

TRIBOKOROZIJA IN TRIBOKOROZIJSKO PREIZKUŠANJE

Tadeja Kosec

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 11, 1000 Ljubljana

STROKOVNI ČLANEK

POVZETEK

V prispevku so predstavljene osnove tribokorozijskih procesov. Tribokorozijski proces je korozijski proces, ki nastane ob sočasnem drgnjenju ali obrabi materiala. Zaradi odstranjevanja oksidnih plasti je korozijski proces zato največkrat pospešen. Za spremljanje korozijskih procesov potrebujemo posebno preizkuševališče – tribometer, predelan za možnost spremljanja elektrokemijskih procesov v trielektrodni korozijski celici. Seznanimo se z različnimi možnostmi tribokorozijskega preizkušanja, mogočimi metodami za tribokorozijsko spremljanje procesov ter predstavimo tipične primere tribokorozijskega preizkušanja.

Ključne besede: tribokorozijska, elektrokemijske tehnike, tribokorozijsko preizkuševališče, obraba

Tribocorrosion and tribocorrosion testing

ABSTRACT

A basic introduction to tribocorrosion processes is given. The tribocorrosion process is a corrosion process which results from simultaneous rubbing, fretting of metals. The corrosion process is in most cases accelerated due to removal of the oxide films. For tribocorrosion study a special tribocorrosion system is needed – it consists of a tribometer with a specially constructed three-electrode electrochemical cell. Different setups for possible tribocorrosion studies are presented as well as different electrochemical techniques that enable to study the tribocorrosion processes. Different case studies are presented as well.

Keywords: tribocorrosion, electrochemical techniques, tribocorrosion set-up, wear

1 SPLOŠNO O TRIBOKOROZIJI

Pri relativnem gibanju kontaktnih površin je tribološki kontakt zelo zapleten, saj vključuje simultani proces trenja, deformacije in obrabe. Meja med mehanizmi na makro- in mikronivoju je težko določljiva, saj so med seboj prepleteni in povezani. Če je pri procesih prisoten elektrolit (npr. oksidirano mazivo, kondenzat, tkivo, slina) se mehanski procesi obrabe kombinirajo s korozijskimi. Tribološki proces vključuje tako spremembo materiala kot tudi spremembe, ki nastanejo kot rezultat skupnega delovanja obrabe in korozije. V splošnem omenjena kombinacija ni vsota, temveč sinergija obeh vrst procesov, zato so vplivi posameznih parametrov pri skupnih tribokorozijskih procesih izrazito nelinearni in nestacionarni.

Za uspešno poznanje tribokorozijskega vedenja materiala ni dovolj zgolj poznanje tribološkega delovanja brez upoštevanja korozivnih razmer, kot tudi ni dovolj poznanje kemijskega vedenja brez poznanja vplivov obrabe. Zato tribokorozijska kot veda zahteva interdisciplinarno obravnavo. V zadnjem času je povečano zanimanje za razumevanje uporabe različnih materialov in njihovih kombinacij, kar sili tako raziskovalce kot inženirje k sodelovanju zaradi

znanstvenih, ekonomskih in praktičnih interesov. Pridobivanje temeljitega vpogleda v mehanizme in določevanje kritičnih mehanskih in kemijskih vplivov na tribološki proces ima zelo velik pomen. Določene zakonitosti pri uporabi posameznih materialov v izbranih okoljih in določenih obremenitvah so sicer poznane, vendar je povezovanje znanj s področja tribologije in korozije materialov še vedno relativno neraziskano področje. Glavna vzroka za to sta težavnost simuliranja realnih razmer in nestacionarnost procesov.

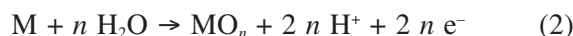
1.1 Opredelitev problema

Večina korozijskih procesov je po naravi elektrokemijskih. To vključuje prenos elektronov. Oksidacija kovine poteče na naslednji način:



kjer je M kovina (angl. *metal*) in n število izmenjanih elektronov na atom kovine. Na anodi se kovina raztaplja, reakcija (1), in prehaja iz oksidacijskega stanja 0 v n^{+} (tj. aktivna kovina).

Če pa se v elektrolitu tvori oksid (tj. pasivna kovina), poteče reakcija po enačbi (2):



Partnerska katodna reakcija je lahko sproščanje vodika, ki je favorizirana v kislem okolju, ter redukcija kisika, ki je favorizirana v bazičnem okolju in zračenih raztopinah. Pri tem potečejo reakcije (3)–(5):



Pri navadnih korozijskih razmerah je reakcija (1) v ravnotežju z eno ali več redukcijskih reakcij po enačbah (3)–(5). Ko sta katodni in anodni tok enaka, govorimo o korozijskem potencialu E_{kor} .

Tako je bilo razvitih nekaj vrst elektrokemijskih tehnik za spremljanje in kontroliranje korozijskega potenciala. Prav tako so jih uporabili v tribokorozijskih eksperimentih za spremljanje procesov med drgnjenjem. Največkrat uporabljene elektrokemijske tehnike so meritve korozijskega potenciala, potenciostatske ter potenciodinamske meritve. To pomeni, da je uporabnost konvencionalnih elektrokemijskih tehnik, ki so sicer primerne za napoved splošne korozijske obstojnosti, pri triboloških procesih delno omejena zaradi nestacionarnih razmer med tribološko

obrado. Zato je ovrednotenje elektrokemijskega vpliva pri sinergijski kombinaciji z mehanskimi procesi problematično, posledično pa je nezanesljivo tudi modeliranje teh procesov. Za spremljanje triboelektrokemijskih procesov je treba razviti in vključiti tudi druge elektrokemijske tehnike.

2 KOROZIJSKI IN MEHANSKI PROCESI

Drgnjenje materiala lahko vodi k lokalnemu odstranjevanju pasivne plasti. Posledično lahko nastopi korozijska obraba, ki v kontaktnem področju spremeni lastnosti materiala. Pri tem se lahko v kontaktnem področju nalagajo korozijski produkti (prisotnost tretjega telesa, angl. *third body*), ki vplivajo na nadaljnji proces obrabe.

Mehanska obremenitev in hitrost drgnjenja vplivata različno na različne materiale (nepasivni materiali, kot je baker, in pasivni materiali kot nerjavno jeklo). V večina primerov obrabljen material deluje kot anoda (**slika 1a**) in redkeje kot katoda (**slika 1b**). To lahko spremljamo z ocenjevanjem procesa depasivacije.

Glavno zanimanje v tribokorozijskih študijah je ravno izbira pravih korozijskih razmer, saj drgnjenje ustvarja nestacionarne elektrokemijske razmere v kontaktnem področju. Omejitve pri določanju katodnih in anodnih mest (**slika 1**) lahko zaobidemo s tehnikami in kombinacijo metod. Elektrokemijske tehnike v splošnem zahtevajo stacionarne razmere med potekom meritve. Dinamične in tranzientne razmere v kontaktnem področju vplivajo na dobljene rezultate. Iskanje metodologij za karakterizacijo

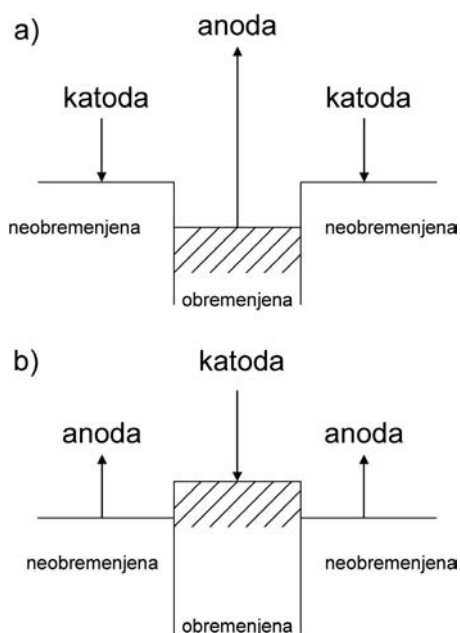
osnovnih tribokorozijskih procesov oziroma študij medsebojnega vplivanja mehanskih in elektrokemijskih procesov so veliki izzivi za raziskovalce z različnih področij. Poseben izziv je nadgradnja tranzientnih elektrokemijskih tehnik (elektrokemijski šum z akustično emisijo, metoda merjenja delnih tokov z mikroelektrodami), ki so bile v preteklosti razvite pri študiju drugih lokalnih oblik korozije (napetostno-korozijsko pokanje, korozija v špranji, korozija jekla v betonu) [1–3].

Tribokorozijske raziskave zaobjemajo tista področja, kjer lahko v agresivnih okoljih pride do korozijskih procesov, hkrati pa so vsi mehanski stiki tudi obrabno obremenjeni. To so materiali, katerih trajnost je problematična: pogonski agregati in materiali v procesni industriji (orodna jekla, siva litina) ter v biomedicini (nerjavna jekla, titanove zlitine in različni steliti). V splošnem je treba poznati osnovne parametre in njihov vpliv na tribokorozijske procese problematičnih kovinskih materialov pri tipičnih razmerah v okolju (mehanska obremenitev, elektrolit). Treba je izdelati in preučiti primerne tehnike, ki se bodo lahko v prihodnje uporabljale kot orodje za napoved tribokorozijskih lastnosti določenih materialov pri realnih problemih: npr. uporaba biogoriv, lubrikantov, evalvacija učinkovitosti inhibitorjev, trajnost različnih vrst vsadkov.

3 STANJE TEHNIKE

Tribološka obraba, ki poteče v prevodnem elektrolitu ob kontroliranih elektrokemijskih razmerah, je definirana kot triboelektrokemijski eksperiment. Definicija tribokorozijske je bila prvič prikazana in omenjena v klasični tribološki knjigi med rezultati, ki jih je predstavil Barker [4]. Prvi standard, ki upošteva tako obrabo kot korozijo, je ASTM G119 – Standardna navodila za določanje sinergije med obrabo in korozijo, ki je izšel leta 1995 in bil kasneje dopolnjen [5].

Mehanizem obrabe, sinergistični učinek med obrabo in korozijo na tribokorozijske procese ter na drugi strani fenomen tretjega telesa priteguje v zadnjem času precej zanimanja [6–9]. Tako je Stack s sodelavci [6, 7] izdelala različne režime za prepoznavanje prevladujočega mehanizma med tribokorozijskim procesom. Za boljše razumevanje sinergističnega delovanja je določila koeficient K_c/K_w ter opredelila različne načine obrabe in korozije. Koeficient K_c/K_w , pri čemer je K_c obraba zaradi korozije in K_w tribološka obraba, se rabi kot merilo za ocenjevanje medsebojne odvisnosti korozije in obrabe [6, 7]. Če je koeficient K_c/K_w manjši od 0,01, je prevladujoč mehanizem obraba, če pa je večji od $K_c/K_w \geq 10$, proces usmerja korozija. Med potekom drgnjenja prihaja do akumu-



Slika 1: Grafični prikaz dveh različnih razmer pri drgnjenju, ko obremenjeni material deluje kot: (a) anoda ali kot (b) katoda

liranja delcev, ki se sproščajo zaradi obrabe teles med kontaktom. Obrabljata se lahko en ali oba materiala v stiku. Landolt je s sodelavci poskušal opisati vplive delcev, nastalih zaradi obrabe (angl. *third body*), katerih vpliv je preiskoval z elektrokemijskimi eksperimenti [9, 10]. Opazili so, da imajo delci, nastali zaradi obrabe, velik vpliv na tribokorozijske procese.

Različne tribološke obrabe, od ponavljajočih gibanj, enosmernih premikov, drgnjenja ter vrtajočega trenja (angl. *spinning*) so študirali z različnimi triboelektrokemijskimi tehnikami. Odvisno od načina obrabe in kontaktne geometrije je lahko pričakovati različne odzive oz. načine vedenja. *In-situ* analize tribološke obrabe na področju dentalne protetike so pokazale, da je obremenitev v kombinaciji s premiki majhne frekvence zelo zahteven proces [11]. Študije so zelo raznolike, s tribološkega stališča so preiskovali sistem jezik/nebo [12]. Zelo kompleksen način kombinacije obrabe in korozijskega procesa lahko povzroča tvorbo obrabnih delcev in raztopljenih kovin, kar lahko povzroči krajšo trajnostno dobo kolčne proteze [13].

Med materiali za temeljne študije je najbolj pogosto izbran material nerjavno jeklo (tip 304L in 316L skupaj s sestavnimi kovinami, Cr, Ni) [14–16], biokompatibilni materiali, kot so kobaltove zlitine (Stelliti) [17, 18] in titanove zlitine, med katerimi prevladuje TiAlV [13, 19–21]. V zadnjem času se je povečalo zanimanje po tribokorozijskem vedenju tankih prevlek [22–24]. Bayon s sodel. [22] je preučeval PVD-prevleke v prestavnih sistemih. Prav tako je veliko objav s področja obrabe [23], upoštevajoč korozijo, ki pa ni povezana z njeno elektrokemijsko naravo. Med procesom obrabe in trenja so kemijske in strukturne spremembe, ki se dogajajo na DLC-prevlekah med obrabo v prisotnosti mineralnih olj študirali z ramansko in rentgensko spektroskopijo [23]. Druga študija obravnava vplive trdote, debeline in strukture tankih plasti TiC_xO_y na tribokorozijsko vedenje [24]. Ocenjena sta tako posamezni kot medsebojni vpliv obrabe in korozije.

Prav tako, kot so študije razdeljene po različnih obravnavanih materialih, lahko razdelimo tribokorozijske študije glede na njihovo uporabo; nekatere so temeljne študije, druge so študije tribokorozijske v biomedicinske namene kot tudi študije trdih tankih in proti obrabi odpornih prevlek.

Nekatere tehnike in metode so pogosto uporabljene, medtem ko so druge poredko. Med zadnjimi objavami Mischlerja [25] se lahko spoznamo s kritično obravnavo glavnih elektrokemijskih tehnik ter metod za razumevanje tribokorozijskih procesov s posebnim poudarkom na procese drsenja in trenja pri študiju pasivnih kovin.

V skladu s prej omenjeno pregledno študijo [25] lahko tehnike razdelimo na tehnike spremljanja korozijskega potenciala, galvanske celice ter potenciodinamske tehnike.

Na podlagi potenciostatskih tehnik so nekateri avtorji razvili modele za napoved elektrokemijskega odziva pasivnih kovin na tribokorozijski proces. Landolt s sodel. [26] je razvil model za pasivne kovine, ki se obrabljajo, in opisal tok, ki se spreminja med drgnjenjem kot funkcija hitrosti depasivacije in repasivacije. Hitrost depasivacije je odvisna od obremenitve, hitrosti, trdote kovine, površinske topografije in kontaktne geometrije [26]. Tudi Olsson in Stemp [27] sta izdelala model za napoved repasivacijske kinetike med drgnjenjem.

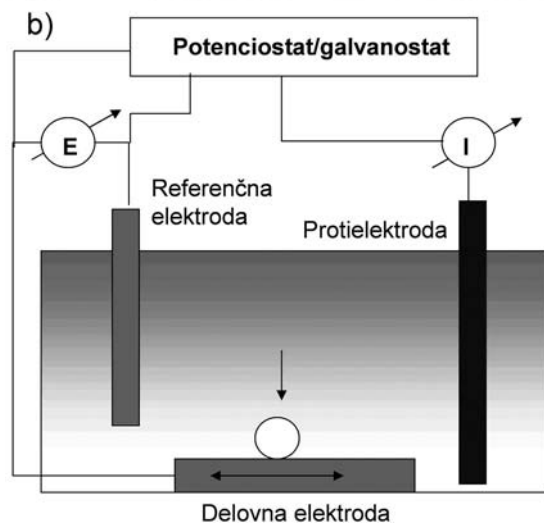
Pontiaux [15] poudarja, da je glavni problem pri tribokorozijskih procesih ta, da pri dvosmernem sistemu obrabe, obrabna konica ustvarja nestalne (angl. *non-steady*) elektrokemijske razmere v območju kontakta. Jemmely s sodel. [10] je ugotovil, da se je vrednost toka med časom, ko material ni bil v procesu obrabe, zmanjševal zaradi repasivacije in se ponovno povečal, ko je obrabna konica potovala nazaj v primeru uporabe ponavljajočega dvosmernega tribometra. Mnoge elektrokemijske tehnike pa zahtevajo stacionarne razmere med samo meritvijo. Dinamične in tranzientne razmere v območju kontakta tako lahko drastično vplivajo na dobljene rezultate [15].

Le nekaj je objav, te so zelo redke, ki kot mogočo tehniko za preučevanje tribokorozijske uporabljajo elektrokemijski šum in elektrokemijsko impedančno spektroskopijo [15, 16]. Elektrokemijsko impedančno spektroskopijo so uporabljali le kot dodatno tehniko pred procesom obrabe in po njej [24]. Monticelli s sodel. [20] pa je ugotovil, da je splošna stabilnost zlitine TiAlV v korozijskih razmerah dovolj stabilna, da so lahko izmerili impedančne spektre. Impedanca depasiviranega področja namreč prevlada nad celotno impedanco elektrode. Tudi merjenje z mrežo galvansko povezanih elektrod še ni bilo uporabljeno v triboelektrokemijskih študijah. Metoda merjenja delnih tokov z mikroelektrodami smo razvili pri študiju drugih lokalnih oblik korozije, kjer razlike med anodnimi in katodnimi mesti vplivajo na potek korozije [3]. Kot je poudaril Celis s sodel. [28], obremenjeno področje materiala, ki je izpostavljen drgnjenju, lahko deluje kot anoda ali kot katoda. Tako je uporaba mreže galvansko povezanih elektrod z uporabo elektrokemijskega šuma in akustične emisije velik izziv v znanju na področju tribokorozijske.

Poudariti je treba, da obstaja velika potreba po temeljnih raziskavah in kritičnem ovrednotenju posameznih elektrokemijskih tehnik, ki se uporabljajo za tribokorozijske preiskave. Če povzamemo, večina temeljnih študij uporablja potenciostatsko tehniko v

80 % izbranih literaturnih virih. Druga najbolj uporabljena tehnika je bila merjenje korozijskega potenciala v 50 % primerih. V 10 % preiskane literature so uporabili potenciodinamsko tehniko kot orodje za spremljanje elektrokemijskih procesov, ta pa je problematična za uspešno interpretacijo rezultatov zaradi nestacionarnih razmer, ki jih ta tehnika zahteva. Prav tako je nekajkrat uporabljena tehnika galvanškega člana.

Večina raziskav uporablja eno ali dve tehniki med opisanimi najpogosteje uporabljenimi tehnikami za spremljanje tribokorozijskih eksperimentov. Kot je bilo že poudarjeno, le nekaj raziskav uporablja elektrokemijski šum in impedančno elektrokemijsko spektroskopijo pri študiju tribokorozijskih lastnosti, pri čemer mreža elektrod in akustična emisija kot dodatna tehnika k elektrokemijskemu šumu, še ni bila uporabljena. Tako lahko ugotovimo, da je na področju nadaljnjih in temeljnih študij mogočih tehnik za študij tribokorozijskih procesov še veliko odprtih problemov in izzivov.



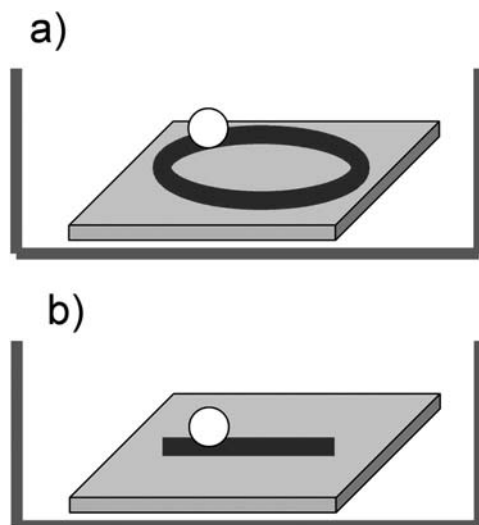
Slika 2: Slika linearnega recipročnega tribometra z elektro-kemijsko celico (a) ter shema tipičnega tribokorozijskega preskuševališča (b)

4 TRIBOKOROZIJSKO PREIZKUŠEVALIŠČE

Tribokorozijsko preskuševališče je sestavljeno iz tribometra ter posebej za korozijske meritve predelano korozijsko celico. Prav slednja je velik problem za dejansko realizacijo tribokorozijskih preiskav. Na trgu so dostopni različni tribometri (CSM instruments, Phoenix instruments) za raznovrstne tribološke študije trenja in obrabe materialov z lubrikanti ali brez njih. Obstajajo tudi bolj specializirane različice za testiranje pri nižjih ali višjih temperaturah ali v vakuumu. Aparat za tribokorozijske meritve mora biti ustrezno predelan ali pa posebej izdelan.

Priljubljen tribometer za elektrokemijske preiskave mora imeti nekatere njemu podobne karakteristike, ki imajo prednost pred komercialnimi aparati. Te so: obremenitev na vzorec z natančno določeno silo, kontrolo parametrov, kot so hitrost drgnjenja, frekvenca in čas ter razpon sile nekaj newtonov do nekaj milinewtonov, ter materiali v stiku s korozijsko raztopino. Materiali morajo biti električno neprevodni: nosilec za obrabno telo, ohišje korozijske celice, nosilci za pritrditev vzorca. Najpomembnejša značilnost je elektrokemijska celica za spremljanje tribokorozijskih procesov, kjer so kontakti za delovno elektrodo (preiskovan material), referenčno elektrodo (po navadi nameščena na posebnem nosilcu) ter protielektrodo poseben tehničen izziv.

Na **sliki 2** je prikazan linearni recipročni tribometer z elektro-kemijsko celico ter shema tipičnega tribokorozijskega preskuševališča. Na **sliki 3** pa sta predstavljena najpogostejša načina tribokorozijskega eksperimenta, glede na uporabljeno vrsto tribometra: pin on disk (a) ali pa dvosmerni linearni tribometer (b).

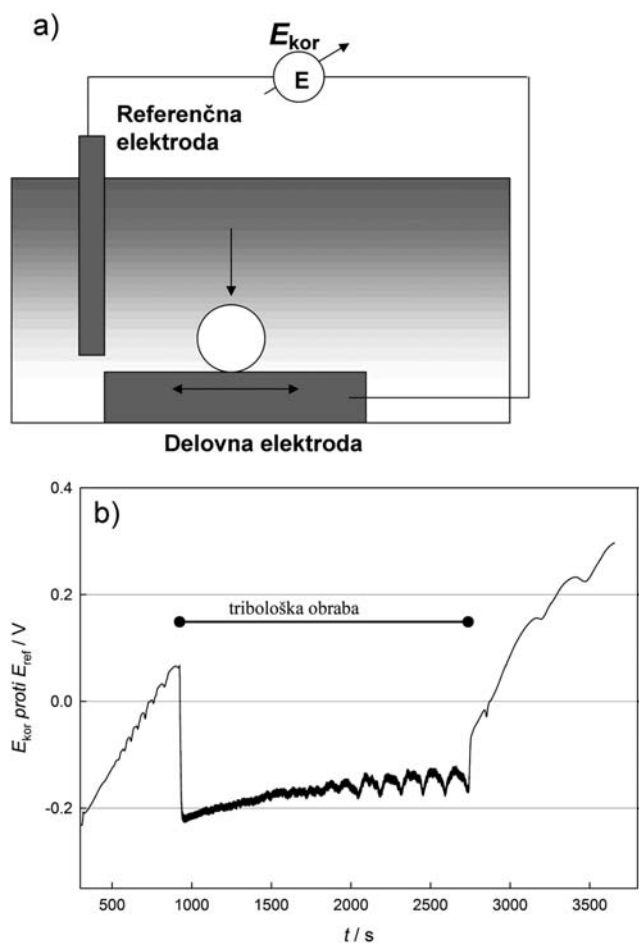


Slika 3: Prikaz različnih obrab in načinov gibanja na tribokorozijskih sistemih: (a) pin on disk tribokorozijska obraba in (b) linearna dvosmerna (angl. reciprocating) obraba

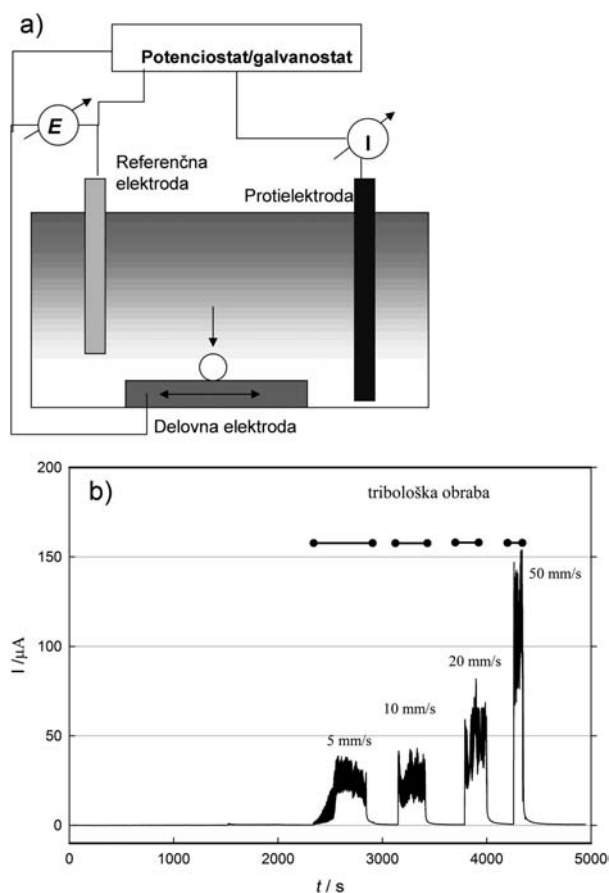
5 ELEKTROKEMIJSKE METODE ZA TRIBOKOROZIJSKO PREIZKUŠANJE

Pri tribokorozijskih eksperimentih se med procesom obrabe posamezno uporabljajo naslednje elektrokemijske tehnike: merjenje korozijskega potenciala, galvanске celice, potenciostatske ter potenciodinamske meritve. Največkrat uporabljeni tehniki sta potenciostatska in tehnika s spremljanjem korozijskega potenciala.

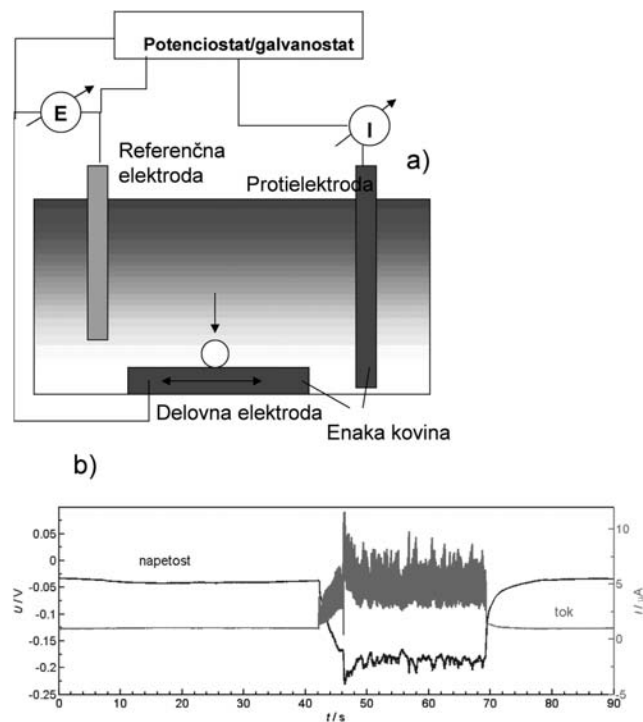
Merjenje korozijskega potenciala med tribokorozijsko obrabo je zelo preprosta tehnika. Z njo pridobimo informacijo o stanju površine med drgnjenjem. Korozijski potencial E_{kor} merimo med delovno in referenčno elektrodo (slika 4). Ko se med obrabo odkriva kovina (obrabljena površina), je neto potencial elektrode spremenjen. Med tribološko obrabo potencial pade na nižje vrednosti, temu pravimo katodna sprememba (angl. *cathodic shift*). Po končani tribološki obrabi se potencial zopet pomakne na višje začetne vrednosti. Na obrabljeni površini se v odvisnosti od narave kovinskega materiala različno hitro lahko tvori pasivna plast.



Slika 4: Primer elektrokemijskega spremljanja korozijskega potenciala: (a) shema eksperimenta, (b) primer tribokorozijskega preizkušanja nerjavnega jekla 316L v 0,5 M H₂SO₄



Slika 5: Primer potenciostatskega tribokorozijskega testa: (a) shema eksperimenta, (b) primer tribokorozijskega preizkušanja nerjavnega jekla 316L v 0,5 M H₂SO₄ pri različnih hitrostih obrabe



Slika 6: Primer tribokorozijskega preizkušanja z galvanjsko celico oz. elektrokemijskim šumom: (a) shema eksperimenta, (b) primer tribokorozijskega preizkušanja nerjavnega jekla 316L v 0,5 M H₂SO₄

Slabost te tehnike je, da pri njeni uporabi ne dobimo nikakršnih podatkov o kinetiki reakcij, ki nastopajo med drgnjenjem oz. obrabo.

Potenciostatski tribokorozijski test je tisti, pri katerim delovno elektrodo držimo na izbranem potencialu v trielektrodni elektrokemijski celici. Elektrode so povezane s potencistatom, ki vzdržuje potencial med delovno in referenčno elektrodo. Pri stalni napetosti merimo tok v odvisnosti od časa in s tem spremljamo kinetiko reakcij, ki potekajo na elektrodi (**slika 5**).

Tok med elektrodama I_{cell} merimo z nizkoohmskim predojačevalnikom (angl. *zero-resistance ammeter*, ZRA), priključenim na preiskovan kovinski material (delovna elektroda), pri čemer je protielektroda iz istega materiala kot delovna elektroda s podobno izpostavljeno površino (**slika 6**). Tem delu eksperimenta rečemo merjenje galvanске celice.

Glavna prednost opisane metode elektrokemijskega šuma pred drugimi klasičnimi elektrokemijskimi metodami je dejstvo, da meritev elektrokemijskega šuma poteka v prostokorodirajočih sistemih brez od zunaj vzbujenih signalov. To nam omogoča, da z metodo elektrokemijskega šuma zaznavamo naravni (nemoten) razvoj korozijskih procesov in tako na podlagi hitrih sprememb (tranzientov) v merjenem toku in napetosti detektiramo iniciacijo in razvoj korozijskih procesov.

Korozijski dogodki na posamezni elektrodi se izražajo v izmerjenem toku in napetosti. Če so vse tri elektrode enake, med delovno in referenčnima elektrodama ni toka in napetosti. Kadar pa se lokalna korozijska poškodba anodnega značaja (poškodba pasivne plasti, nastanek nove korozijske jamice, pojavi na delovni elektrodi), se to pozna tako na tokovni kot tudi na napetostni krivulji kot premik (zasuk) signala v t. i. anodno smer. Pri tem nastali elektroni potujejo iz delovne na referenčni elektrodi. Če se lokalna korozijska poškodba anodnega značaja pojavi na tokovni elektrodi, se to izraža kot premik toka v nasprotno smer – katodna smer (elektroni potujejo iz tokovne elektrode) in premik napetosti gre v anodno smer. Pri nastanku anodne poškodbe na napetostni elektrodi se to opazi kot premik napetosti v katodno smer. Torej je sočasen tokovni in napetostni odziv v anodni smeri pogoj za detekcijo korozijskega dogodka na delovni elektrodi.

Če je merilni sistem sestavljen iz ohmskega predojačevalnika in visokoimpedančnega predojačevalnika, lahko omogočimo hkratno spremljanje tudi potenciala, ki ga merimo med referenčno in delovno elektrodo. Ob uporabi A/D pretvornika 18-bit lahko dosežemo ločljivost za tok nekaj nanoamperov, za meritve napetosti pa mikrovoltov. Tovrstnemu eksperi-

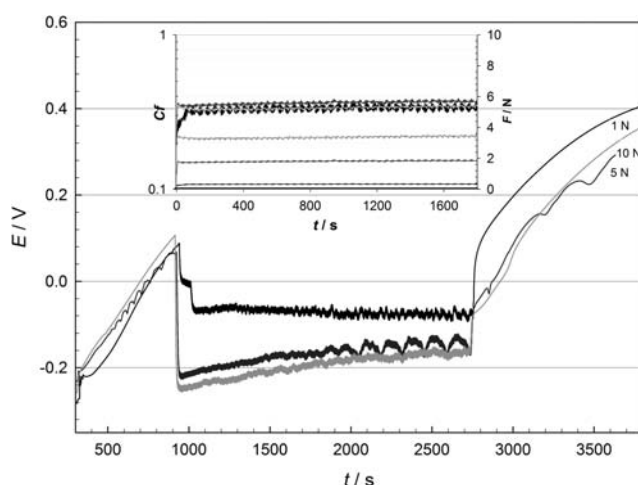
mentu, ki je za tribokorozijsko preizkušanje zelo redko, pravimo meritve elektrokemijskega šuma.

Pri **potenciodynamskih meritvah** različno hitro spreminjamo potencial. S to metodo lahko opazujemo vpliv trenja na različne reakcije, ki potekajo med drgnjenjem. Ta vpliv se lahko opazi le, če je razmerje med obrabljeno in neobrabljeno površino dovolj veliko.

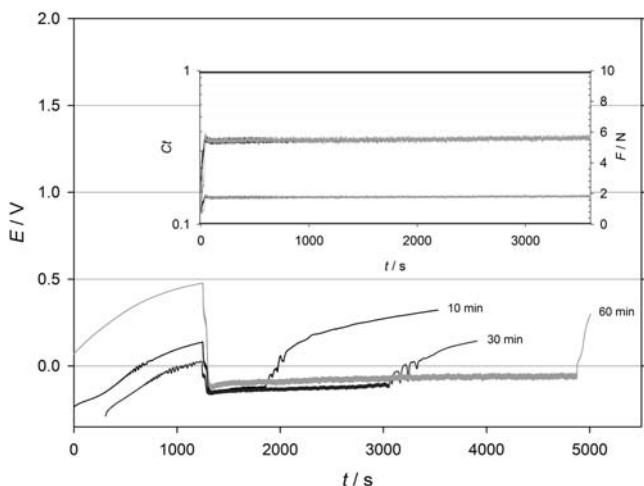
6 PRIMERI TRIBOKOROZIJSKEGA PREIZKUŠANJA

Tribokorozijske lastnosti izbranega materiala v korozivni raztopini preizkušamo s klasičnim tribološkim spremljanjem obrabe, povezanim s hkratnim elektrokemijskim eksperimentom. Povezovanje mehanskih in elektrokemijskih metod omogoča hkratno spremljanje koeficientov in sile trenja pri definiranih korozijskih razmerah. Na **slikah 7–9** so prikazani tribokorozijski eksperimenti na ploščici iz nerjavnega jekla 316L v raztopini 0,5 M H_2SO_4 . Predstavljeni eksperimenti so narejeni pri potencialu odprtega kroga (angl. *open circuit potential*) brez zunanje vsiljene napetosti.

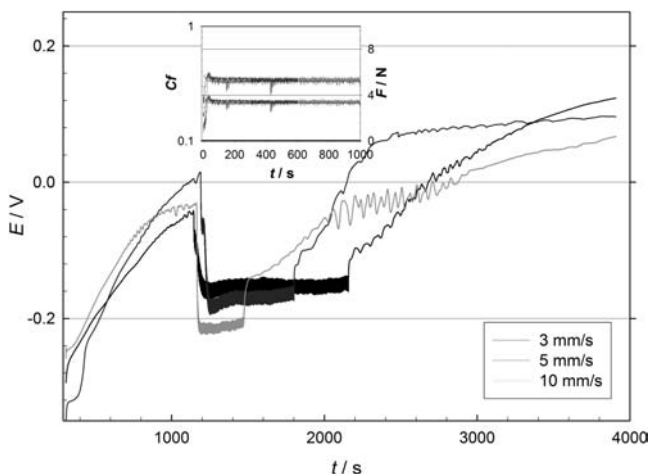
Na **sliki 7** lahko spremljamo odvisnost uporabljene sile pri drgnjenju. Čim večja je sila, tem večja je sprememba v zmanjšanju korozijskega potenciala elektrode iz nerjavnega jekla tipa 316L. Ugotovimo lahko, da so potenciali pri silah 5 N in 10 N podobni, iz česar lahko sklepamo, da sila 1 N ni zadosti velika, da bi povsem odstanila pasivno plast na obrabni poti. Zato je korozijski potencial pri sili 1 N nekoliko bolj pozitiven med časom obrabe. Po končani obrabi se potencial povrne na začetno vrednost v različnih časih, to je čas, ki ga kovina potrebuje, da se ponovno pasivira.



Slika 7: Spremljanje korozijskega potenciala nerjavnega jekla 316L pri različnih silah obremenitve med tribološko obrabo



Slika 8: Spremljanje korozijskega potenciala nerjavnega jekla 316L pri različnih poteh med tribološko obrabo



Slika 9: Spremljanje korozijskega potenciala nerjavnega jekla 316L pri različnih hitrostih tribološke obrabe

Na **sliki 8** lahko spremljamo vpliv časa obrabe v raztopini 0,5 M H_2SO_4 pri konstantni sili obremenitve. Korozijski potencial elektrode se ob začetku tribološke obrabe zmanjša in ostaja konstantne vrednosti pri vseh, neodvisno od časa obrabe. Po koncu obrabe se potencial začne povečevati. Čas repasivacije je odvisen od več dejavnikov in je različen za tri različna preskušanja.

Nas **sliki 9** je predstavljena odvisnost korozijskega potenciala od hitrosti obrabe pri konstantni sili in poti obrabe za sistem nerjavno jeklo 316L v 0,5 M raztopini H_2SO_4 . Čim večja je hitrost, tem večja je sprememba v zmanjšanju korozijskega potenciala. Prav tako hitrost obrabe vpliva na repasivacijo elektrode. Opazimo lahko, da se po koncu obrabe potencial začne pomikati k bolj pozitivnim vrednostim. Ta čas je najdaljši pri največji hitrosti obrabe. Predvidimo lahko, da je opažena lastnost posledica dejstva, da so se korozijske razmere tik ob elektrodi bistveno

spremenile, saj je hitro drgnjenje povzročilo večje spremembe v električni dvoplasti in v celotnem okoliškem korozijskem sistemu. Do vzpostavitve ravnovesnega stanja in repasivacije je potrebno več časa, kar lahko opazimo s počasnim večanjem korozijskega potenciala.

7 SKLEP

Kovine so v agresivnem okolju izpostavljene korozijskemu propadanju. V mnogih primerih lahko korozijsko stanje kovinskega materiala poslabša hkratna obraba, kar povzroča še izrazitejše propadanje kovinskih površin. Področje uporabe kovin je zelo široko, zato je poznanje tribokorozijskih procesov in njihove kontrole velikega pomena.

Ker je propadanje kovine elektrokemijski proces, lahko njegove lastnosti spremljamo z uporabo različnih elektrokemijskih tehnik. Za spremljanje tribokorozijskih lastnosti pa potrebujemo posebno preizkuševališče, ki je sestavljeno iz tribometra ter posebej predelane korozijske celice, ki vsebuje tako delovno, referenčno ter števno elektrodo.

Korozijo kovinskega materiala med obrabo lahko spremljamo na več različnih načinov.

V prispevku so predstavljeni različni primeri tribokorozijskega preizkušanja nerjavnega jekla 316L v 0,5 M raztopini žveplove(VI) kisline pri potencialu odprtega kroga v odvisnosti od velikosti sile obrabe, časa oziroma poti obrabe ter hitrosti obrabe.

8 Literatura

- [1] A. Legat, M. Bajt Leban, Ž. Bajt, *Electrochim. acta.*, 49 (2004), 2741–2751
- [2] M. Bajt Leban, Ž. Bajt, A. Legat, *Electrochim. acta.*, 49 (2004), 2795–2801
- [3] A. Legat, *Electrochim. Acta*, 52 (2007), 7590–7598
- [4] F. P. Bowden, D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford, 1986
- [5] ASTM G119 – 04 Standard Guide for Determining Synergism between Wear and Corrosion
- [6] M. M. Stack, N. Pungwiwat, *Wear*, 256 (2004), 565–576
- [7] M. Stack, N. Pungwiwat, *Tribol. Int.*, 35 (2002), 681–689
- [8] M. M. Stack, S. Zhou, R. C. Newman, *Mater. Sci. Technol.*, 12 (1996), 261–268
- [9] D. Landolt, S. Mischler, M. Stemp, S. Barril, *Wear*, 256 (2004), 517–524
- [10] P. Jemmely, S. Mischler, D. Landolt, *Tribol. Int.*, 32 (1999), 295–303
- [11] C. Rapiejko, S. Fouvry, B. Grosgeat, B. Wendler, *Wear*, 266 (2009), 850–858
- [12] H. Ranc, C. Cervais, P.-F. Chauvy, S. Debaud, S. Mischler, *Trib. Int.*, 39 (2006), 1518–1526
- [13] S. Horimoto, S. Mischler, *Wear*, 261 (2006), 1002–1011
- [14] P. Pontiaux, F. Wenger, J. Galland, G. Lederer, M. Calati, *Materiaux et Techniques*, (1997), 43–46
- [15] P. Pontiaux, F. Wenger, D. Drees, J. P. Celis, *Wear*, 256 (2004), 459–468
- [16] P.-Q. Wu, J.-P. Celis, *Wear*, 256 (2004), 480–490
- [17] Y. Yan, A. Neville, D. Dowson, *J. Phys. D., Appl. Phys.*, 39 (2006), 3200–3205
- [18] F. Contu, B. Elsener, H. Bohni, *Corros. Sci.*, 47 (2005), 1863–1875

- [19] S. Barril, N. Debaud, S. Mischler, D. Landolt, *Wear*, 252 (2002), 744–754
- [20] C. Monticelli, F. Zucchi, A. Tampieri, *Wear*, 266 (2009), 327–336
- [21] A. C. Vieira, A. R. Ribeiro, L. A. Rocha, J. P. Celis, *Wear*, 261 (2006), 994–1001
- [22] E. Bayon, A. Igartua, X. Fernandez, R. Martinez, R. J. Rodrigues, J. A. Garcia, A. De Frutos, M. A. Arenas, J. de Damborenea, *Tribol. Int.*, 42 (2009), 591–599
- [23] M. Kalin, E. Roman, J. Vižintin, *Thin Solid Films*, 515 (2007), 3644–3652
- [24] M. T. Mathew, E. Ariza, L. A. Rocha, A. C. Fernandes, F. Vaz, *Tribol. Inter.*, 41 (2008), 603–615
- [25] S. Mischler, *Tribol. Inter.*, 41 (2008), 573–583
- [26] D. Landolt, S. Mischler, M. Stemp, *Electrochim. Acta*, 46 (2001), 3913–3929
- [27] C.-O. A. Olsson, M. Stemp, *Electrochim. Acta*, 49 (2004), 2145–2154
- [28] J.-P. Celis, P. Ponthiaux, F. Wenger, *Wear*, 261 (2006), 939–946