

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2026

Ing. Martin Slezák



Ing. Martin Slezák

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Vplyv plastickej deformácie a cyklického zaťažovania na zmenu
vybraných mechanických a fyzikálnych vlastností austenitických ocelí**

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

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

Predkladateľ: **Ing. Martin Slezák**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra materiálového inžinierstva

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

Oponenti:

1. doc. Ing. Mária Mihaliková, PhD.
Inštitút materiálov
Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie
Technická univerzita v Košiciach

2. doc. Ing. Lenka Kucharíková, PhD.
Katedra materiálového inžinierstva
Strojnícka fakulta
Žilinská univerzita v Žiline

3. prof. Ing. Milan Smetana, PhD.
Katedra teoretickej elektrotechniky a biomedicínskeho inžinierstva
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Žilinská univerzita v Žiline

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa **25.8. 2026 o 10:00 hod.** v miestnosti **BA 205** na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe **Materiálové inžinierstvo**, 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. František Nový, PhD. v. r.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Obsah

Úvod.....	5
Stručný prehľad problematiky.....	5
Ciele dizertačnej práce.....	6
Zvolené metódy spracovania dizertačnej práce	6
Dosiahnuté výsledky	8
Mikroštruktúrna analýza po rozpúšťacom žíhaní	8
Mikroštruktúrna analýza po deformácii tlakom	9
Mikroštruktúrna analýza po deformácii jednoosovým ťahom	10
Meranie mikrotvrdosti	11
Meranie magnetických vlastností	15
Korózne vlastnosti austenitických ocelí po deformácii jednoosovým ťahom	18
Vyhodnotenie zmien magnetických vlastností na čele únavovej trhliny	22
Závery.....	24
Resumé v anglickom jazyku.....	26
Prínosy pre vedu.....	26
Prínosy pre prax.....	27
Zoznam použitej literatúry	27
Zoznam publikovaných prác doktoranda	29

Úvod

Austenitické nehrdzavejúce ocele patria medzi významné technické a biomedicínske materiály, využívané najmä vďaka vysokej koróznej odolnosti, biokompatibilite a priaznivým mechanickým vlastnostiam. Ich austenitická mikroštruktúra zabezpečuje paramagnetické správanie a vysokú tvárnosť, avšak plastická deformácia a cyklické zaťažovanie môžu meniť ich mechanické, fyzikálne aj korózne vlastnosti.

Významným javom pri deformácii týchto ocelí je deformačne indukovaná martenzitická transformácia, pri ktorej dochádza k čiastočnej premene austenitickej K12 mriežky na feromagnetický α' martenzit s K8 mriežkou. Tento proces môže zvýšiť pevnosť a tvrdosť materiálu, no zároveň ovplyvniť jeho magnetické správanie a znížiť koróznú odolnosť. Z biomedicínskeho hľadiska je preto dôležité zachovanie mikroštruktúrnej stability a paramagnetických vlastností, napríklad pri vyšetreniach magnetickou rezonanciou.

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať vplyv plastickej deformácie a cyklického zaťažovania na vybrané mechanické a fyzikálne vlastnosti ocelí AISI 304 a AISI 316L. Práca sa zameriava na mikroštruktúrne zmeny, mikrotvrdosť, magnetické vlastnosti, koróznú odolnosť a únavové správanie týchto materiálov.

Dizertačná práca bola spracovaná vďaka projektu KEGA 016ŽU-4/2023 - Doba plastová – ako plasty používať a súčasne chrániť životné prostredie a človeka – inovácia študijných materiálov. Ďalej bol výskum podporený projektom VEGA 1/0729/26 - Štúdium mechanizmov ovplyvňujúcich únavovú odolnosť a vnútorné tlmenie austenitických ocelí po plastickej deformácii. Experimenty v tejto dizertačnej práci boli podporené aj Grantovým systémom UNIZA – podpora doktorandského štúdia (Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V05-00002 – identifikačné číslo projektu: 20421) s názvom projektu „Vplyv plastickej deformácie na zmenu vybraných vlastností austenitických ocelí“. Časť výsledkov dizertačnej práce bola vykonaná počas pobytov ERAZMUS+ na Fakulte elektrotechniky a informatiky, Katedry Fyziky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Česká republika.

Stručný prehľad problematiky

Kovové biomateriály sa v medicínskej praxi využívajú najmä v aplikáciách, kde je potrebné zabezpečiť dostatočnú mechanickú pevnosť, odolnosť proti opotrebeniu a dlhodobú stabilitu v biologickom prostredí. Medzi základné požiadavky na tieto materiály patrí biokompatibilita, korózna odolnosť, vhodné mechanické vlastnosti a schopnosť minimalizovať nežiaduce reakcie organizmu [1,2]. Biokompatibilita však nie je nemennou vlastnosťou samotného materiálu, ale závisí od konkrétnej aplikácie, prostredia a funkcie, ktorú má materiál v organizme plniť [3,4]. Významnú skupinu kovových biomateriálov predstavujú austenitické nehrdzavejúce ocele, ktoré sa uplatňujú pre kombináciu koróznej odolnosti, dobrej tvárnosti, húževnatosti a technologickej spracovateľnosti [4,5]. Ich štruktúra je tvorená austenitom s kubickou plošne centrovanou mriežkou K12, ktorá je stabilizovaná najmä niklom, mangánom a dusíkom. Korózna odolnosť týchto ocelí je podmienená najmä obsahom chrómu, ktorý umožňuje vznik tenkej pasívnej vrstvy na povrchu materiálu [6,7,8]. Molybdén navyše zvyšuje odolnosť proti lokálnym formám korózie, najmä v prostrediach obsahujúcich chloridy [6,9]. Mechanické a fyzikálne vlastnosti austenitických ocelí úzko súvisia s ich chemickým zložením a stabilitou austenitickej fázy. Keďže tieto ocele nemožno spevňovať klasickým kalením, zvýšenie pevnosti sa dosahuje najmä plasticou deformáciou za studena [6,7]. Plastická deformácia prebieha

predovšetkým pohybom dislokácií, sklzom a za určitých podmienok aj dvojčatením, pričom významnú úlohu zohráva energia chýb vrstvenia [8,10]. Pri metastabilných austenitických oceliach môže plastická deformácia vyvolať deformačne indukovanú martenzitickú transformáciu, pri ktorej dochádza k premene austenitu na ϵ -martenzit a/alebo feromagnetický α' -martenzit s priestorovo centrovanou mriežkou K8. Tento proces závisí od chemického zloženia, teploty, stupňa deformácie, rýchlosti deformácie a stability austenitu [11,12,13]. Vznik α' -martenzitu vedie k zvýšeniu pevnosti, tvrdosti a magnetickej odozvy materiálu, ale môže zároveň zhoršiť jeho koróznú odolnosť, najmä v chloridových prostrediach [14,15]. V biomedicínskych aplikáciách je potrebné zohľadniť aj cyklické mechanické zaťažovanie implantátov, ktoré môže počas dlhodobej prevádzky viesť k akumulácii poškodenia, mikroštruktúrnym zmenám a zmene mechanických alebo fyzikálnych vlastností materiálu. Táto oblasť môže byť spojená s akumuláciou poškodenia, mikroštruktúrnymi zmenami a zmenou magnetického správania materiálu [16,17,18,19]. Z uvedeného dôvodu je výskum vplyvu plastickej deformácie a cyklického zaťažovania na ocele AISI 304 a AISI 316L dôležitý najmä pre aplikácie, kde sa vyžaduje zachovanie mechanickej stability, koróznej odolnosti a magnetických vlastností.

Ciele dizertačnej práce

cieľom dizertačnej práce je objasniť vplyv plastickej deformácie a cyklického zaťažovania na deformačne indukovanú martenzitickú transformáciu v austenitických nehrdzavejúcich oceliach AISI 304 a AISI 316L. Práca sa zameriava najmä na vznik feromagnetického α' -martenzitu, ktorý vzniká transformáciou pôvodne paramagnetickej austenitickej matrice. Pozornosť je venovaná porovnaniu oboch ocelí z hľadiska ich rozdielnej metastability, intenzity martenzitickej transformácie a následných zmien mechanických, fyzikálnych a koróznych vlastností.

Uvedený zámer predpokladá splnenie nasledovných čiastkových úloh:

- Komplexná mikroštruktúrna analýza po rozpúšťacom žíhaní, po rôznych smeroch zaťaženia a rôznych stupňoch deformácie,
- Plastická deformácia austenitických ocelí: deformácia tlakom (v rozmedzí 50kN až 800kN) a deformácia jednoosovým ťahom (tromi rôznymi rýchlosťami posuvu priechníka: 0,5mm/min; 5mm/min a 50mm/min) pri rôznych stupňoch deformáciach,
- Vyhodnotiť vplyv plastickej deformácie na zmenu mikrotvrdosti,
- Vyhodnotiť zmenu magnetických vlastností austenitických ocelí po rôznych smeroch zaťaženia a rôznych stupňoch deformáciach,
- Vyhodnotiť zmenu koróznych vlastností austenitických ocelí po rôznych rýchlostiach posuvu priechníka pri deformácii jednoosovým ťahom,
- Zachytiť zmenu magnetických vlastností na čele únavovej trhliny v režime vysokocyklovej únavy ťah-ťah.

Zvolené metódy spracovania dizertačnej práce

Experimentálnymi materiálmi boli austenitické nehrdzavejúce ocele AISI 304 a AISI 316L. Chemické zloženie materiálov bolo overené emisnou iskrovou spektrometriou (Tab. 1) a na jeho základe boli stanovené hodnoty energie chýb vrstvenia. Pred samotnými experimentmi boli vzorky podrobené rozpúšťaciemu žíhaniu pri teplote 1030 °C s výdržou 30 minút vo vákuu a následným ochladením dusíkom. Takto pripravený stav predstavoval východiskový stav pre hodnotenie zmien vyvolaných plasticou deformáciou a cyklickým zaťažovaním.

Tab. 1 Chemické zloženie experimentálnych materiálov porovnané s normou

Typ ocele	Koncentrácia prvkov [hmot. %]								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	S	P	Fe
Materiál vzoriek deformovaných tlakom									
AISI 304	0,019	18,87	8,18	0,40	1,35	0,401	0,027	0,033	zv.
Norma	0,07	17,00-20,00	9,00-11,5	-	2,00	1,00	0,03	0,045	zv.
AISI 316L	0,023	17,02	10,23	2,11	1,48	0,383	0,023	0,036	zv.
Norma	0,03	16,5-18,5	11,0-14,0	2,00-2,50	2,00	1,00	0,03	0,045	zv.
Materiál vzoriek deformovaných jednoosovým ťahom									
AISI 304	0,04	18,34	8,11	0,47	1,25	0,376	0,0007	0,038	zv.
AISI 316L	0,017	17,48	10,09	2,01	1,11	0,26	0,0007	0,047	zv.

Plastická deformácia tlakom bola realizovaná pri laboratórnej teplote približne 20 °C. Nižšie zaťaženia v rozsahu 50 až 250 kN boli aplikované na univerzálnom skúšobnom stroji ZDM30 na Katedre materiálového inžinierstva SJF UNIZA. Na dosiahnutie vyššej intenzity plastickej deformácie boli následne použité zaťaženia 300 až 800 kN v priestoroch Stavebnej fakulty UNIZA. Vyššie zaťaženia boli zvolené s cieľom podporiť tvorbu deformačne indukovaného α' -martenzitu a súvisiace zmeny mikroštruktúry a tvrdosti. Plastická deformácia jednoosovým ťahom bola realizovaná vo Výskumnom centre Žilinskej univerzity v Žiline. Najskôr boli vykonané ťahové skúšky do pretrhnutia pri rýchlostiach posuvu priechnika 0,5 mm/min, 5 mm/min a 50 mm/min pre obe austenitické ocele. Na základe získaných ťahových diagramov boli následne stanovené jednotlivé stupne deformácie. Oceľ AISI 304 bola deformovaná na hodnoty 7,5 %, 15 %, 30 % a 60 % pri všetkých rýchlostiach posuvu priechnika, pričom pri rýchlosti 0,5 mm/min bola realizovaná aj deformácia 85 %. Oceľ AISI 316L bola deformovaná na hodnoty 6,25 %, 12,5 %, 25 % a 50 % pri všetkých rýchlostiach posuvu priechnika, pričom pri rýchlosti 0,5 mm/min bola realizovaná aj deformácia 70 %.

Magnetické zmeny austenitických ocelí boli hodnotené pomocou vibračnej magnetometrie VSM a merania vlastného magnetického poľa fluxgate senzorom. Vibračná magnetometria VSM bola použitá na hodnotenie objemovej magnetickej odozvy vzoriek. Počas merania sa zaznamenávala závislosť magnetizácie od intenzity aplikovaného magnetického poľa vo forme hysterézných slučiek, z ktorých boli následne vyhodnotené základné magnetické parametre, najmä magnetizácia v nasýtení, remanentná magnetizácia a koercitívne pole. Pri austenitických oceliach táto metóda umožňuje nepriamo sledovať vznik feromagnetického α' -martenzitu, keďže pôvodná austenitická matrica vykazuje paramagnetické správanie [21,22].

Na doplnenie magnetických meraní bolo použité aj bezkontaktné mapovanie slabého vlastného magnetického poľa pomocou fluxgate senzora. Táto metóda bola aplikovaná najmä pri vzorkách ocele AISI 304 po plastickej deformácii jednoosovým ťahom a pri vzorkách s iniciovanou únavovou trhlinou. Fluxgate senzor umožňuje zaznamenávať aj nízke hodnoty magnetického poľa, a preto je vhodný na sledovanie lokálnych zmien magnetickej odozvy súvisiacich s plasticou deformáciou, vznikom feromagnetického fázy a únavovým poškodením [22].

Mikroštruktúrna analýza bola vykonaná na štandardne metalograficky pripravených vzorkách. Vzorky boli odobraté, zalisované, brúsené, leštené a následne chemicky leptané leptadlom Kalling's 2. Pri vzorkách deformovaných tlakom boli výbrusy pripravené v smere deformácie, zatiaľ čo pri vzorkách deformovaných jednoosovým ťahom v smere ťahu. Mikroštruktúra bola hodnotená pomocou

svetelnej mikroskopie a riadkovej elektrónovej mikroskopie, pričom EDX analýza bola použitá na identifikáciu vybraných vtrúsenín v skúmanom materiáli. Mikrotvrdosť bola meraná statickou skúškou podľa Vickersa pomocou mikrotvrdomera Zwick/Roell ZHμ. Pre vzorky po rozpúšťacom žíhaní aj po plastickej deformácii bolo použité zaťaženie HV0,5, čas zaťažovania 10 s a meranie prebiehalo pri teplote $\pm 22^{\circ}\text{C}$. Korózna odolnosť vzoriek bola hodnotená metódou potenciodynamickej polarizácie v trojelektrodovej koróznej cele systému Biologic. Ako elektrolyt bol použitý 0,9 % roztok NaCl pri teplote 37°C , čím boli simulované podmienky blízke prostrediu ľudského tela. Meraná plocha vzorky bola 1 cm^2 . Pred polarizačným meraním boli vzorky ponechané 10 minút na ustálenie voľného potenciálu OCP. Polarizačné krivky boli zaznamenávané v rozsahu od -300 mV do 1200 mV oproti OCP pri rýchlosti posunu potenciálu 1 mV/s . Z reprezentatívnych kriviek boli určené hodnoty depasivačného potenciálu E_{pit}, korózneho potenciálu E_{corr} a koróznej prúdovej hustoty i_{corr} pomocou Tafelovej extrapolácie [187]. Na iniciáciu únavovej trhliny v austenitických oceliach AISI 304 a AISI 316L bola použitá vysokocyklová únava v režime ťah–ťah. Skúšky boli realizované na rezonančnom pulzátore Zwick/Roell Amsler 150 HFP 5100 pri zaťažovacej frekvencii približne 55 Hz, parametri asymetrie cyklu $0 < R < 1$ a laboratórnej teplote približne 20°C . Miesto iniciácie únavovej trhliny bolo usmernené pomocou jemného vrubu, ktorý zvyšoval lokálnu koncentráciu napätí. Parametre únavovej skúšky sú uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Parametre únavových skúšok ťah-ťah

Oceľ	Stav	Počet cyklov	Statické zaťaženie [MPa]	Dynamické zaťaženie [MPa]	Vypnutie skúšky pri poklese frekvencie [Hz]
AISI 304	RZ	-	-	-	-
	trhlina	248 751	200	150	3
	trhlina	256 213	200	150	3,5
	pretrhnutá	259 939	200	150	3,5
AISI 316L	RZ	-	-	-	-
	trhlina	119 128	200	125	3,6
	pretrhnutá	156 071	200	150	3,6

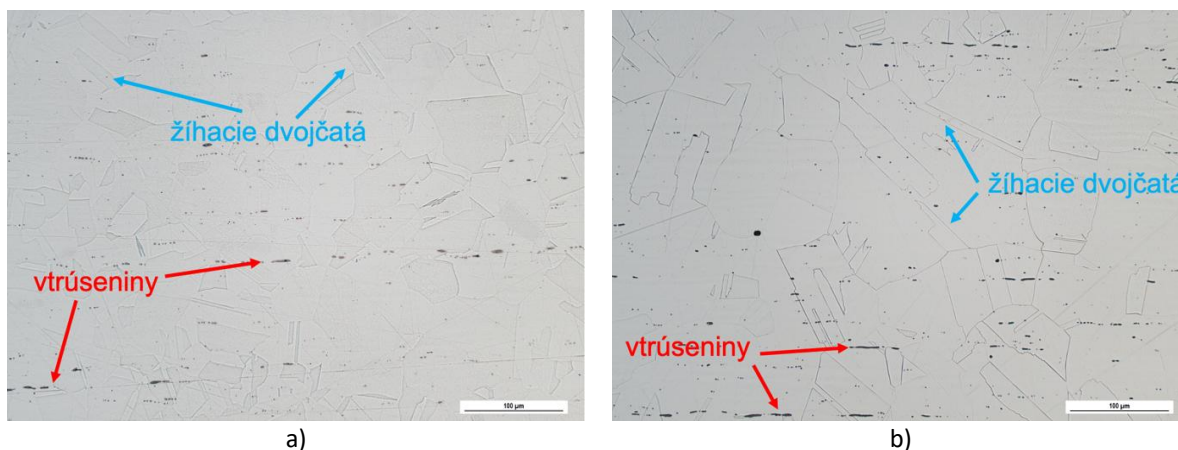
Dosiahnuté výsledky

Mikroštruktúrna analýza po rozpúšťacom žíhaní

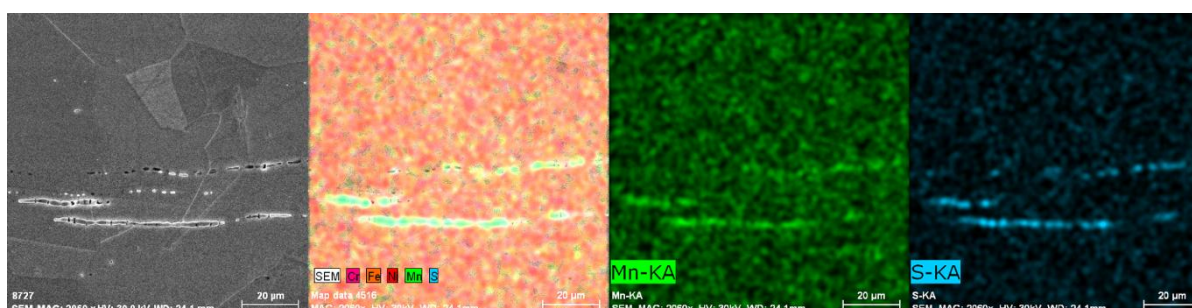
Po rozpúšťacom žíhaní vykazovali ocele AISI 304 a AISI 316L austenitickú mikroštruktúru tvorenú polyedrickými zrnami nerovnomernej veľkosti so žíhacími dvojčatami (Obr. 1a a Obr. 1b). Tento charakter mikroštruktúry potvrdzuje vhodný východiskový stav materiálov pred následnou plasticou deformáciou a cyklickým zaťažovaním.

V oboch materiáloch boli pri svetelnej mikroskopii pozorované aj tmavé bodové až pretiahnuté častice, čiastočne usporiadané v líniiach, pravdepodobne súvisiace s predchádzajúcim technologickým spracovaním materiálu. EDX analýza preukázala lokálne zvýšený obsah mangánu a síry, na základe čoho boli tieto častice identifikované ako vtrúseniny sulfidu mangánateho MnS (Obr. 2).

Plechý použité na jednoosovú ťahovú deformáciu a únavové skúšky vykazovali po rozpúšťacom žíhaní porovnateľnú austenitickú mikroštruktúru s polyedrickými zrnami a žíhacími dvojčatami. Vzhľadom na výrazne nižší obsah síry (Tab. 1) v týchto materiáloch neboli v ich mikroštruktúre pozorované vtrúseniny typu MnS.



Obr. 1 Mikroštruktúrna analýza austenitickej ocele po rozpúšťacom žíhaní; a) oceľ AISI 304, b) oceľ AISI 316L; lept.

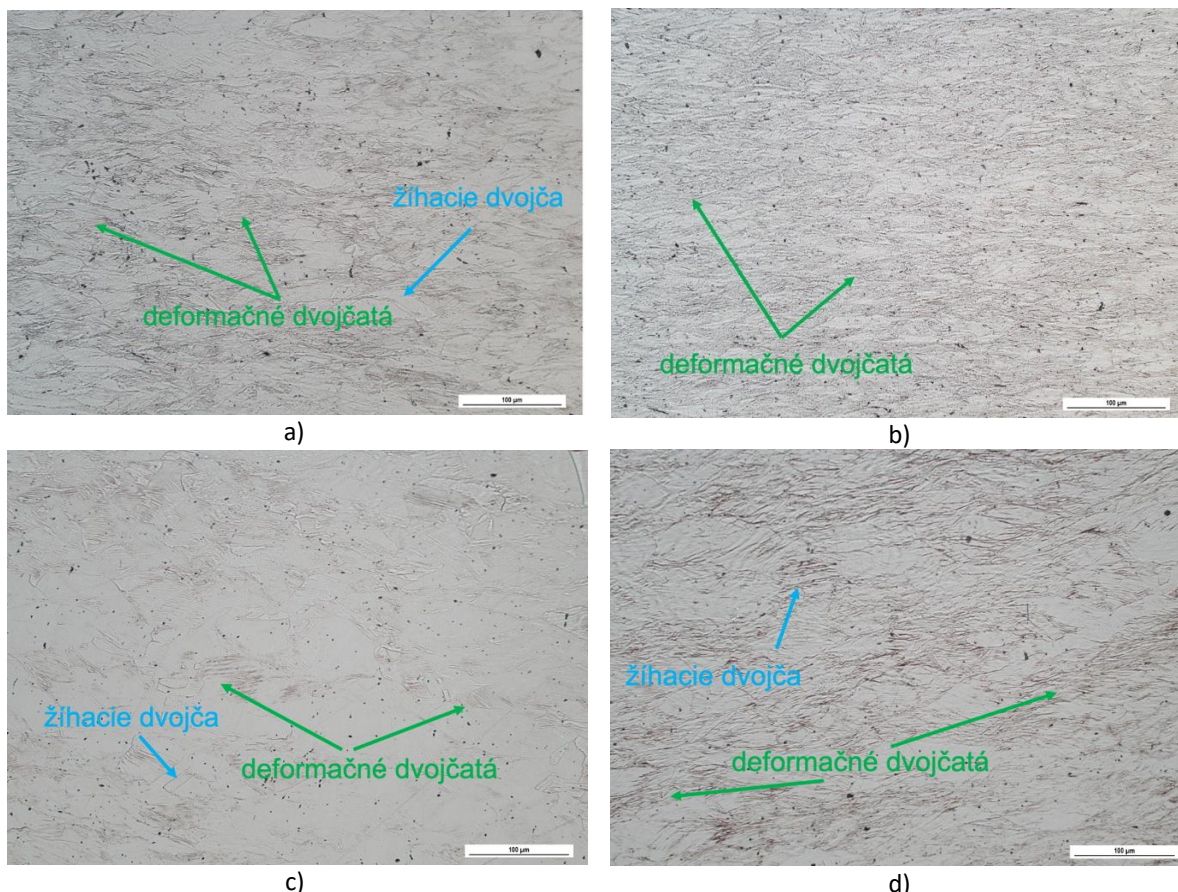


Obr. 2 EDX analýza vtrúseniny - sulfid mangánatý MnS

Mikroštruktúrna analýza po deformácii tlakom

Po deformácii tlakom boli v mikroštruktúre oboch ocelí pozorované zmeny súvisiace s rastúcou intenzitou plastickej deformácie. Pri oceli AISI 304 v stave po zaťažení 300 kN boli pôvodné austenitické zrná ešte rozpoznateľné, avšak ich vnútorná štruktúra bola výraznejšie ovplyvnená vyšším počtom deformačných pásov. Tieto pásy boli miestami usporiadané do paralelných sústav a čiastočne prekryvali pôvodné žihacie dvojčatá (Obr. 3a). Pri zaťažení 700 kN mala mikroštruktúra už výrazne deformovaný charakter. Pôvodné polyedrické zrná boli iba čiastočne rozlíšiteľné, pričom vnútorná štruktúra zrn bola prekrytá hustou sieťou deformačných pásov. Žihacie dvojčatá nebolo možné jednoznačne identifikovať a pozorované vtrúseniny už nevytvárali pôvodné pásové usporiadanie, ale boli ovplyvnené priebehom plastickej deformácie (Obr. 3b).

Podobný vývoj bol zaznamenaný aj pri oceli AISI 316L. Pri zaťažení 200 kN boli pôvodné polyedrické zrná, hranice zrn aj žihacie dvojčatá ešte dobre rozlíšiteľné, pričom vo vnútri zrn sa objavovali deformačné pásy obdobného charakteru ako pri oceli AISI 304 (Obr. 3c). Pri zaťažení 800 kN už mikroštruktúra vykazovala výrazne deformovaný charakter s hustou sieťou deformačných pásov, ktoré prekryvali pôvodnú štruktúru zrn. Hranice pôvodných zrn boli stále pozorovateľné, ale menej výrazné, zatiaľ čo žihacie dvojčatá boli takmer nerozlíšiteľné (Obr. 3d). Výsledky tak potvrdzujú, že zvyšujúce sa tlakové zaťaženie vedie k postupnému prekrytiu pôvodnej austenitickej mikroštruktúry deformačnými pásmi, pričom výraznejšia mikroštruktúrna odozva bola pozorovaná najmä pri vyšších úrovniach zaťaženia.



Obr. 3 Mikroštruktúrna analýza ocelí po plastickej deformácii tlakom; a) AISI 304 – 300kN, b) AISI 304 700kN, c) AISI 316L – 200kN, d) AISI 316L – 800kN, lept.

Mikroštruktúrna analýza po deformácii jednoosovým ťahom

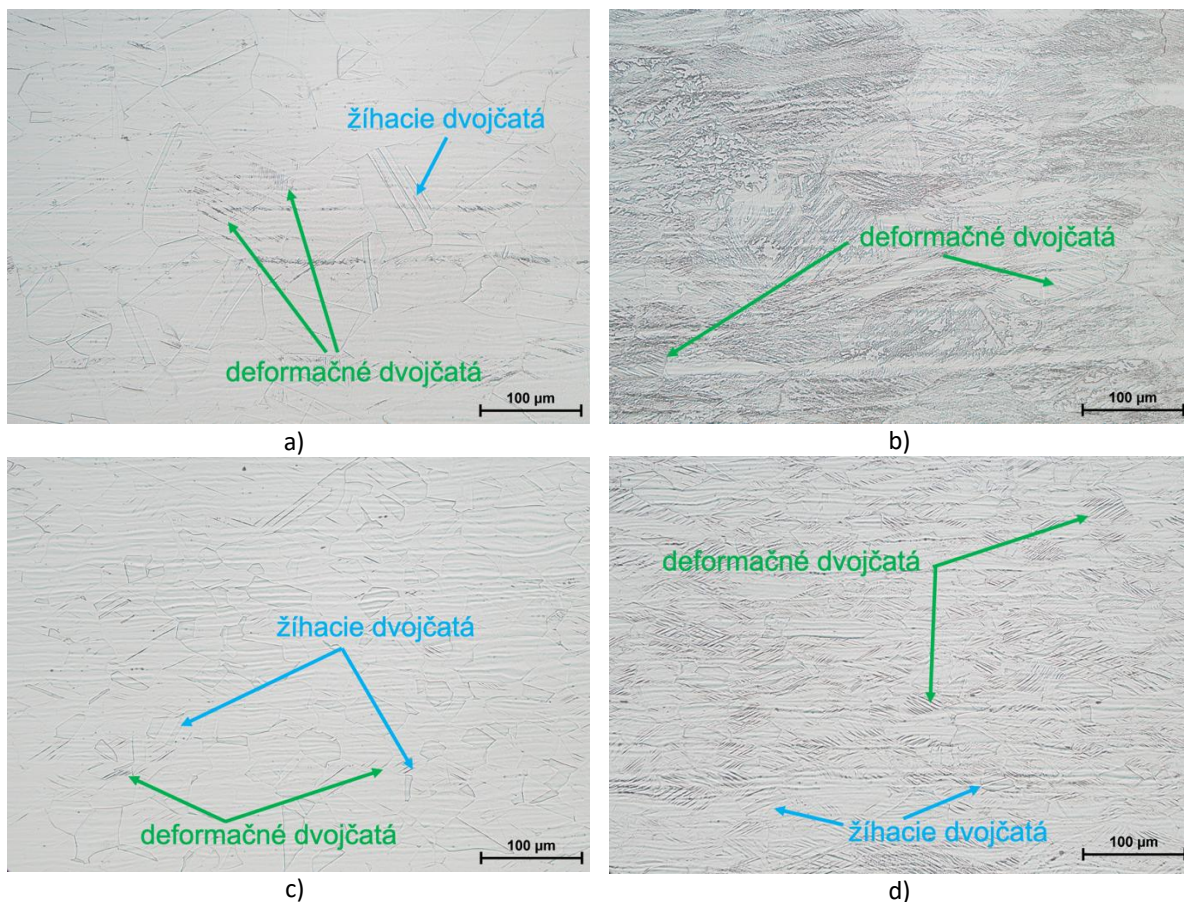
Pri jednoosovej ťahovej deformácii rýchlosťou posuvu prierečníka 0,5 mm/min boli pri oboch oceliach pozorované mikroštruktúrne zmeny súvisiace so zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie. Pri oceli AISI 304 po 15 % deformácii zostali pôvodné polyedrické austenitické zrná ešte dobre rozlíšiteľné, pričom vo viacerých zrnách boli pozorované žihacie aj deformačné dvojčatá (Obr. 4a). Pri 85 % deformácii bola mikroštruktúra výrazne ovplyvnená plastickou deformáciou. Pôvodné znaky austenitickej štruktúry boli menej čitateľné a žihacie dvojčatá bolo možné identifikovať už iba lokálne, najmä pri väčšom zväčšení (Obr. 4b).

Pri oceli AISI 316L mala mikroštruktúra po 25 % deformácii prevažne zachovaný austenitický charakter s dobre rozlíšiteľnými hranicami zŕn a žihacími dvojčatami. Deformačné dvojčatá sa vyskytovali iba lokálne a v menšom množstve (Obr. 4c). Pri 70 % deformácii bol pozorovaný výrazný nárast deformačných dvojčiat, avšak aj pri tomto stupni deformácie zostali žihacie dvojčatá a pôvodné znaky austenitickej mikroštruktúry stále dobre identifikovateľné (Obr. 4d).

Porovnanie oboch ocelí ukazuje, že AISI 304 vykazuje pri deformácii rýchlosťou 0,5 mm/min výraznejšie prekrytie pôvodnej austenitickej mikroštruktúry deformačnými útvarmi. Oceľ AISI 316L si aj pri vyššom stupni deformácie zachovala čitateľnejší austenitický charakter, čo poukazuje na vyššiu stabilitu austenitickej fázy v porovnaní s AISI 304.

Pri vyšších rýchlostiach posuvu prierečníka, teda 5 mm/min a 50 mm/min, bol pri oboch oceliach pozorovaný obdobný trend ako pri rýchlosti 0,5 mm/min. So zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie narastal výskyt deformačných útvarov a pôvodná austenitická mikroštruktúra bola postupne výraznejšie prekrytá deformáciou. Pri oceli AISI 304 boli tieto zmeny výraznejšie, najmä pri

vyšších stupňoch deformácie, kde bola čitateľnosť pôvodných zŕn a žihacích dvojčiat znížená. Pri oceli AISI 316L zostala mikroštruktúra aj pri vyšších rýchlostiach deformácie relatívne čitateľnejšia, pričom žihacie dvojčatá a hranice austenitických zŕn boli lepšie rozlíšiteľné. Tento rozdiel opäť poukazuje na vyššiu mikroštruktúrnú stabilitu ocele AISI 316L v porovnaní s AISI 304.



Obr. 4 Mikroštruktúra austenitických ocelí po jednoosovej ťahovej deformácii pri rýchlosti posuvu prierečníka 0,5 mm/min: a) AISI 304 – 15 %, b) AISI 304 – 85 %, c) AISI 316L – 25 %, d) AISI 316L – 70 %.

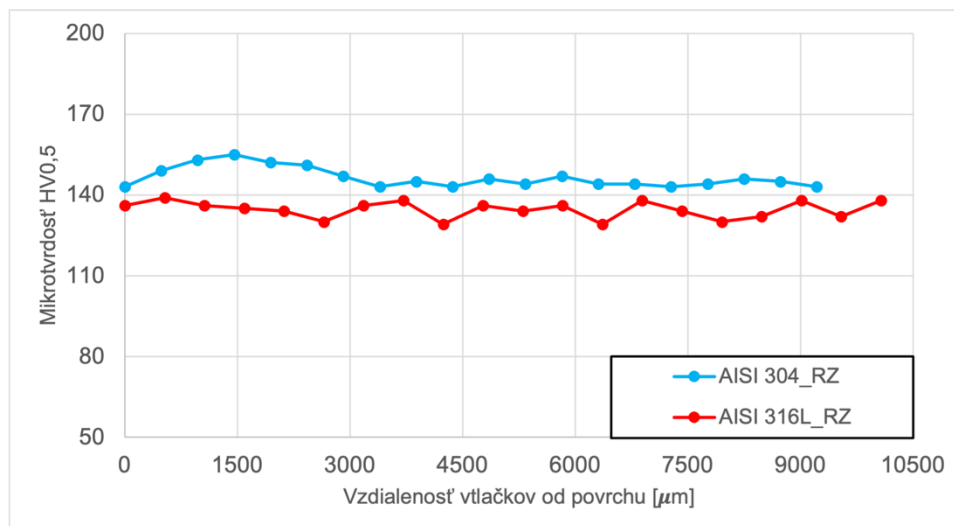
Meranie mikrotvrdości

Meranie mikrotvrdości po plastickej deformácii tlakom

Na Obr. 5 je znázornený priebeh mikrotvrdości ocelí AISI 304 a AISI 316L po rozpúšťacom žíhaní v závislosti od vzdialenosti jednotlivých vtlačkov od povrchu vzorky. Meranie bolo realizované metódou Vickers pri zaťažení HV 0,5. Namerané hodnoty pre oceľ AISI 304 sa pohybovali v intervale 143 až 155 HV0,5, pričom priemerná hodnota mikrotvrdości dosiahla 146 HV0,5. Pri oceli AISI 316L boli namerané hodnoty v rozsahu 129 až 139 HV0,5 s priemernou hodnotou 135 HV0,5.

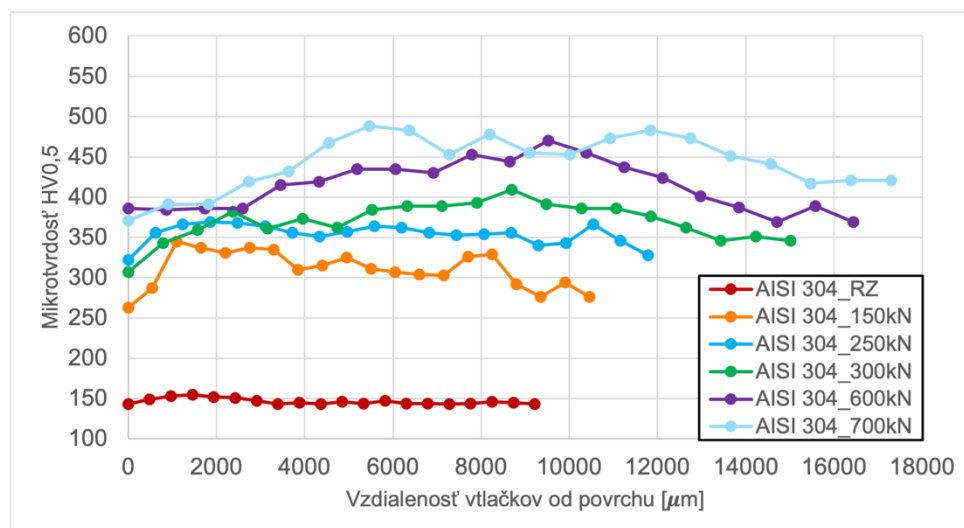
Priebeh mikrotvrdości pri oboch materiáloch vykazuje rovnomerný charakter, bez výrazných výkyvov mikrotvrdości, čo naznačuje homogénny stav materiálu po rozpúšťacom žíhaní v hodnotenej oblasti prierezu. Z porovnania oboch materiálov vyplýva, že oceľ AISI 304 dosahovala po rozpúšťacom žíhaní vyššiu mikrotvrdość ako oceľ AISI 316L. Rozdiel medzi priemernými hodnotami predstavoval približne 11 HV0,5. Napriek tomuto rozdielu možno pri oboch materiáloch konštatovať relatívne rovnomerný priebeh mikrotvrdości bez výrazného rozdielu medzi mikrotvrdoťou tesne pod povrchom vzorky a jadrom vzorky.

Po plastickej deformácii tlakom došlo pri oceli AISI 304 k výraznému zvýšeniu mikrotvrdości vo všetkých hodnotených stavoch. Priemerná hodnota vzrástla zo 146 HV_{0,5} v stave po rozpúšťacom žíhaní na 310 HV_{0,5} pri 150 kN, 354 HV_{0,5} pri 250 kN, 370 HV_{0,5} pri 300 kN, 414 HV_{0,5} pri 600 kN a 443 HV_{0,5} pri 700 kN (Obr. 6). Tento nárast potvrdzuje výrazné deformačné spevnenie so zvyšujúcou sa intenzitou plastickej deformácie.



Obr. 5 Mikrotvrdosť austenitických ocelí AISI 304 a AISI 316L po rozpúšťacom žíhaní

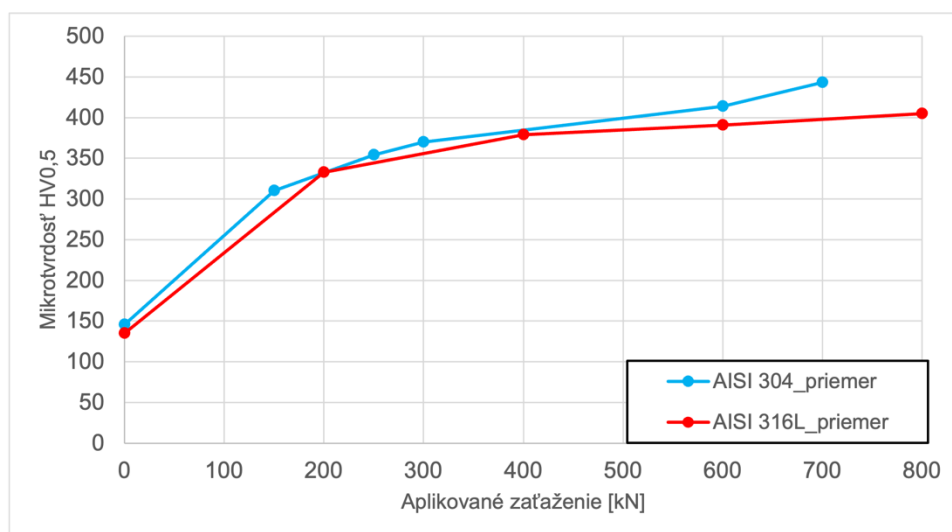
Z priebehu kriviek zároveň vyplýva, že deformácia tlakom neviedla iba k celkovému zvýšeniu mikrotvrdości, ale aj k jej nerovnomernému rozloženiu v priereze vzorky. Po deformácii mali krivky členitejší charakter a jednotlivé priebehy sa miestami približovali alebo prekrývali, čo poukazuje na lokálne rozdiely v rozložení plastickej deformácie. Najvyššia priemerná mikrotvrdosť bola nameraná pri zaťažení 700 kN, pričom priebeh krivky naznačuje výraznejšie spevnenie v oblasti jadra vzorky v porovnaní s jej okrajom.



Obr. 6 Meranie mikrotvrdości po plastickej deformácii tlakom AISI 304

Porovnaním priemerných hodnôt mikrotvrdości možno pozorovať, že plastická deformácia tlakom spôsobila výrazné spevnenie oboch hodnotených ocelí. Priebeh kriviek nebol lineárny, keďže najprudší nárast mikrotvrdości nastal už prvých meraných vzorkách (150 kN – AISI 304 a 200 kN AISI 316L).

Pri ďalšom zvyšovaní použitého zaťaženia mikrotvrdosť nadálej narastala, avšak miernejšie (Obr. 7). Z uvedeného vyplýva, že po tlakovej deformácii došlo k výraznejšiemu celkovému spevneniu ocele AISI 304 v porovnaní s oceľou AISI 316L.

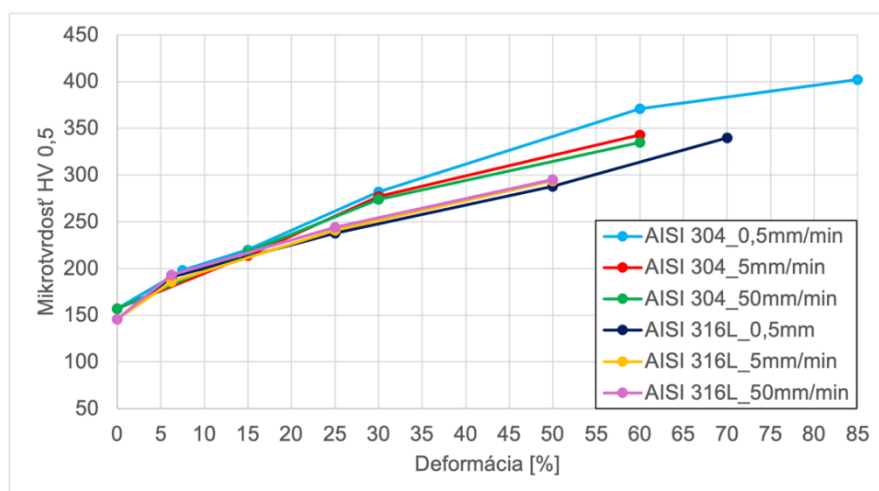


Obr. 7 Porovnanie priemerných hodnôt mikrotvrdosti austenitickej oceli AISI 304 a AISI 316L po deformácii tlakom

Meranie mikrotvrdosti po deformácii jednoosovým ťahom

Na Obr. 8 je znázornené porovnanie priemerných hodnôt mikrotvrdosti ocelí AISI 304 a AISI 316L po riadenej deformácii jednoosovým ťahom pri rôznych rýchlostiach posuvu priečnika. Súhrn minimálnych, maximálnych a priemerných hodnôt mikrotvrdosti je uvedený v Tab. 3 a Tab. 4. Pri oboch materiáloch bol pozorovaný rast mikrotvrdosti so zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie, pričom výraznejšie spevnenie bolo zaznamenané pri oceli AISI 304.

Pri oceli AISI 304 vzrástla priemerná mikrotvrdosť zo 157 HV_{0,5} v stave po rozpúšťacom žíhaní až na 402 HV_{0,5} pri 85 % deformácii a rýchlosti 0,5 mm/min. Pri 60 % deformácii dosiahla mikrotvrdosť 371 HV_{0,5} pri 0,5 mm/min, 343 HV_{0,5} pri 5 mm/min a 335 HV_{0,5} pri 50 mm/min. Z uvedeného vyplýva, že pri vyšších deformáciách dosahovala AISI 304 najvyššie hodnoty mikrotvrdosti pri najnižšej rýchlosti posuvu priečnika.



Obr. 8 Priemerné hodnoty mikrotvrdosti austenitických ocelí AISI 304 a AISI 316L po deformácii jednoosovým ťahom a rôznych rýchlostiach posuvu priečnika

Pri oceli AISI 316L bol taktiež pozorovaný rast mikrotvrdosti so zvyšujúcou sa deformáciou, avšak menej výrazný ako pri AISI 304. Maximálna priemerná hodnota dosiahla 340 HV_{0,5} pri 70 % deformácii a rýchlosti 0,5 mm/min. Pri 50 % deformácii boli hodnoty pri jednotlivých rýchlostiach veľmi podobné, a to 288 HV_{0,5} pri 0,5 mm/min, 294 HV_{0,5} pri 5 mm/min a 295 HV_{0,5} pri 50 mm/min. Vplyv rýchlosti posuvu priechnika bol teda pri AISI 316L menej výrazný. Celkovo možno konštatovať, že jednoosová ťahová deformácia spôsobila výraznejšie deformačné spevnenie ocele AISI 304, čo súvisí s jej vyššou metastabilitou a pravdepodobne aj intenzívnejšou tvorbou deformačne indukovaného α' -martenzitu.

Tab. 3 Namerané hodnoty mikrotvrdosti po deformácii jednoosovým ťahom na oceli AISI 304

AISI 304	stav – deformácia [%]	minimum [HV 0,5]	maximum [HV 0,5]	priemer [HV 0,5]
	RZ - 0	145	172	157
0,5 mm/min	7,5	186	215	198
	15	196	237	220
	30	246	328	282
	60	316	391	371
	85	387	421	402
5 mm/min	15	185	234	214
	30	255	294	277
	60	319	373	343
50 mm/min	15	202	235	218
	30	261	288	274
	60	306	386	335

Tab. 4 Namerané hodnoty mikrotvrdosti po deformácii jednoosovým ťahom na oceli AISI 316L

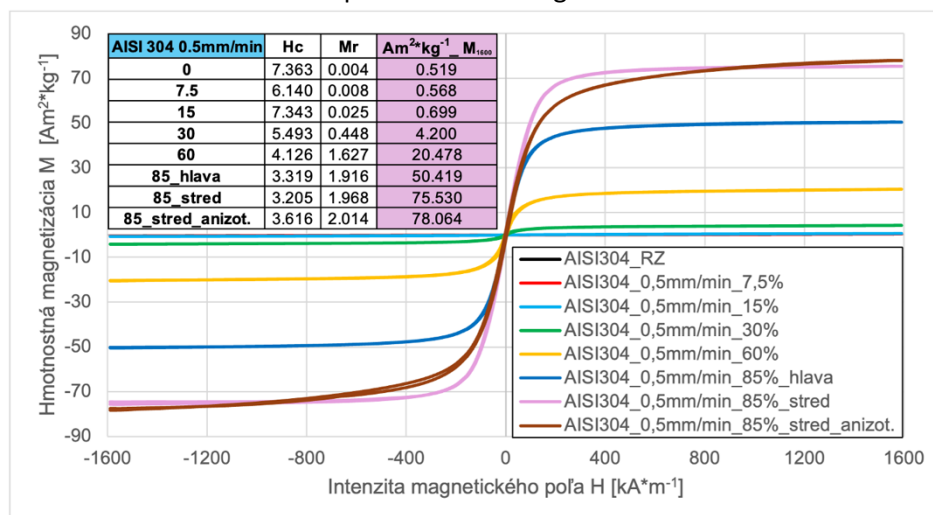
AISI 316L	stav – deformácia [%]	minimum [HV 0,5]	maximum [HV 0,5]	priemer [HV 0,5]
	RZ - 0	127	158	146
0,5 mm/min	6,25	181	250	191
	25	223	254	238
	50	271	303	288
	70	315	356	340
5 mm/min	6,25	175	199	186
	25	233	244	241
	50	270	325	294
50 mm/min	6,25	179	219	193
	25	233	256	244
	50	278	316	295

Meranie magnetických vlastností

Magnetické správanie ocele AISI 304 po jednoosovej ťahovej deformácii bolo hodnotené pomocou VSM meraní. Na Obr. 9 sú znázornené hysterézne slučky hmotnostnej magnetizácie vzoriek deformovaných pri rýchlosti posuvu prierečníka 0,5 mm/min, zatiaľ čo Obr. 10 zobrazuje hysterézne slučky pri rýchlosti 50 mm/min. Cieľom porovnania bolo posúdiť vplyv stupňa plastickej deformácie a rýchlosti posuvu prierečníka na zmenu magnetickej odozvy ocele AISI 304.

V stave po rozpúšťacom žíhaní vykazovala oceľ AISI 304 iba veľmi nízku magneticú odozvu, čo zodpovedá dominantne paramagnetickému charakteru austenitickej matrice. Pri rýchlosti 0,5 mm/min bol so zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie pozorovaný postupný nárast hmotnostnej magnetizácie. Pri nižších deformáciách 7,5 % a 15 % zostávali hysterézne slučky úzke a ich priebeh sa výrazne neodlišoval od východiskového stavu. Výraznejšia zmena magnetickeho správania sa prejavila až pri vyšších stupňoch deformácie, najmä od 30 %, kde došlo k rozšíreniu hysteréznej slučky a k nárastu remanentnej magnetizácie. Tento trend pokračoval aj pri 60 % deformácii.

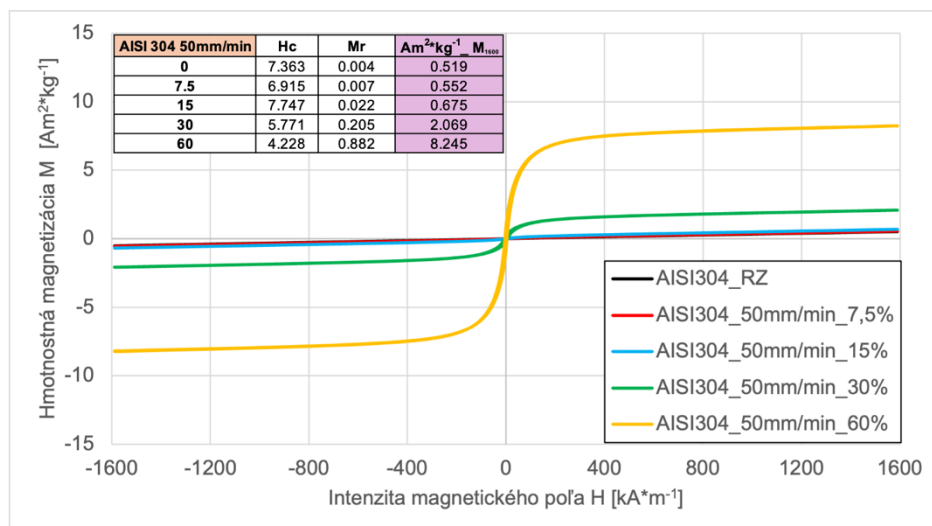
Najvýraznejšia magneticá odozva bola nameraná pri 85 % deformácii. V tomto stave boli vykonané merania z rôznych častí, resp. orientácií vzorky. Hmotnostná magnetizácia pri maximálnej intenzite magnetickeho poľa dosiahla v oblasti bližšie k hlave skúšobnej vzorky hodnotu $50,419 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$, zatiaľ čo v stredovej časti drieku bola nameraná hodnota $75,530 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. Pri meraní označenom ako stred – anizotropia bola zaznamenaná porovnateľne vysoká hodnota $78,064 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. Rozdiel medzi hodnotami nameranými v rôznych častiach vzorky poukazuje na nerovnomernú magneticú odozvu pozdĺž deformovanej oblasti, čo môže súvisieť s nerovnomerným rozložením plastickej deformácie pri vysokom stupni predĺženia. Z pohľadu koercitívneho poľa bolo pri vyšších stupňoch deformácie pozorované jeho zníženie. Kým pri 30 % deformácii dosahovalo H_c hodnotu $5,493 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, pri 85 % deformácii sa pohybovalo približne v intervale 3,205 až $3,616 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ v závislosti od miesta a orientácie odberu vzorky. Naopak, remanentná magnetizácia so zvyšujúcou sa deformáciou výrazne vzrástla, pričom pri 85 % deformácii dosahovala približne $2 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$.



Obr. 9 Hysterézne slučky hmotnostnej magnetizácie ocele AISI 304 po deformácii jednoosovým ťahom rýchlosťou posuvu prierečníka 0,5 mm/min v celom rozsahu aplikovaného magnetickeho poľa

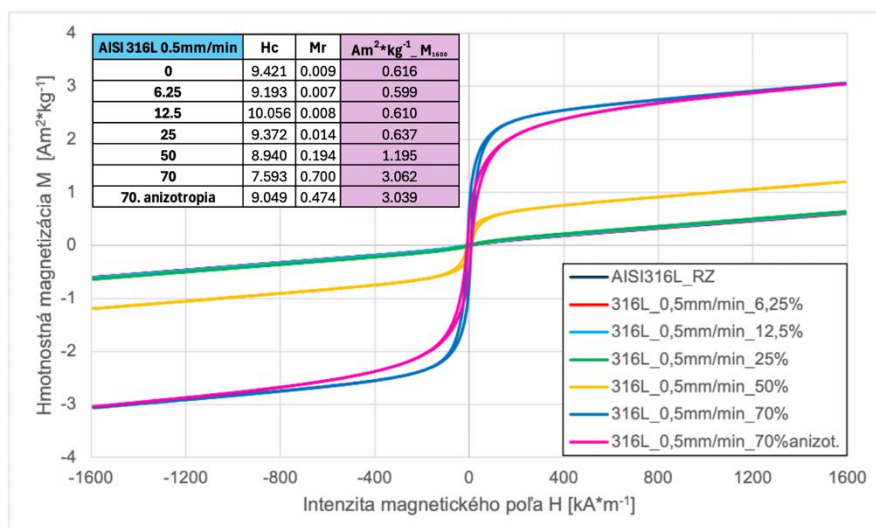
Pri rýchlosti posuvu prierečníka 50 mm/min bol pozorovaný rovnaký základný trend, teda nárast magnetickej odozvy so zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie. Tento nárast bol však v porovnaní s rýchlosťou 0,5 mm/min menej výrazný. Pri rovnakom stupni deformácie dosahovali vzorky deformované vyššou rýchlosťou nižšiu hmotnostnú magnetizáciu. Výsledky preto naznačujú, že vyššia rýchlosť posuvu prierečníka viedla pri oceli AISI 304 k slabšej magnetickej odozve.

Celkovo možno konštatovať, že plastická deformácia jednoosovým ťahom výrazne ovplyvnila magnetické správanie ocele AISI 304. So zvyšujúcim sa stupňom deformácie dochádzalo k nárastu hmotnostnej magnetizácie a remanentnej magnetizácie, čo poukazuje na vznik feromagnetickú fázy v pôvodne paramagnetickej austenitickej matici. Výraznejšia magnetická odozva pri rýchlosti 0,5 mm/min v porovnaní s 50 mm/min naznačuje, že rýchlosť deformácie ovplyvňuje intenzitu deformačne indukovanej martenzitickej transformácie.



Obr. 10 Hysterézne slučky hmotnostnej magnetizácie ocele AISI 304 po deformácii jednoosovým ťahom rýchlosťou posuvu prietokníka 50 mm/min v celom rozsahu aplikovaného magnetického poľa

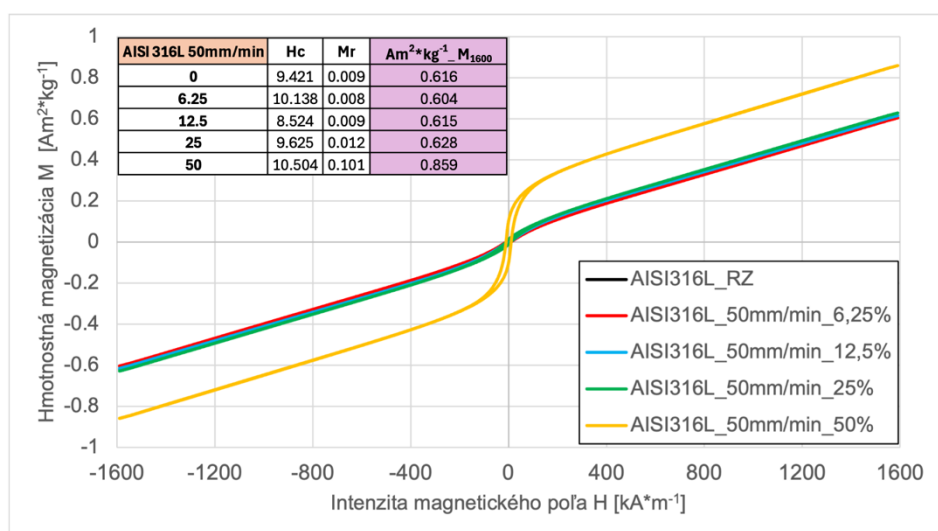
Magnetické správanie ocele AISI 316L po jednoosovej ťahovej deformácii bolo hodnotené pomocou VSM meraní, pričom vzhľadom na vyššiu stabilitu austenitickej matrice sa očakávala slabšia magnetická odozva v porovnaní s oceľou AISI 304. Pri rýchlosti posuvu prietokníka 0,5 mm/min boli hysterézne slučky pri nižších stupňoch deformácie 6,25 %, 12,5 % a 25 % veľmi úzke a ich priebeh sa len minimálne odlišoval od stavu po rozpúšťacom žíhaní (Obr. 11). Táto skutočnosť poukazuje na nízku mieru feromagnetického príspevku a zachovanie dominantne paramagnetického charakteru austenitickej matrice. Viditeľnejšia zmena magnetickej odozvy bola pozorovaná až pri vyšších stupňoch plastickej deformácie. Pri 50 % deformácii došlo k miernemu rozšíreniu hysteréznej slučky a k nárastu remanentnej magnetizácie. Najvýraznejšia magnetická odozva pri rýchlosti 0,5 mm/min bola zaznamenaná pri 70 % deformácii, kde hmotnostná magnetizácia pri maximálnej intenzite magnetického poľa dosiahla približne $3 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. V porovnaní s nižšími deformáciami išlo o zreteľný nárast, avšak absolútna hodnota magnetizácie zostala výrazne nižšia ako pri oceli AISI 304 deformovanej za porovnateľných podmienok.



Obr. 11 Hysterézne slučky hmotnostnej magnetizácie ocele AISI 316L po deformácii jednoosovým ťahom rýchlosťou posuvu prierečníka 0,5 mm/min v celom rozsahu aplikovaného magnetického poľa

Pri 70 % deformácii boli vykonané dve merania s rozdielnou orientáciou vzorky, pričom hmotnostná magnetizácia pri maximálnom magnetickom poli bola v oboch prípadoch veľmi podobná. Rozdiel sa prejavil najmä v oblasti nízkych intenzít magnetického poľa, kde sa odlišoval tvar hysteréznej slučky, remanentná magnetizácia a hodnota koerčívneho poľa.

Pri rýchlosti posuvu prierečníka 50 mm/min bola magnetická odozva ocele AISI 316L ešte slabšia. Hysterézne slučky pri deformáciách 6,25 %, 12,5 % a 25 % boli veľmi úzke a v celkovom rozsahu aplikovaného magnetického poľa vykazovali takmer lineárny priebeh magnetizácie (Obr. 12). Mierne rozšírenie hysteréznej slučky bolo pozorované až pri 50 % deformácii, avšak aj v tomto stave zostala hmotnostná magnetizácia pri maximálnej intenzite magnetického poľa nízka a dosiahla približne 0,859 Am²·kg⁻¹. Remanentná magnetizácia bola taktiež nízka, čo naznačuje, že prípadný feromagnetický príspevok bol pri tejto rýchlosti deformácie veľmi obmedzený.



Obr. 12 Hysterézne slučky hmotnostnej magnetizácie ocele AISI 316L po deformácii jednoosovým ťahom rýchlosťou posuvu prierečníka 50 mm/min v celom rozsahu aplikovaného magnetického poľa

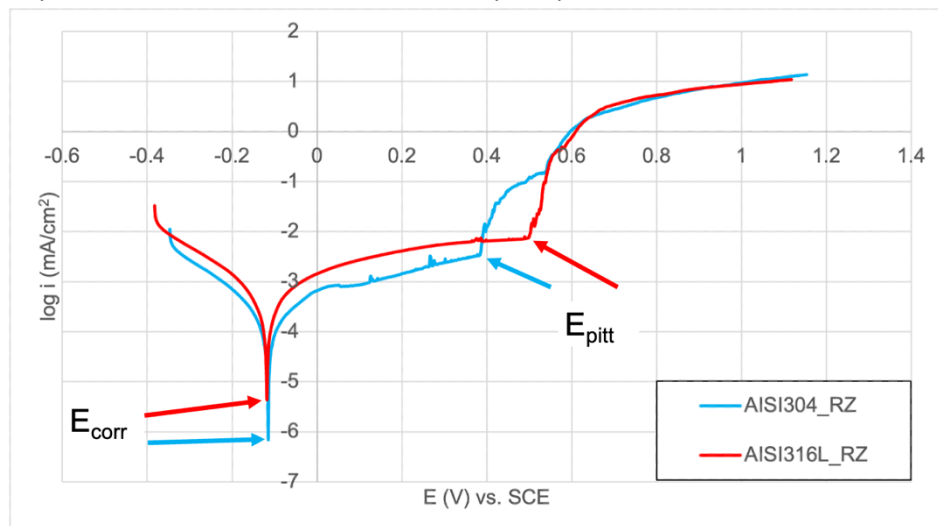
Z porovnania oboch rýchlostí vyplýva, že pri oceli AISI 316L dochádzalo so zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie iba k miernemu nárastu magnetickej odozvy. Výraznejšia zmena bola pozorovaná najmä pri najvyšších hodnotách deformácie a pri nižšej rýchlosti posuvu prierečníka 0,5 mm/min. Celkovo

však oceľ AISI 316L vykazovala výrazne slabšiu magnetickú odozvu než oceľ AISI 304, čo potvrdzuje vyššiu stabilitu austenitickej fázy a nižšiu náchylnosť na deformačne indukovanú martenzitickú transformáciu. Z celkového tvaru krivky preto vyplýva, že ani pri 50 % deformácii nemožno magnetické správanie ocele AISI 316L označiť za výrazne feromagnetické; skôr sa jedná o dominantnú paramagnetickú odozvu austenitickej štruktúry s veľmi slabým feromagnetickým príspevkom.

Korózne vlastnosti austenitických ocelí po deformácii jednoosovým ťahom

Po rozpúšťacom žíhaní vykazovali ocele AISI 304 a AISI 316L porovnateľné hodnoty korózneho potenciálu E_{corr} (Obr. 13, Tab. 5). Pri oceli AISI 304 bola nameraná hodnota $E_{\text{corr}} = -0,117$ V vs. SCE a pri oceli AISI 316L hodnota $E_{\text{corr}} = -0,122$ V vs. SCE, pričom rozdiel 0,005 V je z elektrochemického hľadiska zanedbateľný.

Výraznejšie rozdiely boli pozorované pri koróznej prúdovej hustote i_{corr} a depasivačnom potenciáli E_{pit} . Oceľ AISI 304 dosiahla nižšiu hodnotu $i_{\text{corr}} = 0,200 \cdot 10^{-3}$ mA/cm², zatiaľ čo pri AISI 316L bola nameraná hodnota $i_{\text{corr}} = 0,522 \cdot 10^{-3}$ mA/cm². Z hľadiska odolnosti proti bodovej korózii však dosiahla priaznivejšie výsledky oceľ AISI 316L, pri ktorej bol stanovený vyšší depasivačný potenciál $E_{\text{pit}} = 0,499$ V vs. SCE v porovnaní s hodnotou $E_{\text{pit}} = 0,384$ V vs. SCE pri AISI 304. Vyššia hodnota E_{pit} poukazuje na vyššiu stabilitu pasívnej vrstvy ocele AISI 316L v 0,9 % roztoku NaCl pri teplote 37 °C.



Obr. 13 Potenciodynamické polarizačné krivky ocelí AISI 304 a AISI 316L po rozpúšťacom žíhaní v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C s vyznačením E_{corr} a E_{pit}

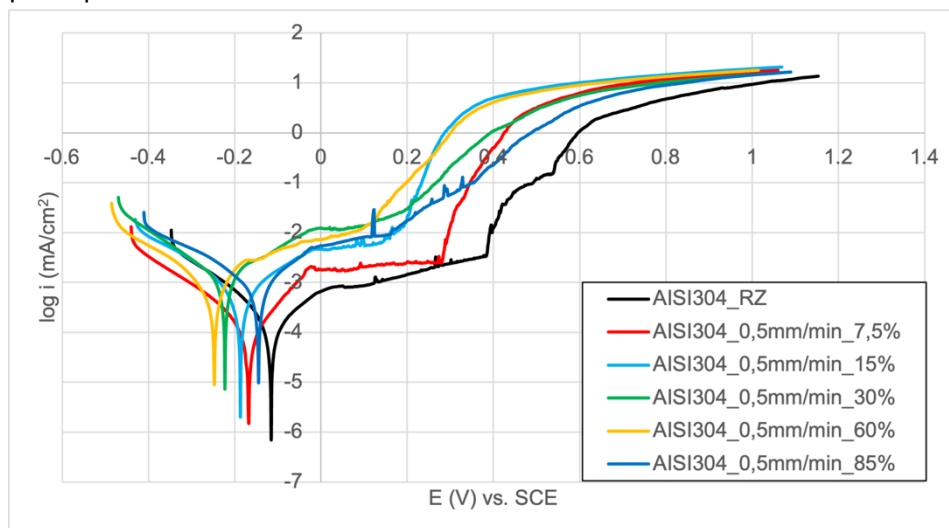
Tab. 5 Namerané hodnoty elektrochemických parametrov austenitických ocelí AISI 304 a 316L po rozpúšťacom žíhaní získané z potenciodynamických polarizačných kriviek

materiál	E_{pit} [V]	E_{corr} [V]	i_{corr} (*10 ⁻³ mA/cm ²)
AISI 304	0,384	-0,117	0,200
AISI 316L	0,499	-0,122	0,522

Potenciodynamické polarizačné krivky ocele AISI 304 po rozpúšťacom žíhaní a po riadenej plastickej deformácii jednoosovým ťahom pri rýchlostiach posuvu prierečníka 0,5 mm/min a 50 mm/min sú uvedené na Obr. 14 a Obr. 15. Namerané hodnoty korózneho potenciálu E_{corr} , depasivačného potenciálu E_{pit} a koróznej prúdovej hustoty i_{corr} sú zhrnuté v Tab. 6. Pri hodnotení korózneho správania bola pozornosť zameraná najmä na zmenu stability pasívnej vrstvy po plastickej deformácii, keďže depasivačný potenciál E_{pit} predstavuje významný parameter odolnosti proti iniciácii bodovej korózie v chloridovom prostredí.

Pri rýchlosti posuvu priečnika 0,5 mm/min bol pri všetkých deformovaných vzorkách zaznamenaný pokles depasivačného potenciálu E_{pit} v porovnaní so stavom po rozpúšťacom žíhaní. Tento výsledok poukazuje na zníženie odolnosti proti lokálnemu porušeniu pasívnej vrstvy po plastickej deformácii. Najvýraznejší pokles bol pozorovaný pri 60 % deformácii, kde bola stanovená hodnota $E_{pit} = 0,096$ V. Pri najvyššej hodnotenej deformácii 85 % došlo k miernemu zvýšeniu depasivačného potenciálu na $E_{pit} = 0,116$ V, avšak táto hodnota zostala stále výrazne nižšia ako v stave po rozpúšťacom žíhaní. Z uvedeného vyplýva, že plastická deformácia pri rýchlosti 0,5 mm/min mala celkovo nepriaznivý vplyv na stabilitu pasívnej vrstvy ocele AISI 304.

Podobný trend bol pozorovaný aj pri hodnotení korózneho potenciálu E_{corr} . Po plastickej deformácii sa hodnoty E_{corr} vo všeobecnosti posúvali k negatívnejším hodnotám v porovnaní s vyžíhaným stavom, pričom najzápornejšia hodnota bola nameraná pri 60 % deformácii. Tento posun môže naznačovať zníženie elektrochemickej stability povrchu po deformácii. Pri 85 % deformácii bol zaznamenaný opätovný posun E_{corr} smerom k pozitívnejším hodnotám, čo poukazuje na to, že vývoj korózneho správania nemal striktné lineárny charakter so zvyšujúcim sa stupňom deformácie. Korózna prúdová hustota i_{corr} nevykazovala jednoznačný monotónny priebeh. Najnižšia hodnota bola nameraná pri 7,5 % deformácii, zatiaľ čo vyššie deformácie sa vyznačovali zvýšenou prúdovou odozvou v porovnaní so stavom po rozpúšťacom žíhaní.

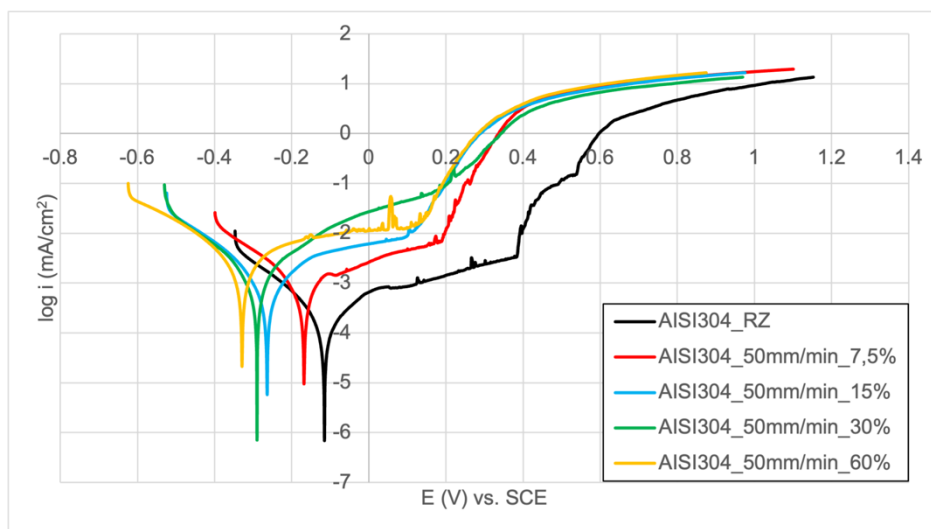


Obr. 14 Potenciodynamické polarizačné krivky ocele AISI 304 pri rýchlosti posuvu priečnika 0,5 mm/min v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C

Pri rýchlosti posuvu priečnika 50 mm/min sa vplyv plastickej deformácie prejavil najmä posunom anodických vetiev polarizačných kriviek smerom k nižším potenciálom. Tento posun naznačuje skoršie porušenie pasívnej vrstvy a nižšiu odolnosť proti bodovej korózii po deformácii. Všetky deformované vzorky dosiahli nižšie hodnoty E_{pit} ako vzorka po rozpúšťacom žíhaní. Najvyšší depasivačný potenciál spomedzi deformovaných stavov bol zaznamenaný pri 7,5 % deformácii, zatiaľ čo pri vyšších stupňoch deformácie došlo k jeho ďalšiemu poklesu. Pri deformáciách 30 % a 60 % boli hodnoty E_{pit} veľmi podobné, čo opäť naznačuje, že pokles odolnosti proti bodovej korózii nemal pri vyšších deformáciách plynulý lineárny priebeh.

Výraznejšie rozdiely pri rýchlosti 50 mm/min boli pozorované aj pri hodnotách E_{corr} a i_{corr} . Korózný potenciál E_{corr} sa pri deformovaných vzorkách posúval k negatívnejším hodnotám, pričom najvýraznejší posun bol zaznamenaný pri 60 % deformácii. Táto vzorka zároveň vykazovala najvyššiu hodnotu korózneho prúdového hustoty i_{corr} . Na rozdiel od rýchlosti 0,5 mm/min mala hodnota i_{corr} pri rýchlosti 50 mm/min zreteľnejšiu rastúcu tendenciu so zvyšujúcim sa stupňom deformácie. Tento jav poukazuje

na intenzívnejšiu elektrochemickú aktivitu povrchu pri vyšších stupňoch deformácie a vyššej rýchlosti posuvu priečnika.



Obr. 15 Potenciodynamické polarizačné krivky ocele AISI 304 pri rýchlosti posuvu priečnika 50 mm/min v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C

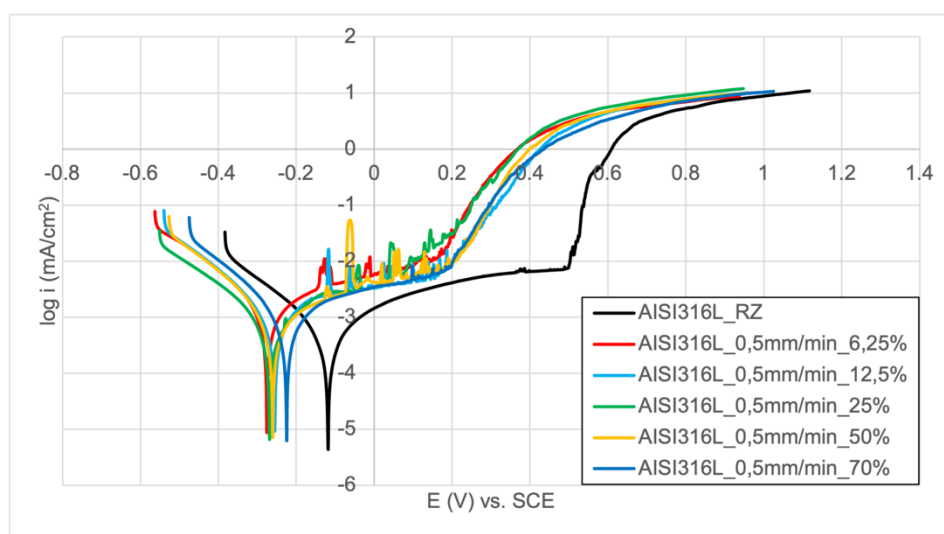
Celkovo možno konštatovať, že plastická deformácia jednoosovým ťahom zhoršila korózne správanie ocele AISI 304 v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C, predovšetkým z hľadiska poklesu depasivačného potenciálu E_{pit} . Tento pokles naznačuje zníženie stability pasívnej vrstvy a vyššiu náchylnosť na lokálne porušenie pasivity v chloridovom prostredí. Nepriaznivý vplyv deformácie možno pravdepodobne pripísať zvýšenej hustote porúch kryštálovej mriežky, vyššej vnútornej energii materiálu, lokálnemu poškodeniu povrchu a zmenám v stabilite pasívnej vrstvy. Pri vyššej rýchlosti deformácie 50 mm/min bol tento efekt výraznejší najmä z hľadiska rastu korózneho prúdového hustoty, čo poukazuje na vyššiu elektrochemickú aktivitu deformovaného povrchu.

Tab. 6 Namerané hodnoty elektrochemických parametrov austenitickej ocele AISI 304 po rôznych rýchlostiach posuvu priečnika

AISI 304	stav - deformácia [%]	E_{pit} [V]	E_{corr} [V]	i_{corr} (*10 ⁻³ mA/cm ²)
	0 - RZ	0,384	-0,117	0,200
0,5 mm/min	7,5	0,280	-0,168	0,143
	15	0,143	-0,187	0,692
	30	0,144	-0,226	1,106
	60	0,096	-0,250	0,732
	85	0,116	-0,147	1,030
5 mm/min	7,5	0,128	-0,198	0,835
	15	0,109	-0,152	0,965
	30	0,294	-0,159	0,721
	60	0,112	-0,256	0,654
50 mm/min	7,5	0,198	-0,168	0,913
	15	0,096	-0,263	1,064
	30	0,120	-0,289	1,413
	60	0,119	-0,330	2,550

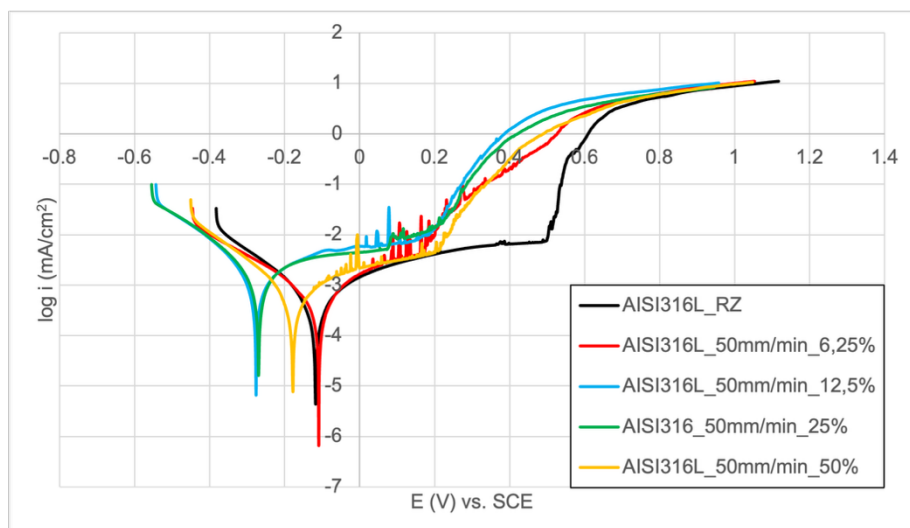
Pri oceli AISI 316L deformovanej rýchlosťou posuvu priečnika 0,5 mm/min bol v porovnaní so stavom po rozpúšťacom žíhaní pozorovaný posun anodických vetiev smerom k nižším potenciálom (Obr. 16). Tento posun sa prejavil najmä poklesom depasivačného potenciálu E_{pit} , pričom všetky deformované vzorky dosiahli nižšie hodnoty ako referenčný stav. Súhrn nameraných hodnôt E_{corr} , E_{pit} a i_{corr} je uvedený v Tab. 7.

Najnižšia hodnota E_{pit} bola zaznamenaná pri 25 % deformácii, a to 0,036 V. Pri vyšších deformáciách došlo k jeho čiastočnému zvýšeniu na 0,178 V pri 50 % a 0,182 V pri 70 % deformácii. Napriek tomuto zvýšeniu zostali hodnoty E_{pit} výrazne nižšie ako po rozpúšťacom žíhaní. Korózný potenciál E_{corr} sa pri všetkých deformovaných stavoch posúval k negatívnejším hodnotám a korózna prúdová hustota i_{corr} bola po deformácii zvýšená, pričom najvyššia hodnota bola nameraná pri 70 % deformácii. Z tohto dôvodu nemožno čiastočné zvýšenie E_{pit} pri vyšších deformáciách hodnotiť ako jednoznačné zlepšenie korózneho správania.



Obr. 16 Potenciodynamické polarizačné krivky oceli AISI 316L pri rýchlosti posuvu priečnika 0,5 mm/min v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C

Pri rýchlosti posuvu priečnika 50 mm/min bol pri oceli AISI 316L opäť zaznamenaný pokles E_{pit} v porovnaní so stavom po rozpúšťacom žíhaní (Obr. 17). Najnižšia hodnota bola nameraná pri 25 % deformácii, zatiaľ čo pri 50 % deformácii došlo k jej opätovnému zvýšeniu. Aj v tomto prípade však E_{pit} zostal výrazne nižší ako pri referenčnej vzorke. Hodnoty i_{corr} boli pri všetkých deformovaných stavoch vyššie ako po rozpúšťacom žíhaní, pričom najvyššia prúdová hustota bola zaznamenaná pri 25 % deformácii.



Obr. 17 Potenciodynamické polarizačné krivky ocelí AISI 316L pri rýchlosti posuvu priečnika 50 mm/min v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C

Celkovo možno konštatovať, že plastická deformácia jednoosovým ťahom znížila elektrochemickú stabilitu ocele AISI 316L v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C. Deformované vzorky vykazovali kratší pasívny interval, skorší nárast anodickej prúdovej odozvy a nižšie hodnoty depasivačného potenciálu v porovnaní so stavom po rozpúšťacom žíhaní. Napriek tomu, že pri vyšších deformáciách došlo v niektorých prípadoch k čiastočnému zvýšeniu E_{pit} , celkové korózne správanie zostalo menej priaznivé ako vo východiskovom stave.

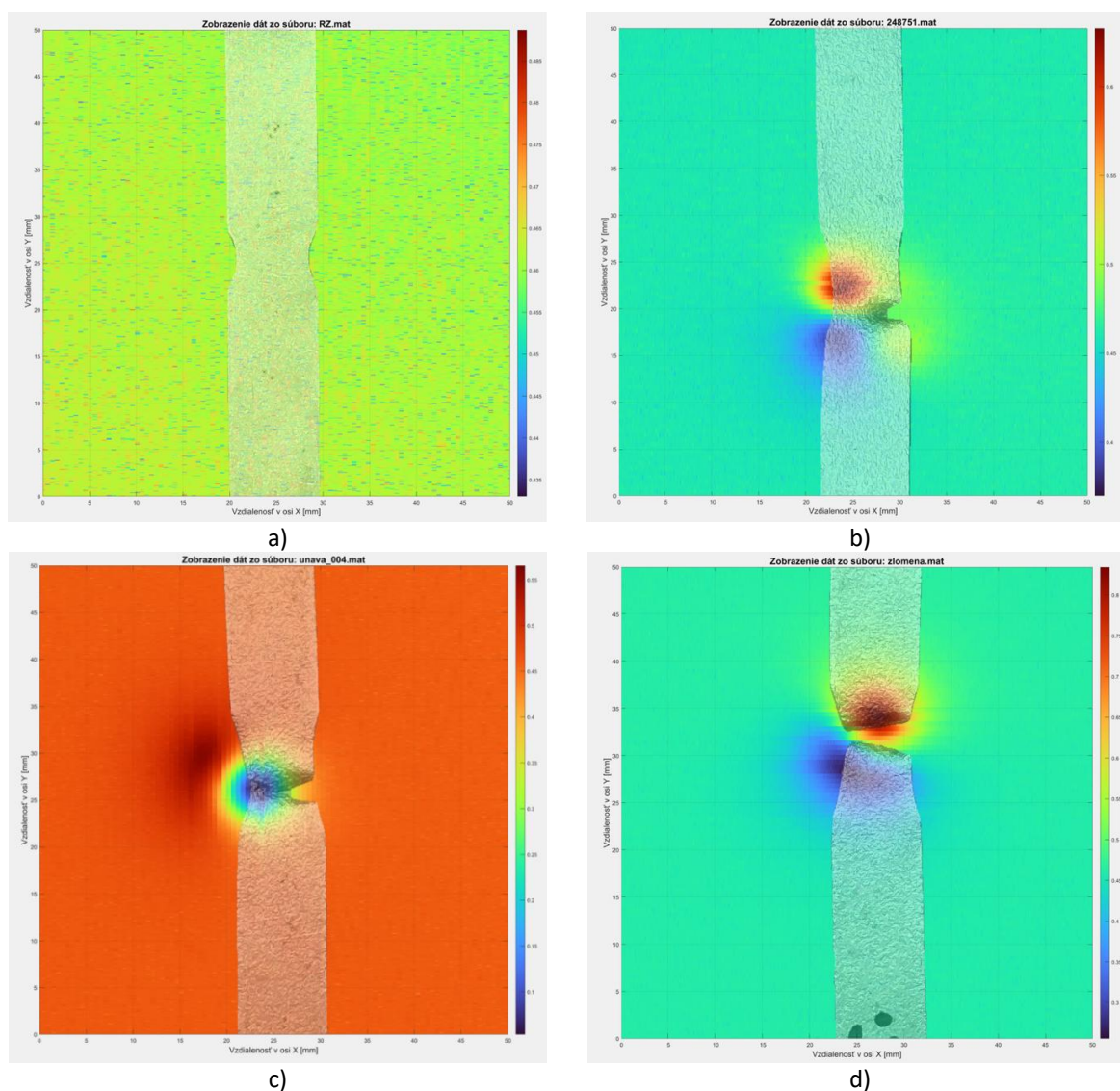
Tab. 7 Namerané hodnoty elektrochemických parametrov austenitickej ocele AISI 316L po rôznych rýchlostiach posuvu priečnika

AISI 316L	stav - deformácia [%]	E_{pit} [V]	E_{corr} [V]	i_{corr} (*10 ⁻³ mA/cm ²)
	0 - RZ	0,499	-0,122	0,522
0,5 mm/min	6,25	0,146	-0,274	0,964
	12,5	0,131	-0,252	0,517
	25	0,036	-0,272	0,817
	50	0,178	-0,258	0,595
	70	0,182	-0,224	0,983
5 mm/min	6,25	0,240	-0,143	0,645
	12,5	0,156	-0,180	0,502
	25	0,152	-0,259	1,002
	50	0,200	-0,069	0,487
50 mm/min	6,25	0,173	-0,112	0,564
	12,5	0,147	-0,276	1,337
	25	0,074	-0,271	1,567
	50	0,167	-0,178	0,624

Vyhodnotenie zmien magnetických vlastností na čele únavovej trhliny

Magnetické mapy vzoriek ocele AISI 304 po únavovej skúške ťah-ťah poukazujú na výraznú lokalizáciu magnetickej odozvy v okolí únavovej trhliny. V stave po rozpúšťacom žíhaní je mapa takmer

homogénna a bez výrazných lokálnych zmien (Obr. 18 a). Pri únavovo namáhaných vzorkách sa už v okolí čela trhliny alebo miesta lomu (Obr. 18b, Obr. 18c a Obr. 18d) vytvára viditeľný magnetický kontrast, ktorý sa prejavuje oblasťami so zvýšenou a zníženou hodnotou výstupného signálu senzora. Najvýraznejšia odozva bola pozorovaná priamo v blízkosti trhliny, resp. v oblasti finálneho porušenia vzorky. Pri vzorke označenej ako 248751 cyklov (Obr. 18b) je okrem intenzívnej lokálnej odozvy pri čele trhliny viditeľná aj slabšia rozšírená oblasť zmeneného signálu v jej okolí. Táto oblasť môže súvisieť s plasticky ovplyvnenou zónou pred čelom trhliny, prípadne so stopou predchádzajúceho šírenia trhliny. Keďže poloha vzorky v mapách je len orientačná a jednotlivé mapy boli získané na samostatných vzorkách (4 obrázky = 4 samostatné vzorky), výsledky boli hodnotené iba ako lokálne zmeny magnetickej odozvy, nie ako priame kvantitatívne stanovenie podielu feromagnetickkej fázy.



Obr. 18 Magnetická mapa ocele AISI 304 po únavovej skúške ťah-ťah; a) rozpúšťacie žihanie, b) po 248 751 cykloch, c) po 256 213 cykloch, d) pretrhnutá po 259 939 cykloch

Závery

Cieľom dizertačnej práce bolo hodnotiť vplyv plastickej deformácie a cyklického zaťažovania na zmenu vybraných mechanických, fyzikálnych a korózných vlastností austenitických nehrdzavejúcich ocelí AISI 304 a AISI 316L. Na základe vykonaných experimentov možno konštatovať, že spôsob, intenzita a história mechanického zaťaženia významne ovplyvňujú mikroštruktúrny stav, deformačné spevnenie, magnetickú odozvu a čiastočne aj korózne správanie skúmaných ocelí.

- Rozpúšťacie žíhanie pri teplote 1030 °C s výdržou 30 minút a následným rýchlym ochladením dusíkom vytvorilo vhodný východiskový stav pre ďalšie experimenty. Obe oceľe vykazovali prevažne austenitickú mikroštruktúru s polyedrickými zrnami a žihacími dvojčatami. Tento stav predstavoval referenčný stav na hodnotenie zmien vyvolaných plasticou deformáciou a cyklickým zaťažovaním.
- Výsledky ťahových skúšok ukázali, že pevnosť v ťahu pri oboch oceliach klesala so zvyšujúcou sa rýchlosťou posuvu prierečníka. Pri oceli AISI 304 bol tento pokles výraznejší, pričom namerané hodnoty R_m klesli zo 706 MPa pri 0,5 mm/min na 618 MPa pri 50 mm/min. Pri oceli AISI 316L bol pokles menej výrazný, zo 603 MPa na 580 MPa. Uvedené výsledky poukazujú na rozdielnu mechanickú odozvu oboch ocelí pri rovnakých podmienkach deformácie.
- Plastickej deformácii spôsobila v oboch skúmaných oceliach výrazné mikroštruktúrne zmeny. Pri oceli AISI 304 boli tieto zmeny intenzívnejšie, čo sa prejavilo výraznejším ovplyvnením pôvodnej austenitickej mikroštruktúry a horšou rozlíšiteľnosťou žihacích a deformačných dvojčiat. Pri oceli AISI 316L bola mikroštruktúra aj po vyšších stupňoch deformácie čitateľnejšia, čo poukazuje na vyššiu stabilitu austenitickej fázy.
- Namerané hodnoty mikrotvrdosti potvrdili deformačné spevnenie oboch austenitických ocelí po plastickej deformácii tlakom aj jednoosovým ťahom. Po deformácii tlakom bol zaznamenaný výrazný nárast mikrotvrdosti už pri nižších úrovniach zaťaženia. Pri oceli AISI 304 vzrástla priemerná mikrotvrdosť zo 146 HV_{0,5} v stave po rozpúšťacom žíhaní na 443 HV_{0,5} po zaťažení 700 kN. Pri oceli AISI 316L vzrástla priemerná mikrotvrdosť zo 135 HV_{0,5} na 405 HV_{0,5} pri zaťažení 800 kN. Zároveň bol pri deformácii tlakom pozorovaný nerovnomerný profil mikrotvrdosti s vyššími hodnotami v oblasti jadra vzorky, čo poukazuje na nehomogénne rozloženie plastickej deformácie.
- Pri jednoosovej ťahovej deformácii bol taktiež potvrdený rast mikrotvrdosti so zvyšujúcim sa stupňom deformácie. Výraznejšie spevnenie bolo zaznamenané pri oceli AISI 304, pri ktorej maximálna priemerná hodnota mikrotvrdosti dosiahla 402 HV_{0,5}. Pri oceli AISI 316L bola maximálna priemerná hodnota 340 HV_{0,5}. Vyššie hodnoty mikrotvrdosti ocele AISI 304 možno spájať s vyššou náchylnosťou na deformačné spevnenie a pravdepodobne aj intenzívnejšou tvorbou deformačne indukovaného α' -martenzitu.
- Magnetické merania metódou VSM potvrdili, že plastickej deformácii výrazne mení magnetické správanie skúmaných austenitických ocelí. V stave po rozpúšťacom žíhaní bola magnetická odozva oboch ocelí nízka, čo zodpovedá dominantne paramagnetickému charakteru austenitickej matrice. So zvyšujúcim sa stupňom plastickej deformácie dochádzalo najmä pri oceli AISI 304 k výraznému nárastu magnetizácie, remanentnej magnetizácie a k rozširovaniu hysterézných slučiek. Tento jav poukazuje na intenzívnejšiu tvorbu feromagnetického α' -martenzitu. Pri oceli AISI 316L bola magnetická odozva podstatne nižšia a hysterézne slučky si aj po deformácii zachovali výrazne užší charakter. Výsledky VSM meraní

tak potvrdili rozdielnú stabilitu austenitickej fázy oboch ocelí, pričom AISI 304 sa prejavila ako výrazne metastabilnejšia a AISI 316L ako stabilnejšia voči deformačne indukovanej martenzitickej transformácii.

- Korózne skúšky v prostredí 0,9 % NaCl pri teplote 37 °C preukázali rozdielne elektrochemické správanie ocelí AISI 304 a AISI 316L. V stave po rozpúšťacom žíhaní dosiahla oceľ AISI 316L vyšší potenciál bodovej korózie ako oceľ AISI 304, čo poukazuje na vyššiu stabilitu pasívnej vrstvy a vyššiu odolnosť proti lokálnemu porušeniu pasívnej vrstvy v prostredí obsahujúcom chloridy. Plastická deformácia mala nepriaznivý vplyv na elektrochemickú stabilitu povrchu najmä pri vyšších rýchlostiach deformácie. Vzorky deformované vyššími rýchlosťami vo všeobecnosti dosahovali negatívnejšie hodnoty korózneho potenciálu E_{corr} a vyššie hodnoty korózneho prúdového hustoty i_{corr} v porovnaní so vzorkami deformovanými nižšou rýchlosťou posuvu prierečníka. Tento jav možno pravdepodobne pripísať zvýšenej hustote defektov kryštálovej mriežky, vyššej vnútornej energii materiálu, lokálnemu poškodeniu povrchu a zmenám stability pasívnej vrstvy.
- Cyklické zaťažovanie v režime ťah–ťah spôsobilo lokálne zmeny magnetickej odozvy v oblasti únavového poškodenia. Pri oceli AISI 304 boli magnetické zmeny výraznejšie a lokalizovali sa najmä v okolí čela únavovej trhliny a miesta finálneho porušenia. Táto odozva súvisí s lokálnou plastickou deformáciou v plastickej zóne pred čelom trhliny a s tvorbou feromagnetického α' -martenzitu. Pri oceli AISI 316L boli po cyklickom zaťažovaní pozorované iba menej intenzívne lokálne zmeny magnetickej odozvy, najmä v oblasti lomu alebo v okolí čela únavovej trhliny. Tento výsledok opäť potvrdzuje vyššiu stabilitu austenitu v oceli AISI 316L a jej nižšiu náchylnosť na deformačne indukovanú martenzitickú transformáciu.

Výsledky práce potvrdili, že deformačne indukovaná martenzitická transformácia predstavuje kľúčový mechanizmus, ktorý ovplyvňuje mechanické, fyzikálne a čiastočne aj korózne správanie metastabilných austenitických ocelí. Pri oceli AISI 304 sa prejavilo výraznejšie prepojenie medzi plastickou deformáciou, deformačným spevnením, magneticou odozvou a lokálnymi zmenami v okolí únavovej trhliny. Oceľ AISI 316L sa javí ako stabilnejší materiál z hľadiska zachovania austenitickej štruktúry a paramagnetického charakteru, pričom zároveň vykazuje vyššiu odolnosť proti bodovej korózii v použítom prostredí. Pri hodnotení vhodnosti týchto ocelí pre konkrétne technické alebo biomedicínske aplikácie preto nemožno vychádzať iba z ich východiskového stavu, ale je potrebné zohľadniť aj spôsob, intenzitu a históriu mechanického zaťaženia.

Resumé v anglickom jazyku

This dissertation investigates the influence of plastic deformation and cyclic loading on selected mechanical, physical and corrosion properties of austenitic stainless steels AISI 304 and AISI 316L. These steels are widely used in technical and biomedical applications due to their good corrosion resistance, mechanical properties, formability and biocompatibility. However, mechanical loading can affect their microstructural stability and may change their functional behaviour during service.

The main attention was focused on deformation-induced martensitic transformation. During plastic deformation, the originally paramagnetic austenitic matrix can partially transform into ferromagnetic α' -martensite. This transformation may increase strength and hardness, but it also changes the magnetic response of the material and can influence its corrosion resistance. Since AISI 304 and AISI 316L differ in the stability of the austenitic phase, their response to identical deformation conditions was compared.

Before deformation, both steels were solution annealed at 1030 °C for 30 minutes and rapidly cooled in nitrogen. Plastic deformation was introduced by compression and uniaxial tensile loading at different crosshead speeds. Selected specimens were also subjected to cyclic tension–tension loading in order to initiate fatigue damage. The experimental evaluation included microstructural analysis, Vickers microhardness measurements, magnetic measurements using vibrating sample magnetometry and fluxgate sensor mapping, as well as corrosion testing by potentiodynamic polarisation in 0.9% NaCl solution at 37 °C.

The results showed that plastic deformation caused significant microstructural and mechanical changes in both steels. These changes were more pronounced in AISI 304, which exhibited stronger deformation hardening and a more intensive magnetic response. This behaviour is related to its higher metastability and greater tendency to form deformation-induced α' -martensite. In contrast, AISI 316L retained a more stable austenitic structure and showed only a weak ferromagnetic response even after deformation.

Corrosion tests confirmed that AISI 316L exhibited higher resistance to localised corrosion than AISI 304 in the investigated chloride-containing environment. Plastic deformation generally reduced the electrochemical stability of the surface, especially at higher deformation rates. This effect was probably associated with the increased density of lattice defects, higher internal energy of the material, local surface damage and changes in the passive layer stability.

Cyclic loading caused local changes in magnetic response in the region of fatigue damage, especially in AISI 304. These changes were mainly observed near the fatigue crack tip and fracture region, where local plastic deformation can promote the formation of ferromagnetic α' -martensite. In AISI 316L, the magnetic changes were less intensive, confirming its higher austenite stability.

The dissertation confirms that plastic deformation and cyclic loading can significantly affect the behaviour of austenitic stainless steels. AISI 304 is more sensitive to deformation-induced martensitic transformation, while AISI 316L shows higher microstructural stability, better retention of paramagnetic behaviour and higher resistance to pitting corrosion. The obtained results show that, when assessing these steels for technical or biomedical applications, it is necessary to consider not only their initial state, but also the method, intensity and history of mechanical loading.

Prínosy pre vedu

Dizertačná práca prispieva k rozšíreniu poznatkov o správaní austenitických nehrdzavejúcich ocelí AISI 304 a AISI 316L pri plastickej deformácii a cyklickom zaťažovaní. Hlavným vedeckým prínosom je experimentálne porovnanie týchto dvoch ocelí z hľadiska ich rozdielnej stability austenitickej matrice, deformačného spevnenia, magnetickej odozvy a korózneho správania. Výsledky práce potvrdili, že oceľ AISI 304 je výrazne náchylnejšia na deformačne indukovanú martenzitickú transformáciu, zatiaľ čo oceľ

AISI 316L vykazuje vyššiu stabilitu austenitu aj po vyšších stupňoch plastickej deformácie. Práca zároveň ukázala, že zmeny magnetických vlastností, hodnotené najmä metódou VSM, predstavujú indikátor mikroštruktúrnych zmien vyvolaných plasticou deformáciou. Získané výsledky zároveň poskytujú experimentálny prehľad o odozve ocelí AISI 304 a AISI 316L pri rôznych spôsoboch a stupňoch plastickej deformácie. Na základe porovnania jednotlivých deformačných režimov sa ako vhodný smer ďalšieho výskumu javí výber konkrétneho stupňa deformácie dosiahnutého jednoosovým ťahom, ktorý umožňuje homogénnejšie ovplyvnenie objemu vzorky v porovnaní s deformáciou tlakom. Takto pripravené vzorky by následne mohli byť cielene hodnotené pri cyklickom zaťažovaní v režime ťah–ťah, prípadne po scitlivení alebo pomocou merania vnútorného tlmenia. Práca tým vytvára metodický základ pre nadväzujúce experimenty zamerané na hlbšie pochopenie vzťahu medzi predchádzajúcou plasticou deformáciou, martenzitickou transformáciou a následnou odozvou materiálu pri ďalšom mechanickom alebo tepelnom namáhaní.

Prínosy pre prax

Výsledky dizertačnej práce majú praktický význam najmä pri výbere a hodnotení austenitických nehrdzavejúcich ocelí AISI 304 a AISI 316L v aplikáciách, kde môže počas výroby alebo prevádzky dochádzať k plastickej deformácii alebo cyklickému zaťažovaniu. Práca poukazuje na to, že výsledné vlastnosti týchto materiálov nie sú dané iba chemickým zložením, ale aj predchádzajúcou mechanickou históriou materiálu. Z praktického hľadiska je dôležité najmä rozlíšenie oblastí, v ktorých je potrebné uprednostniť vyššiu stabilitu ocele AISI 316L, a oblastí, v ktorých môže byť postačujúce použitie ocele AISI 304. Oceľ AISI 316L je vhodnejšia pre aplikácie, kde je požadovaná vyššia stabilita austenitickej štruktúry, nižšia magnetická odozva a vyššia odolnosť proti bodovej korózii. Naopak, oceľ AISI 304 môže predstavovať ekonomicky výhodnejšiu alternatívu v prípadoch, kde prípadné zmeny tvrdosti, magnetického správania alebo korózneho odozvy po plastickej deformácii nepredstavujú kritické obmedzenie funkčnosti súčiastky. Prínosom pre prax je aj overenie použiteľnosti jednoduchých magnetických metód na orientačné posúdenie zmien vyvolaných plasticou deformáciou. Meranie sily odtrhu permanentného magnetu môže slúžiť na rýchle porovnanie deformovaných stavov, zatiaľ čo VSM merania a magnetické mapovanie poskytujú presnejšiu informáciu o zmene magnetického správania materiálu. Tieto poznatky môžu byť využiteľné pri kontrole materiálov po tvárnení, pri porovnávaní rôznych deformačných stavov a pri hodnotení lokálne plasticke ovplyvnených oblastí.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Slezák, M., Palček, P., Šnircová, M., & Uhrčík, M. (2026). Properties and behavior of austenitic steels in biomedical environments. *TalentDetector2026 Winter_INTERNATIONAL STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE*, 2, 473–478. ISBN 978-83-68390-55-1
- [2] Ong, J. L., Appleford, M. R., & Mani, G. (2014). *Introduction to biomaterials: basic theory with engineering applications*. Cambridge University Press.
- [3] Ratner, B. D., Schoen, F. J. (2020). The concept and assessment of biocompatibility. In *Biomaterials Science* (pp. 843-849). Academic Press.
- [4] Hermawan, H., Ramdan, D., & Djuansjah, J. R. (2011). Metals for biomedical applications. *Biomedical engineering-from theory to applications*, 1, 411-430.

- [5] Marin, E., Lanzutti, A. (2025). History of metallic orthopedic materials. *Metals*, 15(4), 378.
- [6] Fritz, J. (Ed.). (2020). *Practical guidelines for the fabrication of austenitic stainless steels*. International Molybdenum Association.
- [7] Nouri, A., & Wen, C. (2021). Stainless steels in orthopedics. In *Structural biomaterials* (pp. 67-101). Woodhead Publishing.
- [8] Poitout, D. G. (Ed.). (2004). *Biomechanics and biomaterials in orthopedics*.
- [9] Sun, J., Tang, H., Wang, C., Han, Z., & Li, S. (2022). Effects of alloying elements and microstructure on stainless steel corrosion: a review. *Steel research international*, 93(5), 2100450.
- [10] Hasebe, T. (2024). *Field theory of multiscale plasticity*. Cambridge University Press.
- [11] Sohrabi, M. J., Naghizadeh, M., & Mirzadeh, H. (2020). Deformation-induced martensite in austenitic stainless steels: A review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(4), 124.
- [12] Hotz, H., Kirsch, B., & Aurich, J. C. (2021). Impact of the thermomechanical load on subsurface phase transformations during cryogenic turning of metastable austenitic steels. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(3), 877-894.
- [13] Olson, G. B., & Cohen, M. (1975). Kinetics of strain-induced martensitic nucleation. *Metallurgical transactions A*, 6(4), 791-795.
- [14] Solomon, N., & Solomon, I. (2017). Effect of deformation-induced phase transformation on AISI 316 stainless steel corrosion resistance. *Engineering Failure Analysis*, 79, 865-875.
- [15] Ruiz-Perez, F., López-Estrada, S. M., Tolentino-Hernández, R. V., & Caballero-Briones, F. (2022). Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7(3), 100454.
- [16] Xiong, J. J., & Sheno, R. A. (2011). *Fatigue and fracture reliability engineering*. Springer Science & Business Media.
- [17] Bharadwaj, P., Gupta, S. K., & Chattopadhyay, J. (2024). Study of cyclic plastic zone ahead of the fatigue crack tip using Digital Image Correlation system. *Procedia Structural Integrity*, 60, 655-664.
- [18] Lopez-Crespo, C., Cruces, A. S., Seitzl, S., Moreno, B., & Lopez-Crespo, P. (2021). Estimation of the plastic zone in fatigue via micro-indentation. *Materials*, 14(19), 5885.
- [19] Gao, H., Lin, Z., Huang, X., Shang, H., & Zhan, J. (2022). In situ measurement of cyclic plastic zone and internal strain response of Q&P steel near fatigue crack tip region based on micro-DIC. *Materials*, 15(17), 6114.
- [20] Sandim, M. J. R., Mauro, V., Tavares, S. S. M., Zilnyk, K. D., & Sandim, H. R. Z. (2021). Magnetic properties and microstructural characterization of cold-rolled and annealed 317L austenitic stainless steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 539, 168336.

- [21] Hrabovská, K., Životský, O., Váňová, P., Jirásková, Y., Gembalová, L., & Hilšer, O. (2025). Microstructure and magnetism of austenitic steels in relation to chemical composition, severe plastic deformation, and solution annealing. *Scientific Reports*, 15(1), 2010.
- [22] Sobkuliak, M. (2024). Vyšetrovanie zmien vlastností austenitických biomateriálov v dôsledku rôznorodého technologického spracovania. Diplomová práca. KTEBI, FEIT, Žilinská univerzita v Žiline

Zoznam publikovaných prác doktoranda

V3 – Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

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. – **WoS: Engineering, manufacturing - Q4, Engineering, mechanical - Q4, Materials science, multidisciplinary - Q4. Scopus: Industrial and manufacturing engineering - Q3 (2023)**

ZATKALÍKOVÁ, V., DRÍMALOVÁ, P., BALIN, K., **SLEZÁK, M.**, MARKOVIČOVÁ, L. (2024). Electrochemical behavior of plasma-nitrided austenitic stainless steel in chloride solutions. *Materials*. Vol. 17. No. 17. – **WoS: Chemistry, physical - Q3, Materials science, multidisciplinary - Q3, Metallurgy & metallurgical engineering - Q2, Physics, applied - Q2, Physics, condensed matter - Q2. Scopus: Condensed matter physics - Q2, Materials science (miscellaneous) - Q2**

SMETANA, M., GOMBÁRSKA, D., **SLEZÁK, M.**, JANOUŠEK, L., PALČEK, P. (2025). Investigation of the mechanical and magnetic property changes in austenitic stainless steel AISI 304 after cold rolling under various heat treatment conditions. *Applied sciences*. Vol. 15. No. 5. – **WoS Q2, Scopus Q2**

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., DRÍMALOVÁ, P., **SLEZÁK, M.**, UHRÍČIK, M., CHVALNÍKOVÁ, M. (2023). Hydrogen embrittlement of 11SMn30 free-cutting steel. *Manufacturing Technology*. Vol. 23. No. 6. – **WoS: Engineering, manufacturing - Q4, Engineering, mechanical - Q4, Materials science, multidisciplinary - Q4. Scopus: Industrial and manufacturing engineering - Q3 (2023)**

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. – **WoS: Engineering, manufacturing - Q4, Engineering, mechanical - Q4, Materials science, multidisciplinary - Q4. Scopus: Industrial and manufacturing engineering - Q3 (2023)**

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. – **WoS: Engineering, manufacturing - Q4, Engineering, mechanical - Q4, Materials science, multidisciplinary - Q4. Scopus: Industrial and manufacturing engineering - Q2 (2024)**

VLACH, T., CAIS, J., CHVALNÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.**, BREJCHA, J., BURKET, T., FINK, D., SVIANTEK, J. (2026). Influence of High-melting-point Metals on the Mechanical Properties of Selected Al-Si Alloys. *Manufacturing Technology*. Vol. 26. No.1. - **Q3**

V2 – Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., CHVALNÍKOVÁ, V., ŠIKYŇA, L., DRÍMALOVÁ, P. (2024). Vplyv plazmovej nitridácie a scitlivenia na mikroštruktúru a mikrotvrdosť austenitickej ocele AISI 304. SEMDOK 2024.

SLEZÁK, M., PALČEK, P., ŠNIRCOVÁ, M., UHRÍČIK, M. (2026). Properties and behavior of austenitic steels in biomedical environments. TalentDetector2026_Winter.

SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., CHVALNÍKOVÁ, V., ŠIKYŇA, L., ŠURDOVÁ, Z., MIKOLAJČÍK, M., ČUCHOR, D. (2025). Effect of elevated temperatures on the nitriding layer on the fatigue life of austenitic steel. Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry.

SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., CHVALNÍKOVÁ, V., ŠIKYŇA, L., ČUCHOR, D. (2025). Vplyv rozpúšťacieho žihania a plazmovej nitridácie na zmenu únavovej životnosti austenitickej ocele AISI 304. SEMDOK 2025.

SLEZÁK, M., UHRÍČIK, M., CHVALNÍKOVÁ, V., BELAN, J., VLACH, T. (2026). Effect of solution annealing and plasma nitriding on the fatigue life change of AISI 304 austenitic steel. The 19th Metallography and Fractography.

HRABOVSKÁ, K., ONDŘEJ, Ž., GEMBALOVÁ, L., **SLEZÁK, M.**, VÁŇOVÁ, P., RUSZ, S., PLAČEK, P. (2025). Effect of plastic deformation induced by pressure and drece technique on the structure and magnetic properties of austenitic steels. Metal 2025.

ŠNIRCOVÁ, E., PALČEK, P., **SLEZÁK, M.**, UHRÍČIK, M. (2026). Investigation of magnesium and its alloys for biodegradable implant applications. TalentDetector2026_Winter.

HUDECOVÁ, S., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., MIKOLAJČÍK, M., CHVALNÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.** (2024). The influence of structure, sensitization and corrosion on the fatigue properties of austenitic steel. Development of Materials Science in Research and Education.

CHVALNÍKOVÁ, V., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., **SLEZÁK, M.**, ŠIKYŇA, L., DRÍMALOVÁ, P., ŠURDOVÁ, Z. (2024). Statické a cyklické zaťažovanie austenitickej ocele AISI 304. SEMDOK 2024.

ČUCHOR, D., BRONČEK, J., DRBÚL, M., **SLEZÁK, M.**, RADEK, N. (2025). Experimentálna analýza tribokorózných vlastností nehrdzavejúcich ocelí v korozívnom prostredí. SEMDOK 2025.

BELAN, J., UHRÍČIK, M., **SLEZÁK, M.**, CHVALNÍKOVÁ, V. (2025). Fractography and microstructural analysis of fatigue crack propagation in beta-annealed Ti6Al4V alloy after fatigue test. Metallurgy and processing, fatigue, fractography and failure analysis.

DRÍMALOVÁ, P., NOVÝ, F., VÁŇOVÁ, P., UHRÍČIK, M., ŠIKYŇA, L., CHVALNÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.** (2024). Vplyv prúdovej hustoty na vodíkovú krehkosť progresívnej vysokopevnej ocele S960MC. SEMDOK 2024.

ČUCHOR, D., **SLEZÁK, M.**, BRONČEK, J., DRBUL, M. (2025). Tribocorrosion characteristics of stainless steel in corrosive environment. Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry.

UHRÍČIK, M., PALČEK, P., **SLEZÁK, M.**, CHVALNÍKOVÁ, V., ŠIKYŇA, L., ŠURDOVÁ, Z., MIKOLAJČÍK, M. (2025). Evaluation of the temperature dependence of the internal damping of AZ91 magnesium alloy using mathematical methods. SEMDOK 2025.

CHVALNÍKOVÁ, V., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., **SLEZÁK, M.**, ŠIKYŇA, L., ŠURDOVÁ, Z., MIKOLAJČÍK, M. (2025). Statické a cyklické zaťažovanie austenitickej ocele AISI 304 po scitlivení. SEMDOK 2025.

UHRÍČIK, M., PALČEK, P., HUDECOVÁ, S., ŠURDOVÁ, Z., **SLEZÁK, M.**, CHVALNÍKOVÁ, V. (2024). The influence of heat treatment on the nitriding layer on austenitic steel. Development of Materials Science in Research and Education.

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., DRÍMALOVÁ, P., CHVALNÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.**, UHRÍČIK, M., ČUCHOR, D. (2025). Hydrogen embrittlement of ferritic steel 1.4104. Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry.

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., DRÍMALOVÁ, P., CHVALNÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.**, UHRÍČIK, M. (2024). Vodíková krehkosť feritickej ocele 1.4104. SEMDOK 2024.

ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., STRAKOVÁ, D., **SLEZÁK, M.**, CHVALNÍKOVÁ, V. (2025). Vodíková krehkosť automatovej ocele 11SMn30. SEMDOK 2025.

CHVALNÍKOVÁ, V., UHRÍČIK, M., PALČEK, P., **SLEZÁK, M.**, ŠIKYŇA, L., ŠURDOVÁ, Z., MIKOLAJČÍK, M. (2025). Static and cyclic loading of 304 austenitic steel after sensitization. Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry.

UHRÍČIK, M., PALČEK, P., BELAN, J., VAŠKO, A., PASTIEROVIČOVÁ, L., KUCHARÍKOVÁ, L., ZATKALÍKOVÁ, V., **SLEZÁK, M.** (2023). The fatigue life and fractures of austenitic steel AISI 304 after the chemical-thermal treatment. 6th International Conference on Structural Integrity and Durability.

