobilový priemysel s cieľom zlepšiť pomer pevnosti k hmotnosti a tým znížiť hmotnosť konštrukcie. Vysoká pevnosť a vysoké mechanické vlastnosti nie sú dosiahnuté prostredníctvom vysokého obsahu legujúcich prvkov, ale predovšetkým riadeným tepel-

Nowadays a large number of mechanical surface treatments of constructions materials is used in industry, mainly focusing on steel surface treatment. The aim of this study was to evaluate the effects of mechanical surface pre-treatment (grinding and shot peening) on corrosion resistance of high strength low alloy Domex 700 steel. Suitable mechanical surface treatment can be used for surface homogenization (eg. grinding) or for improvement of mechanical, strength and fatigue properties (shot peening). 0,1M NaCl solution of ambient temperature was used as an environment for electrochemical tests. Evaluation of the mechanical surface treatment effect on corrosion resistance of Domex 700 steel surface was realized by electrochemical tests: potentiodynamic polarization tests (using Tafel analysis) and electrochemical impedance spectroscopy (using equivalent circuit). From the obtained results it is possible to conclude, that the process of mechanical surface treatment by shot peening at choosen conditions has negative effect on corrosion resistance of Domex 700 steel.

ným a termo-mechanickým spracovaním. Jedná sa o nízko alebo o mikrolegované ocele a obsah legujúcich prvkov nepresahuje 0,25 % (mikrolegované) a 5 % (nízkolegované). Obsah uhlíka sa pohybuje v rozmedzí 0,05-0,25 % C [1-5].

Existuje mnoho druhov mechanického spracovania povrchu konštrukčných materiálov [9]. Jednou z metód, ktorá sa zaraďuje medzi mechanické opracovania povrchu je brúsenie predstavujúce abrazívnu technológiu, prostredníctvom ktorej je možné povrch materiálu zhomogenizovať a odstrániť korózne produkty a iné nečistoty [10, 11]. Medzi ďalšie mechanické úpravy povrchu sa zaraďuje tryskanie (tzv. „Shot Peening“) materiálu. Tryskanie povrchu je potvrdeným a dobre zvládnutým typom mechanického spracovania povrchu,

ktoré zvyšuje odolnosť kovových komponentov vystavených cyklickému namáhaniu, koróznemu praskaniu, alebo opotrebeniu [12, 13]. Tryskanie je spôsob mechanického opracovania povrchu za studena, kde je povrch súčiastky bombardovaný malými tvrdými časticami najčastejšie guľovitého tvaru. Dopad každej guľôčky na povrch súčiastky na ňom vytvorí jamku. Aby sa vytvorila jamka je potrebná plastická deformácia v ťahovom smere. Pod povrchom sa snažia zdeformované zrná navrátiť povrch do pôvodného tvaru, čo spôsobuje vznik tlakového napätia [14]. Veľký počet dopadov guľôčok a prekrytie jamiek vytvorí pod povrchom rovnomerné tlakové napätie. Pretože väčšina porušení súčiastky únavou alebo koróziou pod napätím sa iniciujú na povrchu, tlakové napätie indukované tryskaním predlžuje čas potrebný na iniciáciu trhliny a tým aj celkovú životnosť súčiastky alebo zariadenia z hľadiska porušenia únavou materiálu [15-18]. O vplyve technológie tryskania na korózne vlastnosti povrchu ocele Domex 700 patriacej do skupiny HSLA ocelí však nenájdeme žiadnu relevantnú publikáciu, a preto sme sa tejto problematike rozhodli venovať v tejto štúdii.

EXPERIMENTÁLNE METÓDY

Ako experimentálny materiál bola použitá vysoko-pevná nízkolegovaná oceľ Domex 700 so známym chemickým zložením (Tab. 1) a základnými mechanickými vlastnosťami uvedenými v Tab. 2. Mikroštruktúra ocele Domex 700 bola pozorovaná a vyhodnotená na svetelnom metalografickom mikroskope ZEISS AXIO Imager.A1m. Vzorky experimentálneho materiálu pre metalografickú analýzu boli pripravené štandardnými metalografickými postupmi. Pre zvýraznenie pozorovanej mikroštruktúry ocele Domex 700 bol použitý ako leptadlo 1 % Nital.

Pre zaistenie rovnomernosti, homogenity a drsnosti povrchu boli vzorky ocele Domex obrúsené SiC brúsnym papierom so zrnitosťou 500. Po tomto procese boli ďalšie vzorky ešte upravené tryskaním. Ako tryskacie médium boli použité keramické guľôčky s veľkosťou 125-250 μm . Vzdialenosť tryskacej hubice

od vzorky bola 100 mm a čas tryskania bol 40 sekúnd. Pre tryskanie ocele Domex 700 boli použité dva rôzne tlaky tryskania a to 0,2 MPa a 0,7 MPa. V závislosti od parametrov tryskania sa menila predovšetkým morfológia, drsnosť, členitosť, homogenita a skutočná plocha povrchu vzorky. Tryskanie povrchu materiálu bolo realizované na TU Chlausthal (Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik) v Nemecku.

Po mechanických predúpravách povrchu ocele Domex 700 (brúsenie, tryskanie) boli vzorky dôkladne očistené destilovanou vodou, etanolom a vysušené prúdom horúceho vzduchu. Pre dôkladné očistenie povrchu bola použitá aj ultrazvuková čistička, ktorá dokonale očistila povrch vzoriek určených pre elektrochemické merania. Na zistenie korózne odolnosti ocele Domex 700 po mechanických úpravách brúsením a tryskaním boli použité dve metódy hodnotenia elektrochemických charakteristík: Potenciodynamické polarizačné merania a elektrochemická impedančná spektroskopia. Elektrochemické charakteristiky (polarizačný odpor – R_p , korózny potenciál – E_{corr} , korózna prúdová hustota – i_{corr} , korózna rýchlosť – v_{corr} a iné) boli hodnotené na potenciostate SP300 od BioLogic SAS France. Všetky elektrochemické merania prebiehali v korózne cele za použitia referenčnej elektródy (nasýtená kalomelová elektróda – SCE, potenciál SCE je 0,242 V oproti potenciálu vodíkovej elektródy), pomocnej elektródy (platinová elektróda) a pracovnej elektródy (vzorka) v prostredí 0,1M NaCl pri teplote okolia 20 ± 2 °C.

Potenciodynamické polarizačné merania boli realizované v rozsahu potenciálov od -50 mV do +300 mV voči hodnote voľného potenciálu otvoreného obvodu po dobe ustálenia 5 minút. Konštantná rýchlosť zmeny potenciálu bola 1 mV s^{-1} . Namerané potenciodynamické krivky boli hodnotené prostredníctvom Tafelovej analýzy v programe EC-Lab. Potenciodynamické polarizačné krivky sú zaznamenávané v semilogaritmických súradniciach pre jednoduchšiu interpretáciu elektrochemických charakteristík z nameraných kriviek. Merania elektrochemickej impedančnej spektroskopie prebiehali v rozsahu frekvencií od 100 kHz do 10 mHz. Merania EIS boli riadené potenciálom so zvolenou amplitúdou

Tab. 1. Chemické zloženie ocele Domex 700 (hm. %) / Chemical composition of Domex 700 steel

C	Si	Mn	S	P	Al	Nb	V	Ti	Fe
0,110	0,090	0,720	0,009	0,007	0,015	0,094	0,210	0,130	zvyšok

Tab. 2. Základné mechanické vlastnosti ocele Domex 700 / General mechanical properties of Domex 700 steel

$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Absorbovaná energia [J]
min. 700	710 – 930	12	-40 °C → 40 J; -60 °C → 27 J

*hodnota A_{80} platí len pre plechy, ktorých hrúbka je menšia ako 3 mm

striedavého napätia 10 mV. Jednosmerná zložka napätia, ktorým bola vzorka počas merania polarizovaná, bola nastavená na hodnotu voľného potenciálu dosiahnutú počas ustáľovania. Výstupom z EIS meraní sú Nyquistové diagramy. Z Nyquistových diagramov boli určené hodnoty polarizačných odporov R_p jednotlivých vzoriek ocele Domex 700.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Mikroštruktúra experimentálneho materiálu – oceľ Domex 700 je dokumentovaná na Obr. 1. Je tvorená ferritickou matricou s lokálnym výskytom karbidov Fe_3C a s priemernou veľkosťou zrna 10 μm .

Vplyvom tryskania došlo k zmene morfológie povrchu materiálu v dôsledku deformácie spôsobenej nárazmi tryskacieho média (keramické guľôčky). Zväčší sa drsnosť a aktívna plocha povrchu. Obr. 2 dokumentuje zmenu morfológie povrchu na priečných rezoch ocele Domex 700 po povrchovej predúprave brúsením (p500) a tryskaním (0,2 MPa a 0,7 MPa).

V dôsledku nárazov tryskacieho média pod vysokým tlakom (0,2 MPa a 0,7 MPa) na povrch ocele Domex 700 došlo k výraznej zmene drsnosti, čo dokumentuje Tab. 3. Drsnosť bola meraná na 10-tich miestach povrchu materiálu a následne boli vypočítané priemerné hodnoty drsností. Po tryskaní materiálu tlakom 0,2 MPa došlo

Tab. 3. Priemerné hodnoty drsností povrchu ocele Domex 700 po mechanickej povrchovej úprave / Average values of roughness parameters after mechanical surface treatment of Domex 700 steel

p500		0,2 MPa		0,7 MPa	
R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
0,188	1,803	1,165	8,571	2,471	14,283

Obr. 1. Mikroštruktúra ocele Domex 700
Fig. 1. Microstructure of Domex 700 steel

k viac ako 6-násobnému zvýšeniu drsnosti (pre parameter R_a), respektíve k viac ako 4-násobnému zvýšeniu drsnosti (pre parameter R_z) oproti brúsenému povrchu. V prípade tryskaného materiálu tlakom 0,7 MPa došlo k ešte väčšiemu zvýšeniu drsnosti o viac ako 13-krát (pre parameter R_a), respektíve o viac ako 8-krát (v prípade parametra R_z). Vytvorené jamky, nerovnosti a defekty, ktoré môžu predstavovať iniciačné miesta korózneho napadnutia. Parameter „ R_z “ hovorí o zmene textúry povrchu, teda o tom, že na povrchu materiálu po tryskaní sa zväčšuje textúra a dochádza k výskytu priehlbín a výstupkov na povrchu, kde práve priehlbiny môžu byť iniciačným miestom korózneho napadnutia.

Obr. 3 zobrazuje namerané potenciodynamické polarizačné krivky vzoriek ocele Domex 700 po brúsení a po tryskaní v roztoku 0,1M NaCl. Elektrochemické korózne charakteristiky (termodynamické: E_{corr} – korózný potenciál a kinetické: i_{corr} – korózna prúdová hustota, r_{corr} – korózna rýchlosť) získané analýzou potenciodynamických polarizačných kriviek prostredníctvom Tafelovej analýzy sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4. Elektrochemické korózne charakteristiky ocele Domex 700 po povrchovej úprave brúsením a tryskaním (získané z PD meraní) / Electrochemical corrosion characteristics of Domex 700 steel surface after mechanical surface treatment (from potentiodynamic polarization curves)

Povrchová úprava	Elektrochemická charakteristika		
	E_{corr} [mV vs. SCE]	i_{corr} [$\mu A\ cm^{-2}$]	r_{corr} [$\mu m\ y^{-1}$]
brúsená – p500	-542 $\pm$ 7	8,1 $\pm$ 0,2	181 $\pm$ 5
tryskaná – 0,2 MPa	-573 $\pm$ 9	16,2 $\pm$ 0,5	373 $\pm$ 11
tryskaná – 0,7 MPa	-601 $\pm$ 10	20,1 $\pm$ 1	482 $\pm$ 24

Spôsoby mechanickej úpravy povrchu (brúsenie, tryskanie) ovplyvnili tak termodynamické ako aj kinetické elektrochemické charakteristiky povrchu experimentálneho materiálu.

Z priebehov potenciodynamických polarizačných kriviek (Obr. 3) a výsledkov z Tafelovej analýzy (Tab. 4) vyplýva že, termodynamická stabilita (E_{corr}) povrchu ocele Domex 700 v prostredí 0,1M NaCl je najvyššia na povrchu brúseného materiálu a dosahuje hodnoty -542 mV, čo je o 31 mV viac ako v prípade tryskaného povrchu tlakom 0,2 MPa a o 59 mV viac ako v prípade povrchu materiálu tryskaného tlakom 0,7 MPa. Pozitívnejšia hodnota tejto elektrochemickej charakteristiky (korózneho potenciálu - E_{corr}) znamená, že povrch materiálu je termodynamicky ušľachtilejší, teda stabilnejší, avšak rozdiely v hodnotách E_{corr} nie sú veľmi výrazné a termodynamická stabilita povrchu je veľmi podobná pri všetkých troch mechanických úpravách povrchu.

a) profil ocele Domex 700 po brúsení (SiC, p500) / *profile of Domex 700 steel after grinding (SiC, p500)*

b) detail profilu ocele Domex 700 po brúsení / *detail of Domex 700 steel profile after grinding (SiC, p500)*

c) profil ocele Domex 700 po tryskaní (0,2 MPa) / *profile of Domex 700 steel after shot peening (0,2 MPa)*

d) detail profilu ocele Domex 700 po tryskaní (0,2 MPa) / *detail of Domex 700 steel profile after shot peening (0,2 MPa)*

e) profil ocele Domex 700 po tryskaní (0,7 MPa) / *profile of Domex 700 after shot peening (0,7 MPa)*

f) detail profilu ocele Domex 700 po tryskaní (0,7 MPa) / *detail of Domex 700 steel profile after shot peening (0,7 MPa)*

Obr. 2. Priečne rezy ocele Domex 700 po mechanickej povrchovej úprave brúsením a tryskaním

Fig. 2. Cross-section image of Domex 700 steel after mechanical surface treatment by grinding and shot peening

Kinetické deje na povrchu testovaných vzoriek, ktoré odrážajú intenzitu prebiehajúceho korózneho procesu v prostredí 0,1M NaCl sú reprezentované hodnotami korózneho prúdovej hustoty (i_{corr}) a korózneho rýchlosti (v_{corr}). Najnižšia korózna prúdová hustota i_{corr} ($8,1 \mu\text{A cm}^{-2}$) a korózna rýchlosť v_{corr} ($181 \mu\text{m y}^{-1}$) bola opäť dosiahnutá na brúsenom povrchu. Po procese tryskania tlakom 0,2 MPa došlo v porovnaní s brú-

Obr. 3. Potenciodynamické polarizačné krivky ocele Domex 700 po povrchovej úprave brúsením a tryskaním
Fig. 3. Potentiodynamic polarization curves of Domex 700 steel after surface treatment by grinding and shot peening

Obr. 4. Nyquistove diagramy ocele Domex 700 po povrchovej úprave brúsením a tryskaním
Fig. 4. Nyquist diagrams of Domex 700 steel after surface treatment by grinding and shot peening

seným povrchom k zvýšeniu hodnoty i_{corr} o 100 % ($16,2 \mu\text{A cm}^{-2}$) a zvýšeniu v_{corr} taktiež o viac ako 100 % ($373 \mu\text{m y}^{-1}$). So zvýšením tlaku tryskania na 0,7 MPa sa hodnoty i_{corr} a v_{corr} opäť zvýšili. V prípade i_{corr} tento nárast predstavuje $12 \mu\text{A cm}^{-2}$ (2,5 násobne vyšší nárast) a v prípade v_{corr} $301 \mu\text{m y}^{-1}$ (viac ako 2,5 násobne vyšší nárast) v porovnaní s brúseným povrchom. Tieto výsledky z korózných skúšok potvrdili predpoklad, že intenzívnejšia deformácia povrchu materiálu tryskaním spôsobujúca vyššiu koncentráciu štruktúrnych defektov a väčšiu aktívnu plochu povrchu má za následok nižšiu kinetickú stabilitu povrchu ocele Domex 700.

Výsledky potenciodynamických polarizačných meraní sú podporené aj nedeštruktívnymi meraniami prostredníctvom elektrochemickej imedančnej spektroskopie (EIS). Na Obr. 4 sú znázornené Nyquistove diagramy vzoriek testovanej ocele Domex 700 po mechanických úpravách povrchu brúsením a tryskaním. Pre analýzu EIS kriviek (Nyquistových diagramov) bol použitý jednoduchý ekvivalentný obvod (Obr. 5), ktorý najlepšie popisuje elektrochemické procesy prebiehajúce na rozhraní vzorka/prostredie (0,1M NaCl).

Jednou z najdôležitejších elektrochemických charakteristík vyjadrujúcich odpor povrchu materiálu proti korózii je polarizačný odpor R_p [12, 19, 20]. Prvok CPE predstavuje konštantný fázový element a jeho účel v ekvivalentných obvodoch je bližšie popísaný u predchádzajúcich autorov [21, 22]. Hodnoty polarizačných odporov R_p a ďalších prvkov ekvivalentného obvodu boli získané analýzou nameraných Nyquistových diagramov a analyzované prostredníctvom softvéru EC-Lab. Elektrochemické charakteristiky získané z EIS meraní sú uvedené v Tab. 5.

Obr. 5. Ekvivalentný obvod pre analýzu Nyquistových diagramov ocele Domex 700 po povrchovej úprave brúsením a tryskaním
Fig. 5. Equivalent circuit for analysis of Nyquist diagrams of Domex 700 steel after surface treatment by grinding and shot peening

Tab. 5. Elektrochemické charakteristiky ocele Domex 700 po povrchovej úprave brúsením a tryskaním (získané z Nyquistových diagramov) / Electrochemical characteristics of Domex 700 steel surface after mechanical treatment (from Nyquist diagrams)

Povrchová úprava	Elektrochemická charakteristika			
	R_{Ω} [$\Omega \text{ cm}^2$]	R_p [$\Omega \text{ cm}^2$]	CPE [$10^{-6} \text{ F s}^{n-1}$]	n
brúsená – p500	111 ± 2	1004 ± 19	127 ± 18	$0,75 \pm 0,03$
tryskaná – 0,2 MPa	109 ± 3	821 ± 24	189 ± 19	$0,77 \pm 0,03$
tryskaná – 0,7 MPa	110 ± 3	692 ± 31	233 ± 21	$0,75 \pm 0,03$

Najvyššia hodnota polarizačného odporu (R_p) povrchu ocele Domex 700 v prostredí 0,1M NaCl bola dosiahnutá na brúsenom povrchu (SiC, p500) a jej hodnota dosahovala $1004 \Omega \cdot \text{cm}^2$, oproti hodnote dosiahnutej na povrchu tryskanom tlakom 0,2 MPa, ktorá bola nižšia o $180 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (čo zodpovedá poklesu hodnoty R_p o viac ako 18 %). Na povrchu tryskanom tlakom 0,7 MPa došlo ešte k väčšiemu poklesu hodnoty polarizačného odporu (R_p) oproti hodnote R_p brúseného materiálu o $312 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (čo zodpovedá poklesu hodnoty R_p o viac ako 31 %). Pokles hodnôt polarizačných odporov tak korešponduje z výsledkami získanými pomocou PD meraní.

Kombináciou vhodne zvolených experimentov ako morfológická analýza a hodnotenie elektrochemických koróznych charakteristík (potenciodynamické polarizačné merania a elektrochemická impedančná spektroskopia) testovania povrchu vysokopevnej ocele Domex 700 po povrchových úpravách brúsením a tryskaním je možné tvrdiť že použitá metóda tryskania spôsobuje zníženie korózne odolnosti povrchu ocele Domex 700 v prostredí chloridov. Pre aplikácie, kde sa teda vyžaduje zvýšená korózna odolnosť konštrukčných súčastí sa preto po tryskaní povrchu odporúča zaradenie dodatočnej operácie povrchovej úpravy či už pomocou rôznych druhov povlakov, alebo organických náterových systémov.

ZÁVERY

Cieľom tejto štúdie bol výskum vplyvu mechanickej úpravy (predúpravy) povrchu prostredníctvom brúsenia (SiC, p500) a tryskania (0,2 MPa a 0,7 MPa) na korózne správanie a kvalitu povrchu vysokopevnej ocele Domex 700 v prostredí 0,1M NaCl. Z dosiahnutých výsledkov je možné vyvodiť nasledovné závery:

- Vplyvom procesu tryskania materiálu dochádza k výraznej plastickej deformácii povrchu, zmene morfológie povrchu, zväčšeniu drsnosti povrchu, zväčšeniu aktívnej plochy povrchu, vnášaniu tlakových zvyškových napätí, tvorbe nerovností a povrchových defektov na povrchu vysokopevnej ocele Domex 700.
- Čím vyššia je intenzita (tlak) tryskania povrchu materiálu, tým sú aj dôsledky spomenuté v bode 1. intenzívnejšie.
- Z termodynamického hľadiska, je rozdiel v hodnotách korózneho potenciálu (E_{corr}) povrchu testovanej ocele Domex 700 po brúsení a tryskaní (0,2 MPa a 0,7 MPa) menej výrazný (v priemere o 30 mV), teda termodynamická stabilita povrchu je podobná pri všetkých troch mechanických úpravách povrchu.
- Naopak, z kinetického hľadiska má spomedzi testovaných technológií najväčšiu koróznú stabilitu v prostredí 0,1M NaCl povrch vysokopevnej ocele Domex 700 po brúsení brúsnym SiC papierom so zrnitosťou p500 čo je potvrdené aj najvyššiou dosiahnutou hodnotou polarizačného odporu R_p ($1004 \Omega \cdot \text{cm}^2$).

PodĎakovanie

Autori ďakujú za podporu pri vykonávaní experimentálnych prác Agentúre na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom projektov APVV-14-0096; APVV-15-0120 a ITMS 26220220183.

LITERATÚRA

1. Pastorek, F.; Borko, K.; Fintová, S.; Kajánek, D.; Hadzima, B. Effect of surface pretreatment on quality and electrochemical corrosion properties of manganese phosphate on S355J2 HSLA steel. *Coatings* **2016**, 6 (4), 46.
2. Crouch, G.; Cimpoeru, S., J.; Li, H.; Shanmugam, D. *The Science of Armour Materials*, Chapter 2 - Armour steels, pp. 55-115. Victoria (in Australia), 2017. ISBN: 978-0-08-101002-0.
3. Mohrbacher, H. *Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Material*, Chapter 6 - High-Performance Steels for Sustainable Manufacturing of Vehicles, pp. 135-163. Schilde (in Belgium), 2016. ISBN: 978-0-12-411497-5.
4. Smallman, R., E.; Ngan, W., H., A. *Modern Physical Metallurgy* (8th Edition), Chapter 14 - Selected Alloys, pp. 529-569. Waltham (in USA), 2014. ISBN: 978-0-08-098204-5.
5. Hilditch, T., B.; de Souza, T.; Hodgson, D., P. *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, Chapter 2 - Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS), pp. 9-28. Victoria (in Australia), 2015. ISBN: 978-0-85709-436-0.
6. Canale, F., C., L.; Vatauvuk, J.; Totten, E., G. *Comprehensive Materials Processing*, Chapter 12.02 - Introduction to Steel Heat Treatment, pp. 3-37. Portland (in USA), 2014. ISBN: 978-0-12-803581-8.
7. Militzer, M. *Comprehensive Materials Processing*, Chapter 1.10 - Thermomechanical Processed Steels, pp. 191-216. Vancouver (in Canada), 2014. ISBN: 978-0-12-803581-8.
8. Banerjee, K., M. *Comprehensive Materials Finishing*, Chapter 2.8 - Heat Treatment of Commercial Steels for Engineering Applications, pp. 180-213. Jaipur (in India), 2017. ISBN: 978-0-12-803581-8.
9. Han, S., H.; Han, J., W.; Nam, Y., Y.; Cho, H., I. Fatigue life improvement for cruciform welded joint by mechanical surface treatment using hammer peening and ultrasonic nanocrystal surface modification. *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures* **2009**, 32, 573-579.
10. Zhongqiu, F.; Bohai, J.; Xiangming, K.; Xiang, Ch. Grinding treatment effect on rib-to-roof weld fatigue performance of steel bridge decks. *Journal of Constructional Steel Research* **2017**, 129, 163-170.
11. Neslušan, M.; Mičieta, B.; Mičietová, A.; Čiliková, M.; Mrkvica, I. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. *Measurement* **2015**, 70, 1-13.
12. Mhaede, M.; Pastorek, F.; Hadzima, B. Influence of shot peening on corrosion properties of biocompatible magnesium alloy AZ31 coated by dicalcium phosphate dihydrate (DCPD). *Materials Science and Engineering: C* **2014**, 39, 330-335.
13. Trško, L.; Guagliano, M.; Bokůvka, O.; Nový, F. Fatigue life of AW 7075 Aluminium Alloy after severe shot peening treatment with different intensities. *Procedia Engineering* **2014**, 74, 246-252.

14. Miková, K.; Bagherifard, S.; Bokůvka, O.; Guagliano, M.; Trško, L. Fatigue behavior of X70 microalloyed steel after severe shot peening. *International Journal of Fatigue* **2013**, 55, 33-42.
15. Trško, L.; Bokůvka, O.; Nový, F.; Guagliano, M. Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel. *Materials & Design* **2014**, 57, 103-113.
16. Dieng, L.; Amine, D.; Falaise, Y.; Chataigner, S. Parametric of the finite modeling of shot peening on welded joints. *Journal of Constructional Steel Research* **2017**, 130, 234-347.
17. Li, X.; Zhang, J.; Wang, Y.; Ma, M.; Shen, S.; Song, X. The dual role of shot peening in hydrogen-assisted cracking of PSB1080 high strength steel. *Materials & Design* **2016**, 110, 602-615.
18. Závodská, D.; Guagliano, M.; Bokůvka, O.; Trško, L. Fatigue resistance of low alloy steel after shot peening. *Materials today: Proceedings* **2016**, 3, 1220-1225.
19. Frankel, G., S. Electrochemical techniques in corrosion: status, limitations, and needs. *J. ASTM International*. **2008**, 5, 3-40.
20. Ariza, E.; Rocha, L., A. Evaluation of corrosion resistance of multi-layered Ti/glass-ceramic interfaces by electrochemical impedance spectroscopy. *Materials Science Forum* **2005**, 492-493, 189-194.
21. Han, X., G.; Zhu, F.; Zhu, X., P.; Lei, M., K.; Xu, J., J. Electrochemical corrosion behavior of modified MAO film on magnesium alloy AZ31 irradiated by high-intensity pulsed ion beam. *Surface Coatings Technology* **2013**, 228, 164-170.
22. Skublova, L.; Hadzima, B.; Borbas, L.; Vitosova, M. The influence of temperature on corrosion properties of titanium and stainless steel biomaterials. *Materials Engineering* **2008**, 15, 18-22.