

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

---

**AUTOREFERÁT  
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

---

Žilina, 2025

Ing. Dávid Čuchor



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

---

Ing. Dávid Čuchor

**AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE**  
**VÝSKUM TRIBOKORÓZNYCH SYSTÉMOV V BIOMEDICINE**  
**A STROJÁRSKYCH APLIKÁCIÁCH**

Na získanie akademického titulu **doktor**  
(„*philosophiae doctor*“, v skratke „**PhD.**“)  
v študijnom odbore Strojárstvo  
v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej (01.09.2022-20.08.2025) forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre konštruovania a častí strojov.

Predkladateľ: **Ing. Dávid Čuchor**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra konštruovania a častí strojov

Školiteľ: **doc. Ing. Jozef Bronček, PhD.**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra konštruovania a častí strojov

Oponenti:

1. **prof. Ing. Branislav Hadzima, PhD.**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Výskumné centrum UNIZA  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
2. **dr hab. inž. Norbert Robert Radek, prof.**  
Kielce University of Technology  
Faculty of Mechatronics and Mechanical  
Engineering  
Centre for Laser Technologies of Metals  
Al. 1000-lecia Państwa polskiego 7, 25-314  
Kielce
3. **doc. Ing. Michal Petruš, PhD.**  
Technical University of Liberec  
Department of Design of Machine Elements &  
Mechanism  
Studentská 2, 46117 Liberec

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 20.8.2025 o 08:30 hod. v miestnosti BD 004 na SJF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časť a mechanizmy strojov, 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. Slavomír Hrček,  
PhD.  
Predseda komisie pre  
obhajobu dizertačnej  
práce

## **OBSAH**

ÚVOD .....	5
STRUČNÝ PEHLAD PROBLEMATIKY .....	5
CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	6
METODIKA EXPERIMENTOV .....	7
VÝSLEDKY .....	9
DISKUSIA.....	23
ZÁVER.....	29
PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRAX.....	30
RESUMÉ .....	31
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI .....	32
LITERATÚRA .....	33

## ÚVOD

Snaha o zvyšovanie životnosti materiálov v reálnych prevádzkových podmienkach vytvára priestor pre výskum v oblastiach tribológie a korózie. Tieto dve disciplíny spolu úzko súvisia, a ich spoločné pôsobenie vedie k zložitejšej degradácii povrchov materiálov, známej ako tribokorózia. V moderných inžinierskych aplikáciách je dôležité pochopiť, ako sa navzájom ovplyvňujú materiály vo vzájomnom kontakte s korozívnym prostredím, aby sa predĺžila životnosť a zvýšila spoľahlivosť technických súčiastok. Nehrdzavejúce ocele sa z tohto pohľadu osvedčili ako mimoriadne spoľahlivé a odolné, a to aj v náročných podmienkach, ako sú lodný, chemický a petrochemický priemysel, či medicínske implantáty.

Dizertačná práca sa venuje dvom typom nehrdzavejúcej ocele – AISI 316Ti a AISI 430 – ktoré sa bežne používajú v rôznych odvetviach, od automobilového a potravinárskeho priemyslu až po biomedicínu.

Tribokorózia predstavuje súbežné pôsobenie mechanického opotrebenia spôsobeného trením a chemickej degradácie vplyvom korozívneho prostredia. Porozumenie tomuto javu je nevyhnutné pri navrhovaní a použití materiálov, ktoré majú spoľahlivo fungovať aj v náročných prevádzkových podmienkach. Na tribokorózne správanie majú výrazný vplyv vlastnosti materiálového páru, charakter kontaktu, ako aj fyzikálno-chemické vlastnosti prostredia, v ktorom sa materiál nachádza.

## STRUČNÝ PEHĽAD PROBLEMATIKY

Tribokorózia predstavuje nevratnú zmenu materiálu alebo stratu jeho funkčných vlastností spôsobenú súčasným pôsobením mechanického opotrebenia a chemických či elektrochemických procesov medzi povrchmi v relatívnom pohybe [1, 2]. Jej typickým znakom je synergický účinok mechanického namáhania a agresívneho prostredia, ktorý často vedie k oveľa väčšiemu poškodeniu materiálu, než by zodpovedalo jednoduchému súčtu opotrebenia a korózie zvlášť. Tento synergický efekt môže mať pozitívny alebo negatívny charakter v závislosti od povahy reakčných produktov, ktoré vznikajú na povrchu materiálu [3].

Vzhľadom na zložitosť tribokorózných javov nie je možné tieto problémy riešiť iba jednoduchými empirickými metódami. Vyžaduje sa vedecký prístup podložený spoľahlivými a overenými experimentálnymi postupmi [4]. Štúdia od Wooda a kol. [5] predstavila detailnú metodológiu na kvantifikáciu synergického účinku medzi opotrebením a koróziou. Táto metóda zahŕňa tri samostatné testy, prvý slúži na posúdenie čisto erózneho opotrebenia, druhý na určenie samotnej

koróznej rýchlosti a tretí kombinuje oba procesy. Vďaka tejto kombinácii je možné presne určiť dodatočnú stratu materiálu spôsobenú vzájomným pôsobením mechanických a elektrochemických faktorov.

Táto dizertačná práca sa zameriava na hodnotenie tribokorózných procesov pomocou dvoch druhov nehrdzavejúcich ocelí: AISI 316Ti a AISI 430. Korózne vlastnosti boli hodnotené pomocou potenciodynamickej polarizácie (PDP) a elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS). Tribokorózne a tribologické vlastnosti boli skúmané pomocou špecializovaného lineárneho mikrotribometra, pričom počas testovania boli priebežne zaznamenávané hodnoty potenciálu nezapojenej elektródy (OCP) a súčiniteľa trenia (COF).

## CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce je experimentálne skúmanie tribokorózných vlastností nehrdzavejúcich ocelí, ktoré sa bežne používajú v biomedicínskych a inžinierskych aplikáciách. Štúdia je zameraná na hodnotenie kombinovaného vplyvu mechanického opotrebenia a elektrochemických interakcií na správanie a životnosť komponentov z nehrdzavejúcej ocele v rôznych koróziivných prostrediach.

Na splnenie cieľov tejto dizertačnej práce boli stanovené nasledujúce úlohy:

- a) Analýza súčasného stavu poznatkov v oblasti tribológie, korózie a tribokorózie,
- b) Vykonanie experimentálnych tribokorózných testov za kontrolovaných podmienok s cieľom simulovať súčasné pôsobenie mechanického opotrebenia a elektrochemických procesov
- c) Meranie elektrochemických vlastností experimentálnych materiálov pomocou potenciodynamickej polarizácie a elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS) s cieľom vyhodnotiť ich korózne správanie,
- d) Kvalitatívne a kvantitatívne vyhodnotenie tribologických, korózných a tribokorózných charakteristík skúmaných materiálov,
- e) Analýza, syntéza a vedecká interpretácia získaných výsledkov, ktoré prispievajú k hlbšiemu pochopeniu degračných mechanizmov ovplyvňujúcich životnosť materiálov v tribokorózných systémoch.

**Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci riešenia Grantového projektu UNIZA (ID project 17704 “ Výskum tribokorózných systémov v biomedicine a strojárskych aplikáciách”), KEGA č. 033 ŽU-4/2022 (“Implementation of the language of geometric product specification in the field of coordinate 3D metrology “), a KEGA č. 045ŽU-4/2025 (“Integrating language of geometric specification into surface roughness evaluation“).**

**Autor ďakuje za podporu programu ERASMUS+ Traineeship program UNIZA a Visegrad Fund programu.**

## **METODIKA EXPERIMENTOV**

### **Experimentálny materiál**

Experimentálna časť tejto práce bola realizovaná na dvoch typoch nehrdzavejúcich ocelí: austenitickej AISI 316Ti a feritickej AISI 430, ktoré boli dodané vo forme plechov s hrúbkou 3 mm. Chemické zloženie týchto materiálov bolo analyzované pomocou ručného optického emisného spektrometra SPECTROMAXx. Výsledky chemickej analýzy oboch ocelí sú uvedené v Tab. 1 a Tab. 2.

Tab. 1 Chemické zloženie nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti

Wt. %	Cr	Ni	Mo	Mn	N
	16.6300	10.4300	1.8600	0.9600	0.0318
Ti	C	Si	P	S	Fe
0.2330	0.0276	0.6620	0.0210	0.0141	Bal.

Tab. 2 Chemické zloženie nehrdzavejúcej ocele AISI 430

Wt. %	C	Si	Mn	P	S
	0.0285	0.3940	0.3380	0.0123	0.0087
Cr	Ti	Mo	Ni	Co	Fe
16.2200	0.0044	0.0165	0.1680	0.2060	Bal.

### **Mikroštruktúrna analýza experimentálneho materiálu**

Metalografická analýza bola vykonaná s cieľom preskúmať štruktúru skúmaného materiálu. Príprava vzoriek zahŕňala procesy rezania, brúsenia, leštenia a leptania povrchu.

### **Meranie tvrdosti experimentálneho materiálu**

Meranie tvrdosti bolo realizované pomocou statickej Vickersovej skúšky na prístroj Zwick/Roell ZH $\mu$ . Tvrdosť vzoriek v počiatočnom stave sa určovala zaťažením HV2 a HV0.1. Doba zaťaženia bola nastavená na 10 sekúnd pri laboratórnej teplote. Pre zabezpečenie presnosti a spoľahlivosti výsledkov bolo na každej vzorke vykonaných 20 samostatných vŕtačkov.

## **Elektrochemické testy**

Elektrochemická impedančná spektroskopia (EIS) a potentiodynamická polarizácia (PDP) boli realizované v roztokoch NaCl s koncentraciou 0,9 %, 3,5 % a 5 % pri laboratórnej teplote. Výber týchto roztokov bol zvolený s cieľom simulovať prostredie bohaté na chloridy, ktoré je relevantné pre praktické aplikácie v technickej a biomedicínskej praxi. Merania boli vykonané pomocou potenciostatu BioLogic VSP-300, pričom vzorky boli umiestnené v špeciálnej koróznej cele.

Potentiodynamické testy prebiehali v rozsahu potenciálov od  $-200$  mV do  $+1200$  mV vzhľadom na hodnotu otvoreného potenciálu (OCP), s rýchlosťou snímania  $1$  mV/s. Získané dáta boli následne spracované pomocou Tafelovej extrapolácie v softvéri EC-Lab V11.50.

Merania EIS sa uskutočňovali v rôznych časových intervaloch, od 1 hodiny až do 168 hodín. Záznamy boli vykonané po 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 12 h, 24 h, 48 h, 96 h a 168 h. Frekvenčný rozsah EIS meraní bol nastavený od 100 kHz do 10 MHz a amplitúda striedavého napätia bola 15 mV. Výsledky meraní EIS sú prezentované vo forme Nyquistových diagramov, ktoré boli interpretované pomocou modelovania ekvivalentného obvodu v softvéri EC-Lab.

## **Trecie skúšky**

Hodnotenie tribologických a tribokorózných vlastností skúmaných materiálov bolo realizované pomocou špecializovaného testovacieho zariadenia, ktoré je určené na posudzovanie povrchových a povlakových vlastností konštrukčných materiálov a pracuje na princípe Ball-on-Flat.

Trecie skúšky boli vykonávané v korozívnom prostredí, pričom sa použili rôzne roztoky – destilovaná voda, 0,9% NaCl, 3,5% NaCl a 5% NaCl. Na spracovanie experimentálnych dát zozbieraných počas meraní na lineárnom tribometri bol použitý softvér NI DIADEM. Počas merania sa súčasne zaznamenával nielen súčiniteľ trenia (COF), ale aj hodnota otvoreného potenciálu (OCP), čo umožnilo komplexne posúdiť odozvu materiálu počas kombinovaného mechanického zaťaženia a elektrochemických interakcií.

## **Mikroštruktúrálna a povrchová analýza**

Po ukončení korózných a tribokorózných testov bola vykonaná detailná analýza povrchu experimentálnych vzoriek. Na tento účel bol použitý optický 3D merací systém Alicona InfiniteFocus G5, ako aj rastrovací elektrónový mikroskop (REM). Tieto metódy umožnili podrobne vyhodnotiť morfológiu opotrebovaných plôch a rozsah povrchovej degradácie po vystavení mechanickému opotrebeniu a korozívnym interakciám.

## VÝSLEDKY

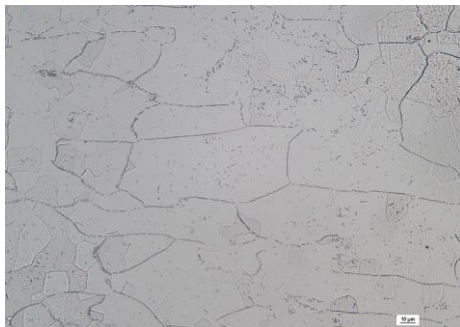
### Mikroštruktúrálna analýza

Mikroštruktúra nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti pozostáva z polyedrických zŕn austenitu s viditeľnými žihacími dvojčatami. Tieto dvojčatá pravdepodobne vznikli počas žihania alebo valcovania v procese výroby materiálu. Okrem austenitickej matrice prítomnosť titánu vedie k tvorbe karbidov titánu (TiC) v mikroštruktúre (obr. 1).

Mikroštruktúra nehrdzavejúcej ocele AISI 430 vykazuje prevažne feritickú štruktúru charakterizovanú rovnomerne tvarovanými zrnami. Okrem toho sa pozdĺž hraníc zŕn a v ich vnútri nachádzajú malé tmavé precipitáty. Tieto precipitáty sú pravdepodobne karbidy bohaté na chróm alebo iné nemetalické inklúzie, ktoré vznikli počas výrobného procesu ocele (obr. 2).



Obr. 1 Mikroštruktúra AISI 316Ti v priečnom reze (leptané Kallingovým činidlom č. 2, zväčšenie 400x)



Obr. 2 Mikroštruktúra AISI 430 v priečnom reze (glycerín+HCl+HNO<sub>3</sub>, zväčšenie 400x)

### Tvrdosť experimentálneho materiálu

V pozdĺžnom smere AISI 430 dosiahla 156 HV2 a 180 HV0,1, zatiaľ čo AISI 316Ti namerala 155 HV2 a 178 HV0,1. V priečnom smere AISI 430 zaznamenala 161 HV2 a 185 HV0,1, zatiaľ čo AISI 316Ti vykazovala 153 HV2 a 189 HV0,1. AISI 430 vo všeobecnosti vykazovala mierne vyššiu tvrdosť pri meraní HV2, AISI 316Ti vykazovala mierne vyššiu mikrotvrdosť (HV0,1) v priečnom smere.

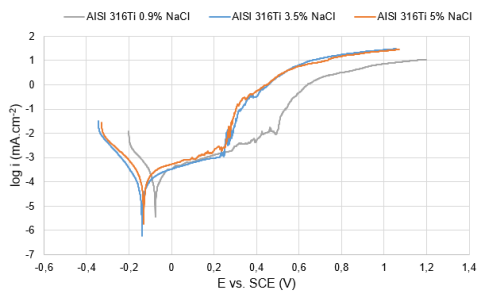
### Korózne správanie nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti

Elektrochemické korózne charakteristiky, vrátane termodynamických parametrov ( $E_{corr}$ ) a kinetických parametrov ( $i_{corr}$ ,  $r_{corr}$ ), odvodené z Tafelovej analýzy polarizačných kriviek sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Elektrochemické korózne charakteristiky AISI 316Ti z potenciodynamických polarizačných kriviek

AISI 316Ti	0.9% NaCl	3.5% NaCl	5% NaCl
$E_{corr}$ [mV/SCE]	-75.76 ± 34.53	-138.88 ± 15,02	-130.09 ± 40.66
$i_{corr}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	0.11 ± 0.08	0.13 ± 0.04	0.22 ± 0.03
$r_{corr}$ [ $\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$ ]	$3.23 \times 10^{-3} \pm 1.35 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3} \pm 5.02 \times 10^{-3}$	$3.59 \times 10^{-3} \pm 1.55 \times 10^{-3}$

Potenciodynamické polarizačné krivky testovaných povrchov sú uvedené na obr. 3. Polarizačné krivky vykazujú charakteristický tvar typický pre pasivujúce kovy, kde anodické vetvy vykazujú pasívne správanie.



Obr. 3 Potenciodynamické polarizačné krivky AISI 316Ti v 0,9%, 3,5% a 5% NaCl

Pri pasívnych kovoch si hodnotenie odolnosti voči korózii vyžaduje porovnanie šírky pasívnych oblastí, analýzu kolísania korózneho prúdu a stanovenie pittingového potenciálu ( $E_p$ ). Hodnoty  $E_p$  sú uvedené v tab. 4.

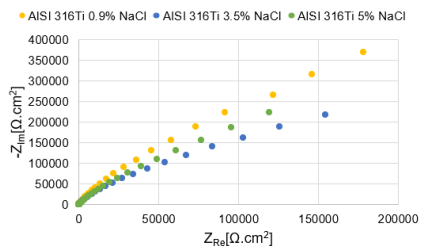
Tab. 4 Hodnoty pittingového potenciálu AISI 316Ti

AISI 316Ti	0.9% NaCl	3.5% NaCl	5% NaCl
$E_p$ [V/SCE]	$0.49 \pm 0.02$	$0.26 \pm 0.02$	$0.22 \pm 0.02$

Na obr. 4 je znázornená odozva elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS) nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti v troch rôznych roztokoch NaCl: 0,9 %, 3,5 % a 5 %. Impedančné spektrá odhaľujú vplyv koncentrácie chloridových iónov na koróznú odolnosť testovaného materiálu. Tab. 5 uvádza elektrochemické korózne parametre odvodené z polarizačných kriviek.

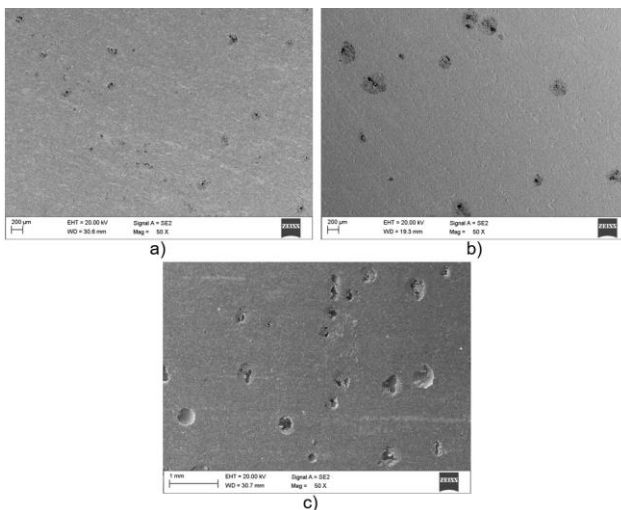
Tab. 5 Elektrochemické korózne charakteristiky AISI 316Ti v 0,9%, 3,5% a 5% NaCl z Nyquistových diagramov

AISI 316Ti	$R_\Omega$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	$R_p$ [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]	CPE [ $\text{F} \cdot \text{s}^{n-1} \cdot 10^{-6}$ ]	$n$
0.9% NaCl	$61 \pm 4$	$178,228 \pm 875$	$23 \pm 2$	$0.88 \pm 0.03$
3.5% NaCl	$23 \pm 4$	$154,361 \pm 935$	$29 \pm 2$	$0.87 \pm 0.03$
5% NaCl	$13 \pm 4$	$119,168 \pm 862$	$33 \pm 2$	$0.86 \pm 0.03$



Obr. 4 Nyquistove diagramy AISI 316Ti v 0,9%, 3,5% a 5% NaCl

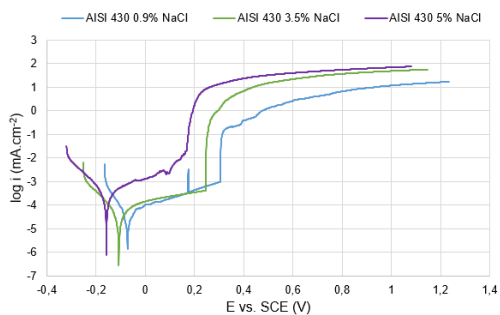
Obr. 4 porovnáva bodovú koróziu na povrchu nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti po vystavení 0,9 %, 3,5 % a 5 % roztokom NaCl. Koncentrácia roztoku jasne koreluje so zmenou vzhľadu bodovej korózie na povrchu. Povrch v 0,9 % roztoku NaCl vykazuje menej a menšie korózne body rozmiestnené riedko po povrchu. Povrch v 3,5 % a 5 % roztoku NaCl vykazuje výrazne vyššiu hustotu bodovej korózie, s väčšími a početnejšími koróznymi bodmi..



Obr. 5 Porovnanie bodovej korózie na povrchu AISI 316Ti po koróznej skúške v a) 0,9% NaCl, b) 3,5% NaCl, c) 5% NaCl (zväčšenie 50x)

## Korózne správanie nehrdzavejúcej ocele AISI 430

Potenciodynamické polarizačné krivky AISI 430 sú znázornené na obr. 6 a ukazujú typické pasivačné správanie. Anodické vetvy naznačujú tvorbu pasívneho filmu, pričom korózny potenciál ( $E_{corr}$ ) odráža termodynamickú stabilitu materiálu. Tafelova analýza polarizačných kriviek je uvedená v tab. 6. Hodnoty  $E_p$  sú uvedené v tab. 7.



Obr. 6 Potenciodynamické polarizačné krivky AISI 430 v 0,9%, 3,5% a 5% NaCl

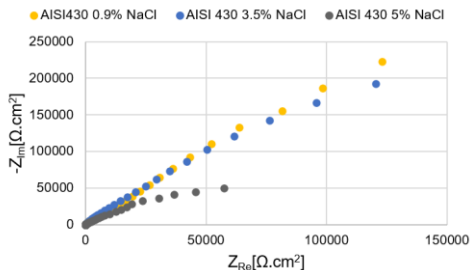
Tab. 6 Elektrochemické korózne charakteristiky AISI 430 z potenciodynamických polarizačných kriviek

AISI 430	0.9% NaCl	3.5% NaCl	5% NaCl
$E_{corr}$ [mV/SCE]	$-71.95 \pm 24.35$	$-107.88 \pm 18.02$	$-158.46 \pm 28.67$
$i_{corr}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$0.067 \pm 0.020$	$0.072 \pm 0.43$	$0.41 \pm 0.15$
$r_{corr}$ [ $\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$ ]	$0.77 \times 10^{-3} \pm 1.25 \times 10^{-3}$	$1.74 \times 10^{-3} \pm 2.05 \times 10^{-3}$	$4.79 \times 10^{-3} \pm 1.75 \times 10^{-3}$

Tab. 7 Hodnoty pittingového potenciálu AISI 430

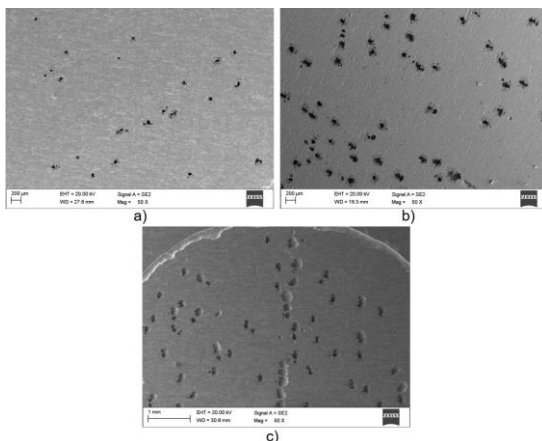
AISI 430	0.9% NaCl	3.5% NaCl	5% NaCl
$E_p$ [V/SCE]	$0.30 \pm 0.02$	$0.24 \pm 0.02$	$0.17 \pm 0.02$

Merania elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS) poskytli cenné informácie o polarizačnom odpore a celkovom elektrochemickom správaní testovaných korózných systémov. Tab. 7 uvádza odozvu EIS nehrdzavejúcej ocele AISI 430 v 0,9 %, 3,5 % a 5 % roztokoch NaCl, pričom poukazuje na vplyv koncentrácie chloridov na koróznú odolnosť.



Obr. 7 Nyquistove diagramy AISI 430 v 0,9 %, 3,5 % a 5 % NaCl

Elektrochemické parametre získané z polarizačných kriviek sú zhrnuté v tab. 8. Obr. 8 znázorňuje zmeny bodovej korózie na povrchu nehrdzavejúcej ocele AISI 430 po korózných skúškach v 0,9 %, 3,5 % a 5 % roztoku NaCl. Rozsah bodovej korózie sa zvyšuje s vyššou koncentráciou chloridov.



Obr. 8 Porovnanie bodovej korózie AISI 430 po koróznej skúške v a) 0,9% NaCl, b) 3,5% NaCl, c) 5% NaCl (zväčšenie 50x)

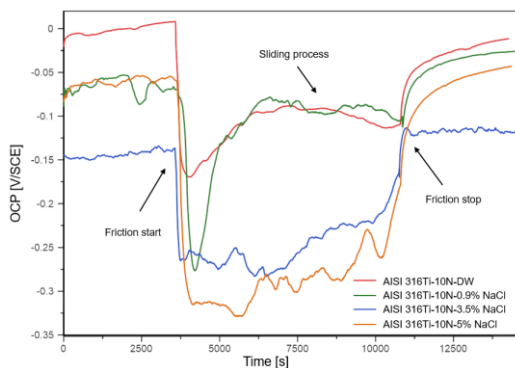
Tab. 8 Elektrochemické korózne charakteristiky AISI 430 v 0,9%, 3,5% a 5% NaCl z Nyquistových diagramov

AISI 430	$R_{\Omega}$	$R_p$	CPE	$n$
	$[\Omega \cdot \text{cm}^2]$	$[\Omega \cdot \text{cm}^2]$	$[\text{F} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-6}]$	
0.9% NaCl	$61 \pm 5$	$125,080 \pm 985$	$29 \pm 2$	$0.84 \pm 0.03$
3.5% NaCl	$20 \pm 4$	$120,449 \pm 955$	$31 \pm 2$	$0.85 \pm 0.03$
5% NaCl	$14 \pm 4$	$57,533 \pm 862$	$79 \pm 4$	$0.79 \pm 0.03$

### Tribokorózne správanie nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti

Potenciál nezapojenej elektródy (OCP) meraný počas tribokorózie predstavuje zmiešaný potenciál, ktorý zahŕňa elektrochemickú odozvu neopotrebovaného povrchu aj stopy opotrebovania [6]. Štúdie naznačujú, že tento zmiešaný potenciál je ovplyvnený najmä faktormi, ako je kinetika anodických a katodických reakcií v opotrebovaných aj neopotrebovaných oblastiach, pomer a priestorové rozloženie týchto oblastí a vlastné OCP materiálu v každej oblasti [7].

Obr. 9 znázorňuje vývoj OCP pre nehrdzavejúcu oceľ AISI 316Ti počas testovania tribokorózie pri zaťažení 10 N v rôznych roztokoch NaCl vrátane destilovanej vody.



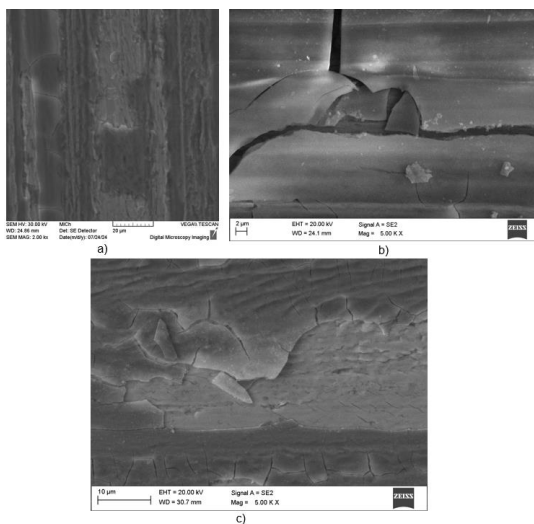
Obr. 9 Vývoj OCP AISI 316Ti pri zaťažení 10N v rôznych roztokoch

V počiatočných fázach skúšky zostala hodnota OCP pre AISI 316Ti relatívne stabilná, s malými výkyvmi, pričom najvyšší potenciál bol pozorovaný v destilovanej vode, čo naznačuje najstabilnejšiu tvorbu pasívneho filmu. Počas trenia vykazoval OCP výrazný negatívny posun v porovnaní so statickými podmienkami, čo naznačuje rozpad pasívneho filmu v dôsledku mechanického opotrebovania. Tento prechodný katodický posun je spôsobený predovšetkým rýchlym odstránením alebo čiastočným narušením ochrannej oxidovej vrstvy na povrchu ocele v dôsledku trecieho kontaktu.

Rozsah posunu OCP je výraznejší pri vyšších koncentráciách NaCl, pričom 5 % roztok NaCl vykazuje najvyšší pokles potenciálu, čo znamená väčší rozpad pasívneho filmu a zvýšenú elektrochemickú aktivitu. Naopak, OCP v destilovanej vode vykazuje mierny pokles, čo naznačuje menej závažné poškodenie v porovnaní s vyššími koncentraciami chloridov. Počas celého procesu trenia kolísanie OCP naznačuje prebiehajúce rozrušovanie pasívnej vrstvy a dynamiku repasácie.

Po zastavení trenia sa OCP postupne zvyšuje, čo dokazuje schopnosť materiálu repasovať. Obnova je však účinnejšia v destilovanej vode a 0,9 % NaCl, zatiaľ čo pri vyšších koncentráciách (3,5 % a 5 % NaCl) zostáva potenciál nižší, čo znamená narušenie pasívneho filmu a zvýšenú náchylnosť na koróziu. Výsledky potvrdzujú, že koncentrácia chloridov významne ovplyvňuje tribokorozné správanie AISI 316Ti, pričom vyššie koncentrácie vedú k väčšej degradácii pasívneho filmu [8].

Na obr. 10 sú porovnávané povrchy AISI 316Ti po tribokorozných skúškach pri normálnom zaťažení 10 N v rôznych roztokoch NaCl. Povrch v 0,9 % NaCl (a) vykazuje relatívne rovnomerné stopy opotrebovania s plytkými drážkami pozdĺž smeru klzania. Povrch v 3,5 % NaCl (b) vykazuje silnejšie trhliny s dôkazmi lamelového odlupovania a fragmentácie. Tieto trhliny sú pravdepodobne výsledkom akumulácie napätia na podpovrchovej úrovni v dôsledku mechanického zaťaženia aj lokalizovaného korózneho napadnutia. V prípade 5 % NaCl (c) je povrch silne popraskaný, s veľkými plochami delaminovaného materiálu a hlbokými trhlínami. Povrch je viditeľne krehký a fragmentovaný, pričom vykazuje vrstevnaté štruktúry typické pre delamináciu opotrebovania [7].



Obr. 10 Porovnanie REM mikrofotografií AISI 316Ti pri normálnom zaťažení 10N v a) 0,9% NaCl (zväčšenie 2000x), b) 3,5% NaCl (zväčšenie 5000x), c) 5% NaCl (zväčšenie 5000x)

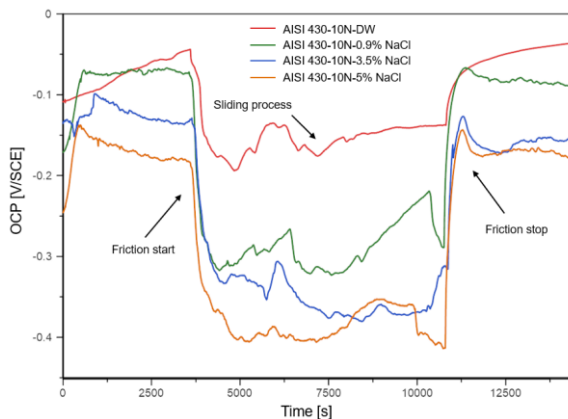
### Tribokorózne správanie nehrdzavejúcej ocele AISI 430

Obr. 11 znázorňuje elektrochemickú odozvu nehrdzavejúcej ocele AISI 430 počas testovania tribokorozie pri zaťažení 10 N v rôznych prostrediach vrátane destilovanej vody, 0,9 % NaCl, 3,5 % NaCl a 5 % NaCl.

Pred nástupom trenia sa hodnoty OCP v testovaných roztokoch výrazne líšia. Najvyšší počiatkový potenciál sa pozoruje v destilovanej vode, čo naznačuje stabilný pasívny film v neprítomnosti chloridových iónov. Naopak, so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov sa OCP posúva negatívnejším smerom, čo naznačuje postupné oslabovanie pasívnej vrstvy v dôsledku agresívnej povahy chloridových iónov.

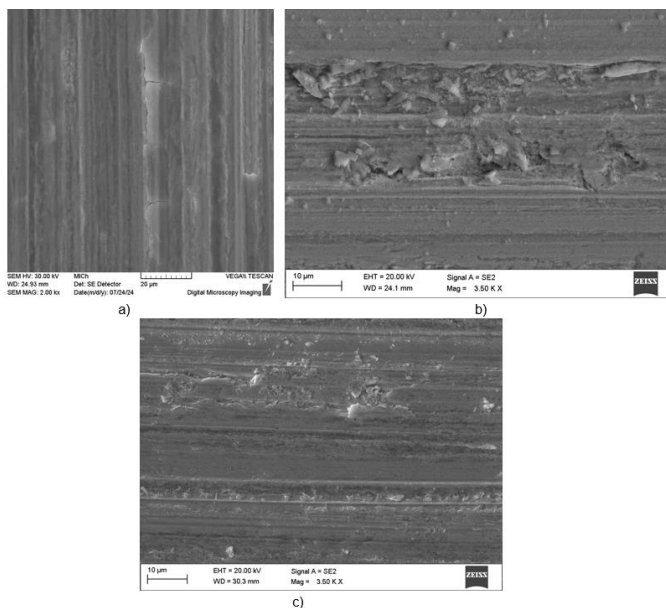
Po začatí trenia všetky krivky vykazujú prudký katodický posun OCP, čo odráža okamžité narušenie pasívneho filmu a vystavenie čerstvého kovu elektrolytu. Veľkosť tohto poklesu potenciálu je najvýraznejšia v 5 % roztoku NaCl, čo naznačuje tribokorózne poškodenie v dôsledku silného depasivujúceho účinku chloridových iónov. Na druhej strane, pokles OCP je najmenej výrazný v destilovanej vode, čo potvrdzuje, že v nekorozívnom prostredí zostáva pasívna vrstva stabilnejšia aj pri mechanickom opotrebovaní. Počas procesu trenia sa

OCP stabilizuje na rôznych úrovniach v závislosti od elektrolytu. Vo všetkých roztokoch obsahujúcich NaCl zostáva OCP výrazne nižší ako v destilovanej vode, čo dokazuje, že chloridové ióny zhoršujú proces repasivácie a zvyšujú rozpúšťanie kovov. Po zastavení trenia dochádza k okamžitému anodickému posunu OCP, čo znamená ukončenie mechanického poškodenia a začiatok repasivácie. Tieto výsledky jasne dokazujú škodlivý vplyv chloridových iónov na tribokorózne správanie nehrdzavejúcej ocele AISI 430 [7, 9, 10, 8].



Obr. 11 Vývoj OCP AISI 430 pri zaťažení 10N v rôznych roztokoch

Na obr. 12 sú porovnávané povrchy AISI 430 po tribokoróznom testovaní pri normálnom zaťažení 10 N v rôznych roztokoch NaCl. Mikrofotografie REM odhalili zreteľné morfológické zmeny výrazne ovplyvnené koncentráciou prostredia NaCl. V 0,9 % roztoku NaCl (obr. 12 a)) bola stopa opotrebenia charakterizovaná prevažne dobre definovanými paralelnými drážkami typickými pre abrazívne opotrebenie a jemné mikrotrhliny naznačovali možné únavové javy na povrchu potenciálne ovplyvnené prostredím. V 3,5 % NaCl (obr. 12 b)) sa morfológia stopy opotrebovania zmenila a vykazovala drsnejšie drážky čiastočne zakryté rozsiahlymi nepravidelnými škvrnami zhrteného materiálu. V prípade 5 % NaCl (obr. 12 c)) vykazovala stopa opotrebovania povrch, na ktorom dominovali vrstvy zložené z produktov opotrebovania a korózie. Tieto pozorovania dokazujú postup, že so zvyšujúcou sa koncentráciou NaCl mechanizmus degradácie prechádza z režimu, ktorý je primárne poháňaný mechanickým opotrebovaním v 0,9 % roztoku NaCl, do režimu, v ktorom dominuje synergická súhra mechanickej degradácie a elektrochemických procesov pri 3,5 % a 5 % NaCl.



Obr. 12 Porovnanie REM mikrofotografií AISI 430 pri normálnom zaťažení 10N v a) 0,9% NaCl (zväčšenie 2000x), b) 3,5% NaCl (zväčšenie 3500x), c) 5% NaCl (zväčšenie 3500x)

### Synergický účinok korózie a mechanického opotrebovania po tribokoróznom testovaní AISI 316Ti a AISI 430

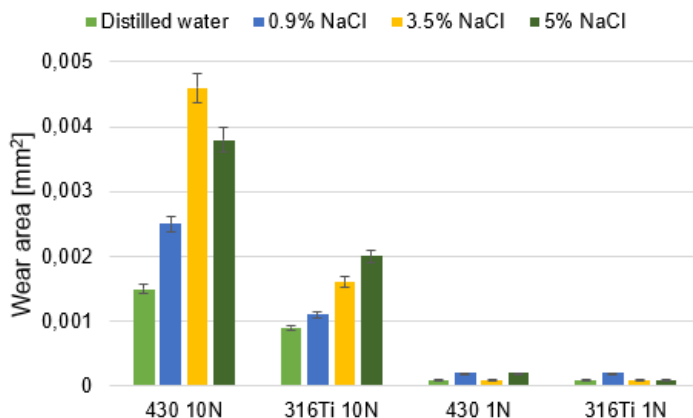
Vzájomné pôsobenie medzi opotrebovaním a koróziou vedie ku kombinovanému účinku, ktorý je zložitejší než len súčet jednotlivých príspevkov opotrebovania bez korózie a korózie bez mechanického pôsobenia. V reálnych priemyselných a biomedicínskych podmienkach sa korózia a opotrebovanie vyskytujú súčasne v tom istom systéme, čo vedie k závažnejšej degradácii materiálu, než by spôsobil každý z týchto procesov samostatne [11].

Opotrebovaný objem je silne ovplyvnený pôsobiacim normálovým zaťažením počas trenia a okolitými podmienkami prostredia. Pozorované mechanizmy opotrebovania sú spôsobené predovšetkým výrazným rozdielom v mechanických vlastnostiach medzi kontaktnými materiálmi, pričom SiC guľôčka vykazuje výrazne vyššiu tvrdosť ako povrchy z nehrdzavejúcej ocele [12]. Tab. 9 uvádza plochy prierezov testovaných vzoriek.

Tab. 9 Plochy prierezov experimentálnych vzoriek po tribokoroznej skúške

Material	Normal load [N]	Wear area [mm <sup>2</sup> ]			
		Distilled water	0.9% NaCl	3.5% NaCl	5% NaCl
AISI 430	10	0.0015	0.0025	0.0046	0.0038
AISI 316Ti	10	0.0009	0.0011	0.0016	0.0020
AISI 430	1	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002
AISI 316Ti	1	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001

Pre lepšiu prehľadnosť a porovnanie sú hodnoty prierezových plôch uvedené aj vo forme grafu (obr. 13). V grafe je znázornená plocha opotrebenia vzoriek z nehrdzavejúcej ocele po tribokoróznom testovaní v štyroch rôznych prostrediach pri normálovom zaťažení 1 N a 10 N.



Obr. 13 Prierezové plochy testovaných vzoriek v rôznych roztokoch

Možno pozorovať jasný trend vzhľadom na aplikované normálové zaťaženie aj koncentráciu chloridov. Pri vyššom zaťažení 10 N sa zaznamenali výrazne väčšie plochy opotrebenia pre všetky roztoky v porovnaní s nižším zaťažením 1 N. Je to očakávané, keďže vyššie mechanické namáhanie spôsobuje väčší úber materiálu v dôsledku intenzívnejšej mechanickej interakcie a vyššej rýchlosti opotrebovania.

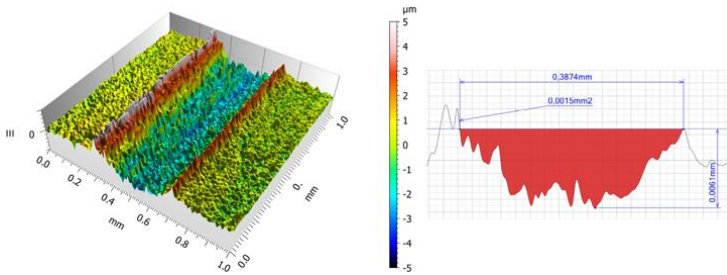
Pri porovnávaní vplyvu testovacích prostredí je zrejmé, že plochy opotrebenia sú trvalo menšie v destilovanej vode, ktorá sa použila ako referenčné prostredie. V destilovanej vode chýbajú agresívne ióny, a preto významne neprispieva ku koróznym procesom, čo znamená, že degradácia je spôsobená najmä čisto mechanickým opotrebovaním. Naopak, plochy opotrebenia v roztokoch obsahujúcich chloridy sú podstatne väčšie, najmä pri 10 N, v dôsledku synergického pôsobenia opotrebenia a korózie. V týchto prostrediach chloridové ióny urýchľujú rozpad pasívneho filmu, zabraňujú jeho účinnej repasivácii a zvyšujú rýchlosť rozpúšťania kovu, čo spoločne zintenzívňuje celkový úbytok materiálu, ako to dokazujú merania OCP (obr. 9, obr. 11).

Pri zvyšovaní koncentrácie chloridov z 0,9 % na 5 % sa pozoruje všeobecný nárast opotrebovanej plochy, najmä pri vyššom zaťažení. To potvrdzuje, že vyššie koncentrácie agresívnych chloridových iónov podporujú silnejšie korózne procesy v dráhe opotrebenia, čo prispieva k zvýšenému poškodeniu povrchu a úbytku materiálu.

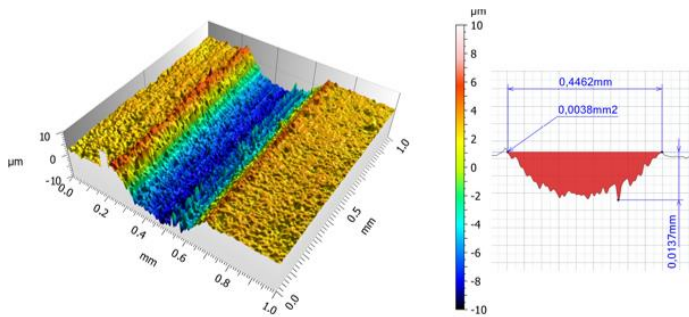
Pri nižšom zaťažení 1 N zostávajú plochy opotrebenia malé vo všetkých testovacích prostrediach. Pripisuje sa to menšiemu mechanickému namáhaniu pôsobiacemu na povrch, čo má za následok menej závažné poškodenie pasívneho filmu a umožňuje účinnejšiu repasiváciu.

Obr. 14 a obr. 15 znázorňujú porovnanie nehrdzavejúcej ocele AISI 430 po tribokoroznej skúške pri normálnom zaťažení 10 N v destilovanej vode a v 5 % roztoku NaCl. Synergický účinok opotrebenia a korózie jasne dokazujú namerané plochy opotrebenia. Pri testovaní v 5 % roztoku NaCl sa plocha opotrebenia zvýšila približne o 153,3 % v porovnaní s destilovanou vodou (z 0,0015 mm<sup>2</sup> na 0,0038 mm<sup>2</sup>), ktorá slúžila ako referenčné prostredie reprezentujúce čisto mechanické opotrebenie. Najvyššia plocha opotrebenia však bola zaznamenaná v 3,5 % roztoku NaCl, kde nárast presiahol 206 %.

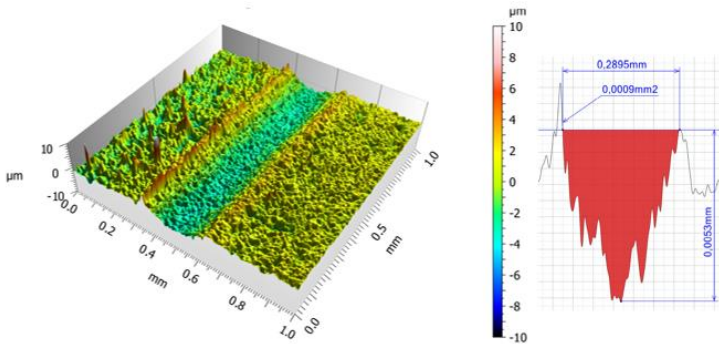
Obr. 16 a obr. 17 porovnávajú topografiu povrchu nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti po testovaní tribokorózie pri normálnom zaťažení 10 N v destilovanej vode a 5 % roztoku NaCl. Nameraná plocha opotrebovania v destilovanej vode bola 0,0009 mm<sup>2</sup>, čo odráža predovšetkým mechanické opotrebovanie v neprítomnosti agresívnych iónov. Naproti tomu plocha opotrebenia v 5 % roztoku NaCl sa zvýšila na 0,0020 mm<sup>2</sup>, čo predstavuje 122 % nárast. Tento výrazný nárast jasne dokazuje synergický účinok opotrebovania a korózie v prostredí bohatom na chloridy.



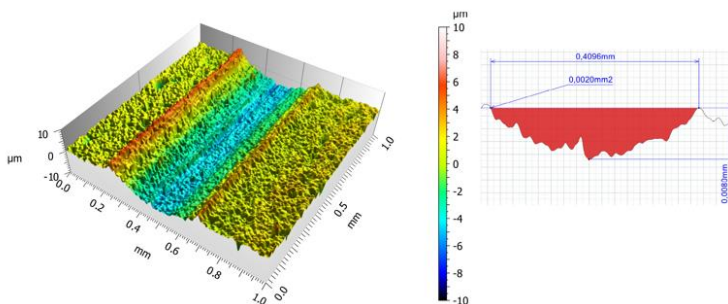
Obr. 14 Topografia povrchu AISI 430 pri normálnom zaťažení 10 N v destilovanej vode



Obr. 15 Topografia povrchu AISI 430 pri normálnom zaťažení 10 N v 5% NaCl



Obr. 16 Topografia povrchu AISI 316Ti pri normálnom zaťažení 10 N v destilovanej vode



Obr. 17 Topografia povrchu AISI 316Ti pri normálnom zaťažení 10 N v 5% NaCl

Na základe nameraných plôch opotrebenia a topografie povrchu pri rôznych testovacích podmienkach je zrejmé, že synergická interakcia medzi mechanickým opotrebením a elektrochemickými reakciami zohráva rozhodujúcu úlohu pri celkovej degradácii materiálu v rámci tribokorozívnych systémov. Výrazný nárast plochy opotrebenia pozorovaný v prostredí obsahujúcom chloridy v porovnaní s destilovanou vodou potvrdzuje, že prítomnosť agresívnych iónov nielen urýchľuje rozpad pasívneho filmu, ale aj bráni jeho repasivácii. To vedie k zvýšenému rozpúšťaniu kovov a zvýšenému poškodeniu povrchu. Dokonca aj pri nižšom zaťažení, keď je mechanické opotrebenie menej závažné, je príspevok korózie stále výrazný. Tieto zistenia zdôrazňujú dôležitosť zohľadnenia kombinovaných účinkov opotrebenia a korózie, pretože ich vzájomné pôsobenie vedie k väčším stratám materiálu ako súčet ich jednotlivých účinkov.

## DISKUSIA

Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce bolo experimentálne preskúmať tribokorozívne charakteristiky nehrdzavejúcich ocelí, ktoré sa využívajú v biomedicínskych a strojárskych aplikáciách. V tejto štúdiu sa hodnotia a porovnávajú tribokorozívne charakteristiky nehrdzavejúcich ocelí AISI 316Ti a AISI 430. S cieľom hlbšie pochopiť mechanizmy tribokorozívnej degradácie sa vykonal komplexný súbor experimentálnych meraní.

Najprv sa vykonal mikroštruktúrne analýzy oboch nehrdzavejúcich ocelí s cieľom hlbšie pochopiť vlastnosti materiálu. Vo výskume uskutočnenom v roku 2007 [13] autori použili rôzne nehrdzavejúce ocele predovšetkým z dôvodu očakávaných rozdielov v rýchlosti ich repasivácie. Tieto rozdiely v koróznej odolnosti sa do značnej miery pripisujú odlišnému zloženiu jednotlivých vzoriek ocele. Koróznou odolnosť však neurčuje len chemické zloženie, rozhodujúcu

úlohu zohráva aj mikroštruktúra. Prítomnosť austenitickej alebo feritickej matrice významne ovplyvňuje rovnomernosť a stabilitu pasívneho filmu, čím ovplyvňuje celkové korózne správanie materiálu [14].

Mikroštruktúra nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti pozostáva z polyedrických zŕn austenitu, pričom v celej štruktúre sú viditeľné zreteľné žihacie dvojčatá. Naproti tomu mikroštruktúra nehrdzavejúcej ocele AISI 430 je prevažne feritická, charakterizovaná rovnomerne tvarovanými zrnami. V rámci hraníc zŕn a v celej štruktúre sú však rozptýlené precipitáty. Tieto precipitáty sú pravdepodobne karbidy bohaté na chróm alebo iné nekovové inklúzie [15].

Priemerná tvrdosť experimentálnej nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti bola nameraná ako 155 HV2 v pozdĺžnom smere a 153 HV2 v priečnom smere. Naproti tomu nehrdzavejúca oceľ AISI 430 vykazovala priemernú tvrdosť 156 HV2 v pozdĺžnom smere a 161 HV2 v priečnom smere. V pozdĺžnom smere bola priemerná mikrotvrdosť nehrdzavejúcej ocele AISI 316Ti meraná skúškou HV0,1 178 HV0,1, zatiaľ čo v priečnom smere sa mierne zvýšila na 189 HV0,1. Naproti tomu nehrdzavejúca oceľ AISI 430 vykazovala priemernú tvrdosť 180 HV0,1 v pozdĺžnom smere a 185 HV0,1 v priečnom smere.

Viacere štúdie skúmali rozdiely v tvrdosti medzi feritickými a austenitickými nehrdzavejúcimi ocelami, pričom zdôraznili, že feritické štruktúry často vykazujú vyššie hodnoty tvrdosti [16].

V ďalšom kroku skúmania sa vyhodnotili korózne vlastnosti experimentálnych nehrdzavejúcich ocelí. Hlavným cieľom týchto skúšok bolo posúdiť chemickú stabilitu pasívnych filmov vytvorených na povrchu materiálu pri absencii akéhokoľvek mechanického poškodenia. Oddelením elektrochemického správania od tribologických vplyvov bolo možné určiť vlastnú koróznou odolnosť materiálov.

Potenciodynamické polarizačné diagramy (PDP) nehrdzavejúcich ocelí AISI 316Ti a AISI 430 v 0,9 %, 3,5 % a 5 % roztokoch NaCl vykazujú odlišné elektrochemické správanie, ktoré zvyčajne ich rozdiely v odolnosti proti korózii pri rôznych koncentráciách chloridov, ale oba materiály vykazujú typický profil kovov, ktoré podliehajú pasivácii, pričom anodické vetvy vykazujú výraznú pasívnu oblasť. To naznačuje, že rýchlosť anodického rozpúšťania sa riadi predovšetkým hustotou pasívneho prúdu, čo odráža tvorbu a stabilitu ochrannej povrchovej vrstvy [17, 18].

So zvyšujúcou sa koncentráciou chloridových iónov však elektrochemická stabilita AISI 316Ti výrazne klesá. Kinetické procesy prebiehajúce na povrchu testovaných vzoriek v koróznom prostredí charakterizujú namerané hodnoty korózneho prúdovej hustoty ( $i_{corr}$ ) a korózneho rýchlosti ( $r_{corr}$ ) [19]. V 0,9 % NaCl je pasívna oblasť širšia a stabilnejšia, pričom  $i_{corr}$  dosahuje hodnotu 0.11  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,

čo svedčí o vyššej odolnosti voči lokalizovanej korózii. So zvyšovaním koncentrácie na 3,5 % a 5 % NaCl sa zvyšuje hustota koróznej prúdovej hustoty, čo naznačuje rozpad pasívneho filmu, ktorý v 5 % roztoku NaCl dosahuje hodnoty až  $0,22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  in 5% NaCl. Anodické krivky sa posúvajú k vyšším prúdovým hustotám v agresívnejších chloridových prostrediach, čo poukazuje na zníženú schopnosť pasívneho filmu chrániť podkladový kov. Korózne potenciál ( $E_{corr}$ ) nameraný v 0,9 % NaCl dosiahol hodnotu  $-75,76 \text{ mV}$  a so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov sa hodnoty  $E_{corr}$  posúvali v negatívnom smere a dosiahli až  $-138,88 \text{ mV}$ . Pozitívnejší korózne potenciál naznačuje väčšiu termodynamickú stabilitu povrchu materiálu [20].

Potenciodynamické polarizačné krivky pre AISI 430 ukazujú koróznou prúdovú hustotu  $0,067 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  v 0,9 % NaCl, ktorá je o niečo nižšia ako v prípade AISI 316Ti za rovnakých podmienok. V 5 % NaCl však korózna prúdová hustota pre AISI 430 prudko stúpa na  $0,41 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , čo je takmer dvojnásobok hodnoty zaznamenatej pre AISI 316Ti v rovnakom prostredí, čo naznačuje pokles koróznej odolnosti so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov. Korózne potenciál ( $E_{corr}$ ) nameraný v 0,9 % NaCl pre AISI 430 dosiahol  $-71,95 \text{ mV}$  a so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov sa hodnoty  $E_{corr}$  posúvali v negatívnom smere a dosiahli až  $-158,46 \text{ mV}$ .

Mnohé štúdie potvrdzujú pozorovanie, že náchylnosť na koróziu sa zvyšuje so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov. Tento zvýšený korózne účinnok sa pripisuje predovšetkým malým rozmerom, vysokej pohyblivosti, silnému aniónovému charakteru a vysokej rozpustnosti chloridových solí, ktoré umožňujú chloridovým iónom agresívne prenikať a narušovať pasívne filmy na kovových povrchoch [21].

Na ďalšie potvrdenie týchto zistení sa uskutočnili merania elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS) na posúdenie polarizačnej odolnosti experimentálnych materiálov.

Nyquistove grafy pre AISI 316Ti a AISI 430 po jednej hodine expozície v troch rôznych koncentráciách NaCl odhaľujú výrazné rozdiely v koróznom správaní a stabilite povrchového filmu. V prípade AISI 316Ti sa veľkosť polkruhov znižuje so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov. Najväčší oblúk sa pozoruje v 0,9 % NaCl, po ktorom nasledujú o niečo menšie oblúky v 3,5 % a 5 % NaCl. Tento trend naznačuje, že pasívna vrstva na AISI 316Ti je najstabilnejšia a najviac chráni v prostredí s nižším obsahom chloridov. Naopak, AISI 430 vykazuje výraznejší pokles impedančnej odozvy so zvyšujúcim sa obsahom chloridov. Nyquistov graf ukazuje výrazný pokles priemeru polkruhu od 0,9 % do 5 % NaCl. AISI 316Ti dôsledne vykazuje väčšie priemery polkruhov pri všetkých koncentráciách chloridov, najmä pri 5 % NaCl, kde je rozdiel vo výkonnosti najviditeľnejší. To potvrdzuje, že AISI 316Ti vytvára ochranejšiu a

stabilnejší pasívny film, pravdepodobne vďaka vyššiemu obsahu legujúcich látok, najmä molybdénu, chrómu a titánu [22, 23, 24].

Negatívny vplyv zvyšujúcej sa koncentrácie chloridov bol ďalej potvrdený prostredníctvom analýzy pomocou rastrovacieho elektrónového mikroskopu (REM), ktorá poskytla detailný pohľad na morfológiu povrchu skúmaných nehrdzavejúcich ocelí (obr. 5 a obr. 8). Bodová korózia pozorovaná u ocelí AISI 316Ti a AISI 430 v 0,9 % roztoku NaCl bola relatívne nízka, pričom korózne body boli malé a riedko rozmiestnené, čo poukazuje na to, že pasívna vrstva zostáva do veľkej miery neporušená a účinne obmedzuje lokalizovanú koróziu. So zvyšujúcou sa koncentráciou NaCl na 3,5 % sa jasne prejavil nárast počtu aj veľkosti kor. bodov, čo naznačuje výraznejšie narušenie pasívnej vrstvy a zníženú schopnosť repassivácie. Najvýraznejšia degradácia povrchu sa vyskytla v 5 % NaCl, kde sa hustota a veľkosť korózných bodov výrazne zvýšili. Väčšie, hlbšie a početnejšie body za týchto podmienok odrážajú vážne narušenie integrity pasívnej vrstvy spôsobené zvýšenou koncentráciou chloridových iónov. Pri porovnaní ocelí AISI 430 a AISI 316Ti za rovnakých testovacích podmienok je zjavný rozdiel v odolnosti voči korózii. AISI 430 ako feritická oceľ s nižším obsahom legujúcich prvkov vykazuje výraznejšiu bodovú koróziu aj pri nižších koncentráciách chloridov. Naopak, AISI 316Ti preukazuje konzistentne lepšiu odolnosť voči lokalizovanej korózii, a to najmä pri vyšších koncentráciách chloridov. Tieto pozorovania sú v súlade s elektrochemickými dátami a literárnymi poznatkami, ktoré potvrdzujú lepšiu koróznou odolnosť austenitických nehrdzavejúcich ocelí v prostrediach bohatých na chloridy [17].

Tribokorózne experimenty zahŕňali súčasné monitorovanie súčiniteľa trenia (COF) a potenciálu nezapojenej elektródy (OCP) počas celého testovania. OCP zaznamenaný počas tribokorózie reprezentuje kombinovanú elektrochemickú odozvu, ktorá zahŕňa správanie neopotrebovaného povrchu aj mechanicky narušeného opotrebovanej časti [6].

Počas tribokorózných testov je zrejmé, že v počiatočnej fáze merania (stabilizačná fáza) OCP oboch materiálov AISI 316Ti a AISI 430 postupne narastá v čase, čo pravdepodobne súvisí s postupným zahusťovaním a stabilizáciou pasívneho oxidického filmu na povrchu. Tento trend je však následne nahradený postupným poklesom a výraznými fluktuáciami OCP, ktoré možno pripísať elektrochemickému oslabeniu pasívnej vrstvy spôsobenému agresívnym pôsobením chloridových iónov v roztoku [10].

Na začiatku tribokorózneho testu počas stabilizačnej fázy za statických podmienok počiatočné hodnoty OCP odrážali negatívny účinok chloridových iónov na skúšané nehrdzavejúce ocele. Najvyššie hodnoty boli konzistentne zaznamenané v destilovanej vode, čo poukazuje na minimálnu elektrochemickú destabilizáciu. So zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov sa počiatočné hodnoty

OCP posúvali do záporných hodnôt. V prípade AISI 316Ti sa OCP počas stabilizačnej fázy pohyboval okolo 0 V/SCE v destilovanej vode a poklesol na približne  $-0,15$  V/SCE v 3,5 % NaCl. V prípade AISI 430 bola najmenej negatívna hodnota OCP zaznamenaná v destilovanej vode, približne  $-0,05$  V/SCE, zatiaľ čo v 5 % NaCl výrazne poklesla na približne  $-0,18$  V/SCE. Tieto výsledky ukazujú, že AISI 430 vykazuje nižšie počiatkové hodnoty OCP vo všetkých testovaných prostrediach v porovnaní s AISI 316Ti, čo svedčí o menej stabilnom elektrochemickom správaní voči chloridovým iónom.

Po začatí trenia obe testované ocele vykázali náhly OCP, hoci rozsah tohto katodického posunu sa medzi nimi líšil. Tento negatívny posun je pripisovaný mechanickému narušeniu alebo odstráneniu pasívnej vrstvy, čím sa odhalí čerstvý kovový povrch vystavený elektrolytu. Výsledkom je zosilnenie anodických reakcií, zatiaľ čo okolité oblasti sú katodicky polarizované v dôsledku uvoľňovania elektrónov z novo odhaleného povrchu. Je zrejmé, že rozsah katodického posunu sa zvyšuje s rastúcim aplikovaným zaťažením. Vyššie zaťaženie zvyšuje pomer opotrebovaného k neopotrebovanému povrchu, čo vedie k väčšiemu poškodeniu pasívnej vrstvy a následne k výraznejšiemu poklesu OCP [7, 10, 25].

OCP diagramy pre AISI 316Ti a AISI 430 pri normálovom zaťažení 10 N (obr. 9 a obr. 11) preukazujú, že posun OCP počas tribokorózie je ovplyvnený nielen aplikovaným zaťažením a typom materiálu, ale aj korozívnym prostredím. V oboch prípadoch boli najmenej negatívne hodnoty OCP zaznamenané v destilovanej vode, čo odráža nižšiu agresivitu média a vyššiu stabilitu pasívnej vrstvy v neprítomnosti chloridov. So zvyšujúcou sa koncentráciou NaCl z 0,9 % na 5 % bol pozorovaný výraznejší katodický posun OCP. Vo všetkých testovaných podmienkach vykazovala oceľ AISI 430 konzistentne negatívnejšie hodnoty OCP v porovnaní s AISI 316Ti. V najagresívnejšom prostredí 5 % NaCl OCP AISI 316Ti klesol približne na  $-0,325$  V/SCE, zatiaľ čo u AISI 430 poklesol ešte viac, približne na  $-0,400$  V/SCE. To naznačuje, že AISI 316Ti si udržiava relatívne stabilnejšiu pasívnu vrstvu aj za kombinovaného mechanického a elektrochemického zaťaženia.

Na ďalšiu analýzu tribokorózneho správania oboch ocelí bola po testoch vyhodnotená topografia povrchu a prierezová plocha opotrebenia. Vo všetkých testovaných prostrediach AISI 316Ti konzistentne vykazovala menšie prierezové plochy opotrebenia ako AISI 430, čo poukazuje na jej vyššiu odolnosť voči kombinovaným účinkom mechanického opotrebenia a elektrochemických interakcií.

Tento rozdiel bol najvýraznejší pri vyšších koncentráciách chloridov a zaťažení 10 N, kde AISI 430 vykazovala výrazný nárast úbytku materiálu. Napríklad v 3,5 % NaCl mala AISI 430 najväčšiu plochu opotrebenia zo všetkých testov. Pri

nižšom zaťažení 1 N bol celkový úbytok materiálu menší u oboch ocelí; avšak trend zostal rovnaký – AISI 316Ti si udržiavala nižšie hodnoty opotrebenia vo všetkých roztokoch, zatiaľ čo AISI 430 vykazovala zreteľné zvyšovanie plochy opotrebenia so stúpajúcou koncentráciou chloridov. To potvrdzuje, že AISI 430 je náchyľnejšia na tribokoróziu aj pri miernejšom mechanickom zaťažení.

Získané porovnávacie údaje jednoznačne potvrdzujú vyššiu odolnosť AISI 316Ti v tribokorózných podmienkach, čo ju predurčuje na použitie v aplikáciách, kde pôsobia súčasne mechanické a korozívne interakcie. AISI 430 vykazuje obmedzenú odolnosť voči synergickým účinkom opotrebenia a korózie v náročnejších podmienkach.

Vyššia trvanlivosť AISI 316Ti v tribokorózných podmienkach v porovnaní s AISI 430 je jednoznačne podporená meraniami vykonanými v rámci tejto práce. Pri vyššom mechanickom zaťažení (10 N) a v prostrediach s obsahom chloridov sa rozdiely v tribokoróznom správaní ešte viac prehĺbili. Prierezová plocha opotrebenia AISI 430 pri 10 N bola o 67 % väčšia ako u AISI 316Ti v destilovanej vode. Ešte významnejšie bolo zrýchlenie degradácie AISI 430 so stúpajúcou koncentráciou chloridov – v 0,9 % NaCl bolo opotrebenie o 127 % vyššie, v 3,5 % NaCl dosiahlo nárast až 187 % a v 5 % NaCl zostalo stále o 90 % vyššie ako u AISI 316Ti.

Namerané korózne charakteristiky ďalej potvrdzujú lepšie tribokorózne vlastnosti AISI 316Ti v porovnaní s AISI 430. Výsledky získané z testov potentiodynamickéj polarizácie (PDP) a elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS) jasne ukázali, že AISI 316Ti má lepšiu elektrochemickú stabilitu, najmä vo vysoko chloridových prostrediach. Táto výhoda sa odráža aj v meraniach OCP, kde AISI 316Ti preukázala vyššiu schopnosť repasívácie počas trenia. Naopak, AISI 430 vykazovala výraznejší a dlhodobejší katodický posun OCP počas trenia vo všetkých testovaných prostrediach, čo naznačuje menej efektívnu regeneráciu pasívnej vrstvy. Tieto zistenia potvrdzujú, že AISI 316Ti si udržiava stabilnejšie ochranné správanie pri kombinovanom mechanickom a koróznom zaťažení.

## ZÁVER

Dizertačná práca bola zameraná na hodnotenie kľúčových parametrov ovplyvňujúcich tribokorózne správanie vybraných nehrdzavejúcich ocelí.

Mikroštruktúrna analýza ukázala, že AISI 316Ti vykazuje austenitické zrná so žľhacími dvojčatami a prítomnosťou karbidov titánu, zatiaľ čo AISI 430 má feritickú štruktúru s precipitátmi bohatými na chróm. Tvrdostné skúšky preukázali, že AISI 430 dosahuje o niečo vyššie hodnoty pri zaťažení HV2, zatiaľ čo AISI 316Ti vykazuje mierne vyššiu mikrotvrdosť (HV0.1) v priečnom smere.

Elektrochemické testovanie potvrdilo, že korózna odolnosť oboch materiálov klesá so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridových iónov. Výsledky potentiodynamickkej polarizácie (PDP) ukázali, že AISI 316Ti si udržiavala pozitívnejší korózný potenciál v porovnaní s AISI 430, čo poukazuje na lepšiu koróznou odolnosť. Hodnoty pittingového potenciálu ( $E_p$ ) boli pri AISI 316Ti konzistentne vyššie ako pri AISI 430, pričom u oboch materiálov došlo so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov k ich poklesu. Tieto zistenia ďalej podporili merania elektrochemickej impedančnej spektroskopie (EIS), kde AISI 316Ti preukázala vyššie hodnoty polarizačného odporu, čo naznačuje lepšiu stabilitu pasívnej vrstvy v prostredí bohatom na chloridy.

Tribokorózne testy realizované pri zaťaženiach 1 N a 10 N ukázali, že koncentrácia chloridov a veľkosť aplikovaného zaťaženia významne ovplyvňujú mieru degradácie. Pred spustením trenia sa hodnoty OCP líšili v závislosti od korozívneho prostredia, pričom počas trenia, najmä pri vyššom zaťažení 10 N, došlo k výraznému negatívnemu posunu potenciálu. AISI 316Ti preukázala schopnosť repasivácie, keď sa hodnoty potenciálu po počiatočnom poklese dokázali rýchlejšie obnoviť. Naproti tomu AISI 430 vykazovala menšiu schopnosť obnovy a hlbší pokles OCP, predovšetkým v 5 % NaCl, čo naznačuje nižšiu elektrochemickú stabilitu v tribokorózných podmienkach.

Analýza topografie povrchu a prierezových plôch opotrebenia potvrdila prítomnosť synergického efektu medzi mechanickým opotrebením a koróziou. Tento efekt bol výraznejší pri vyššom mechanickom zaťažení a v prostredí s vyššou koncentráciou chloridov. U AISI 316Ti sa opotrebovaná plocha zvýšila o 122 % pri prechode z destilovanej vody do 5 % NaCl, zatiaľ čo u AISI 430 bol tento nárast ešte výraznejší – 153,53 % za rovnakých podmienok. Priame porovnanie oboch materiálov ukázalo, že AISI 430 vykazovala väčšie opotrebovanie vo všetkých testovaných prostrediach, s rozdielmi od 67 % v destilovanej vode po 187 % v 3,5 % NaCl.

## PRÍNOS PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRAX

Jedným z kľúčových vedeckých zistení tejto dizertačnej práce je vyhodnotenie a potvrdenie synergického efektu medzi mechanickým opotrebením a elektrochemickými interakciami v prostredí s obsahom chloridov. Výsledky výskumu preukázali, že so zvyšujúcou sa koncentráciou chloridov sa negatívny vplyv na tribokorózne vlastnosti výrazne zintenzívňuje, čo vedie k urýchlenému poškodzovaniu povrchu a zvýšenej strate materiálu v dôsledku opotrebenia. Hlavný prínos práce spočíva v systematickom a multidisciplinárnom skúmaní tribokoróznych mechanizmov prostredníctvom integrovanej metodiky zahŕňajúcej merania tvrdosti, elektrochemickú impedančnú spektroskopiu (EIS), potentiodynamickú polarizáciu (PDP), monitorovanie OCP a 3D profilometriu povrchu. Tento komplexný experimentálny prístup poskytuje nové poznatky o vývoji integrity povrchu a zložitých degradačných procesoch, čím vytvára pevný základ pre ďalší výskum v oblasti tribokorózie.

Významným prínosom tejto práce je aj kvantitatívne porovnanie tribokoróznej odozvy medzi austenitickou (AISI 316Ti) a feritickou (AISI 430) nehrdzavejúcou oceľou, pričom výsledky jednoznačne potvrdzujú vyššiu odolnosť austenitickej ocele pri súčasnom pôsobení mechanického opotrebenia a korozívnych interakcií.

Táto práca zároveň prináša pridanú hodnotu aj pre priemyselnú prax. Poskytuje empirické dáta, ktoré môžu slúžiť ako podklad pre výber vhodných materiálov a stratégií povrchového inžinierstva pre súčasti vystavené kombinovanému pôsobeniu trenia a korózie, ako sú ortopedické implantáty, námorné konštrukcie či zariadenia v potravinárskom priemysle. Kvantifikáciou opotrebenia a korózneho správania v simulovaných fyziologických a priemyselných podmienkach táto štúdia zároveň prispieva k vývoju spoľahlivejších, trvácnejších a bezpečnejších systémov naprieč biomedicínskym aj strojárskym sektorom.

## RESUMÉ

The dissertation explores the complex phenomenon of tribocorrosion, which represents the combined action of mechanical wear and electrochemical processes. These coupled degradation processes are especially critical in engineering and biomedical applications, where components are often exposed to dynamic mechanical loading and aggressive chemical environments simultaneously. The primary objective of this dissertation was to experimentally investigate the tribocorrosion characteristics of stainless steels widely utilized in biomedical and engineering applications. This study evaluates and compares the tribocorrosion characteristics of AISI 316Ti and AISI 430 stainless steels. To develop a deeper understanding of the tribocorrosion degradation mechanisms, a comprehensive set of experimental measurements was performed.

The experimental measurements involved comprehensive material characterization through microstructural analysis, hardness testing (HV2 and HV0.1), electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and potentiodynamic polarization (PDP) to assess corrosion resistance in 0.9%, 3.5%, and 5% NaCl solutions. Tribocorrosion tests were conducted using a Ball-on-Flat setup under 1N and 10N normal loads, in both distilled water (inert reference medium) and chloride-containing solutions. During these tests, the coefficient of friction (COF) and open circuit potential (OCP) were monitored simultaneously. Post-test evaluations included surface analysis of the experimental samples, cross-sectional wear track measurements, and SEM analysis.

The results showed that AISI 316Ti consistently outperformed AISI 430 in terms of corrosion resistance and tribocorrosion performance. Despite similar hardness levels, AISI 316Ti demonstrated significantly lower cross-sectional wear areas and more stable OCP values, especially in high chloride concentrations. Notably, the study confirmed a synergistic effect between wear and corrosion: wear accelerated passive film breakdown, while chloride ions hindered repassivation, leading to increased material loss.

In conclusion, the research confirms that the microstructure and alloying composition are crucial for maintaining passive film stability and minimizing damage in tribocorrosive environments. The dissertation contributes valuable insights into material selection and performance prediction for stainless steels in harsh operating conditions, and lays a strong foundation for further research in both industrial and biomedical tribocorrosion applications.

## ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

### Skupina B - Publikácie v karentovaných časopisoch

#### ADC – Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- **ČUCHOR, D.**, BRONČEK, J., OBERTO VÁ, V., DRBÚL, M., RADEK, N.: "Comparison of tribological and corrosion characteristics of AISI 316Ti and AISI 430 stainless steels." Production Engineering Archives, ISSN 2353-5156, ISSN (online) 2353-7779 (2024), s 565-576.

#### AFC – Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- ŠIKYŇA, L., NOVÝ, F., PALČEK, P., DRÍMALOVÁ, P., CHVALNÍKOVÁ, V., SLEZÁK, M., UHRIČÍK, M., **ČUCHOR, D.**: "Hydrogen embrittlement of ferritic steel 1.4104." Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, ISBN 978-83-970411-0-3, (2025) s. 9-13.
- **ČUCHOR, D.**, KOPAS, P., BRONČEK, J., BRUMERČÍK, F.: "Experimental determination of the mechanical properties of Onyx material." Quality production improvement and system safety: QPI 16 - CZOTO 10, Materials research proceedings, ISSN 2474-3941(2022).
- OBERTO VÁ, V., KAJÁNEK, D., HADZIMA, B., PEZZATO, L., TAŇSKI, T., **ČUCHOR, D.**.: Enhanced Corrosion Resistance of Magnesium Alloys by Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Modified with Polylactic Acid." 39th International Colloquium: Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, 2024 pp. 147-151. ISBN 978-83-970411-0-3
- **ČUCHOR, D.**, ŠIKYŇA, L., OBERTO VÁ, V., FIAČAN, J., RADEK, N., BRONČEK, J.: "Experimental analyses of tribological properties of AISI 316Ti and AISI 430 stainless steel." Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, ISBN 978-83-970411-0-3, (2025) s. 20-25.
- **ČUCHOR, D.**, FIAČAN, J., ČECHMÁNEK, D., BRONČEK, J.: "Design of specialized gripper for automated casting manipulation." TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, ISSN 2352-1457 (2023), s. 584-591.
- ČUCHOR, M., BRONČEK, J., DZIMKO, M., **ČUCHOR, D.**: "Friction coefficient of the deposited DLC layer as a function of the test ball material." TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, ISSN 2352-1457 (2023), s. 717-723
- ČECHMÁNEK, D., KOHÁR, R., **ČUCHOR, D.**, POMPÁŠ, L.: "A structural design of the injection mould." TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, ISSN 2352-1457 (2023), s. 576-583.

#### AFD – Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- **ČUCHOR, D.**, BRONČEK, J., RADEK, N.: "Experimentálna analýza tribologických vlastností povrchov nehrdzavejúcich ocelí AISI 316Ti a AISI 430." SEMDOK 2024, ISBN 978-80-554-2076-9 (2024).
- **ČUCHOR, D.**, ČUCHOR, M., BRONČEK, J.: "Experimentálne určenie mechanických vlastností materiálu Onyx." SEMDOK 2023, ISBN 978-80-554-1947-3, s. 25-30

## LITERATÚRA

- [1] **D. Landolt**, "Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems," *ournal of Physics D: applied physics*, 39(15), 3121, no. DOI: 10.1088/0022-3727/39/15/S01, 2006.
- [2] **E. R. Axente, L. Benea, N. Bogatu and J. P. Celis**, "Susceptibility to tribocorrosion degradation of 304 L stainless steel from dental structures in biological solution.," *Tribology International*, 174, 107769., no. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107769, 2022.
- [3] **M. T. Mathew, P. Srinivasa Pai, R. Pourzal, A. Fischer and M. A. Wimmer**, "Significance of tribocorrosion in biomedical applications: overview and current status," *Advances in tribology*, no. DOI: 10.1155/2009/250986, 2009.
- [4] **A. I. Munoz, N. Espallargas and S. Mischler**, *Tribocorrosion*, Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [5] **R. J. Wood and S. P. Hutton**, "The synergistic effect of erosion and corrosion: trends in published results," *Wear*, 140(2), 387-394, no. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90098-U, 1990.
- [6] **J. Chen, Q. Zhang, Q. Li, S. Fu and J. Wang**, "Corrosion and tribocorrosion behaviors of AISI 316 stainless steel and Ti6Al4V alloys in artificial seawater," *Transactions of nonferrous metals society of China*, 24(4), 1022-1031, no. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63157-5, 2014.
- [7] **B. Zhang, J. Wang, H. Liu and F. Yan**, "Tribocorrosion properties of AISI 1045 and AISI 2205 steels in seawater: Synergistic interactions of wear and corrosion," *Friction* 9(1):1-12, no. DOI: 10.1007/s40544-020-0376-1, 2020.
- [8] **E. Liu, Y. Zhang, L. Zhu, Z. Zeng and R. Gao**, "Effect of strain-induced martensite on the tribocorrosion of AISI 316L austenitic stainless steel in seawater," *Rsc Advances*, 7(71), 44923-44932, no. DOI: 10.1039/C7RA07318F, 2017.
- [9] **B. Jeglič, D. M. Dražić and J. P. Popić**, "Open circuit potentials of metallic chromium and austenitic 304 stainless steel in aqueous sulphuric acid solution and the influence of chloride ions on them," *Corrosion Science*, 50(5), 1235-1244, no. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.01.012, 2008.

- [10] **B. Zhang, J. Wang, Y. Zhang, G. Han and F. Yan**, *Comparison of tribocorrosion behavior between 304 austenitic and 410 martensitic stainless steels in artificial seawater*, DOI: 10.1039/C6RA18497A, 2016.
- [11] **M. Maher, I. Iraola-Arregui, H. B. Youcef, B. Rhouta and V. Trabadelo**, *The synergistic effect of wear-corrosion in stainless steels: A review*, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.010, 2022.
- [12] **D. Čuchor, J. Bronček, V. Obertová, M. Drbůl and N. Radek**, "Comparison of tribological and corrosion characteristics of AISI 316Ti and AISI 430 stainless steels," *Production Engineering Archives*, no. DOI: 10.30657/pea.2024.30.52 , 2024.
- [13] **J. O. Bello, R. J. Wood and J. A. Wharton**, "Synergistic effects of micro-abrasion–corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels," *Wear*, 263(1-6), 149-159, no. DOI: 10.1016/j.wear.2006.12.044, 2007.
- [14] **J. Ahmed, I. U. Toor, M. A. Hussein, N. Al-Aqueeli and M. M. Baig**, "Insight into Structural Changes and Electrochemical Properties of Spark Plasma Sintered Nanostructured Ferritic and Austenitic Stainless Steels," *Nanomaterials*, 12(7), 1225, no. DOI: 10.3390/nano12071225, 2022.
- [15] **M. Sun, S. Liu, Y. Cheng, Z. Cheng, R. Ren and C. Chen**, "Microstructure characteristics and mechanical properties of the thin-plate AISI 430 ferritic stainless steel joints by interrupted pulsed arc welding," *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 4500-4511, no. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.063, 2022.
- [16] **G. Argandoña, J. F. Palacio, C. Berhanga and M. Biezma**, "Effect of the temperature in the mechanical properties of austenite, ferrite and sigma phases of duplex stainless steels using hardness, microhardness and nanoindentation techniques," *Metals*, 7(6), 219, no. DOI: 10.3390/met7060219, 2017.
- [17] **T. Bellezze, A. Viceré, G. Giuliani, E. Sorrentino and G. Roventi**, "Study of Localized Corrosion of AISI 430 and AISI 304 Batches Having Different Roughness," *Metals*, 8(4), 244, no. DOI: 10.3390/met8040244, 2018.
- [18] **V. Zatkalíková, Š. Podhorský, M. Štrbák, T. Liptáková, L. Markovičová and L. Kucharíková**, "Plasma electrolytic polishing—An ecological way for increased corrosion resistance in austenitic stainless steels," *Materials*, 15(12), 4223, no. DOI: 10.3390/ma15124223, 2022.

- [19] **F. Pastorek, K. Borko, S. Dundeková, S. Fintová and B. Hadzima**, *Electrochemical corrosion characteristics of phosphated S355J2 steel in sulfate environment*, DOI: 10.1515/kom-2016-0017, 2016.
- [20] **K. Borko, F. Pastorek and B. Hadzima**, *Electrochemical Corrosion Characteristics of High Strength Low Alloy Domex 700 Steel After Mechanical Surface Treatment in Chloride Environment*, DOI: 10.1515/kom-2017-0020, 2017.
- [21] **M. D. Asaduzzaman, C. M. Mohammad and I. Mayeedul**, "Effects of concentration of sodium chloride solution on the pitting corrosion behavior of AISI 304L austenitic stainless steel," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 17(4), 477-483, no. DOI: 0.2298/CICEQ110406032A, 2011.
- [22] **D. S. Cramer and B. S. Covino**, "Corrosion of Wrought Stainless Steels," in *ASM Handbook, Volume 13B: Corrosion: Materials*, ASM International, DOI: 10.1361/asmhba0003812, 2005, pp. 54-77.
- [23] **MACHINEMFG**, "The Impact of Alloying Elements on Stainless Steel," [Online]. Available: <https://www.machinemfg.com/alloying-elements-affect-stainless-steel/>. [Accessed 03 02 2025].
- [24] **M. Ibrahim, S. Abd El Rehim and M. Mamza**, "Corrosion behavior of some austenitic stainless steels in chloride environments," *Materials Chemistry and Physics*, 115(1), 80-85, no. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2008.11.016, 2009.
- [25] **G. Han, P. Jiang, J. Wang and F. Yan**, "Effects of NaCl concentration on wear–corrosion behavior of SAF 2507 super duplex stainless steel," *Rsc Advances*, 6(112), 111261-111268, no. DOI: 10.1039/C6RA23030J, 2016.