

The background of the entire image is a close-up photograph of a heavily corroded metal surface. It features a complex, mottled pattern of orange, red, and brown rust, with some areas showing a lighter, greyish-blue patina where the metal has been exposed or where different corrosion products have formed. The texture is rough and uneven, typical of aged or weathered metal.

Korozijski atlas

Korozijske in mehanske
poškodbe kovinskih materialov
v vsakdanjem življenju

Tanja Antić
Mirjam Bajt Leban
Tadeja Kosec

Korozijski atlas

**Korozijske in mehanske
poškodbe kovinskih materialov
v vsakdanjem življenju**

Zavod za gradbeništvo Slovenije
Ljubljana 2025

KOROZIJSKI ATLAS

Korozijske in mehanske poškodbe kovinskih materialov v vsakdanjem življenju

Avtorice besedila: Tanja Antić, dr. Mirjam Bajt Leban, dr. Tadeja Kosec

Fotografije: arhiv ZAG-a

Izdal in založil: Zavod za gradbeništvo Slovenije

Ljubljana, avgust 2025

Oblikovanje in prelom: Birografika BORI, d. o. o.

1. elektronska izdaja

Način dostopa (URL): www.zag.si/dl/korozijski-atlas.pdf

Izšlo tudi kot tiskana publikacija.

Publikacija ni namenjena prodaji.

© 2025 Zavod za gradbeništvo Slovenije

Za delo velja licenca [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili
v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 247050755

ISBN 978-961-7125-21-4 (PDF)

Zahvala

Z a h v a l j u j e m o s e

študentu FKKT Vitanu Šlambergerju,
študentu NTF Nalu Trobcu,
sodelavkam dr. Petri Močnik in dr. Mariji Đurić za analize kave,
dr. Aljošu Šajni za primer korozije pipe,
dr. Andrijani Sever Škapin za odslužen grelnik vode,
sodelavcem iz IT oddelka za primer iztrošene baterije prenosnika,
in vsem sodelavcem Laboratorija za kovine, korozijo in protikorozijsko zaščito,
ki so sodelovali pri ustvarjanju vsebin tega atlasa.
Posebna zahvala Mojci Mušič za fotografske izdelke.

Posebej se zahvaljujemo dolgoletnemu sodelavcu Viljemu Kuharju
za strokovni pregled in predlagane dopolnitve ter pohvale za izdelek.



*Korozijski atlas najdete
tudi na tej povezavi*

Uvodna beseda

Vsakdanji predmeti, ki nas obkrožajo – od kuhinjske pipe do sobnega kolesa, od termoske do menjalnika na kolesu – so izdelani iz različnih kovin in njihovih zlitin, ki so običajno skrbno izbrane glede na svojo funkcionalnost, videz in trajnost. Vendar pa tudi ti materiali niso večni. Sčasoma jih načne zob časa, ki se kaže v obliki **korozije, mehanskih poškodb, utrujenosti materiala** ali **posledic kemijskih reakcij**.

Ta priročnik oziroma **korozijski atlas** prikazuje konkretne primere poškodb, do katerih lahko pride v naših domovih, pogosto povsem neopazno – dokler predmet ne odpove. Zbrali smo nabor vsakdanjih situacij, kjer materiali odpovejo zaradi različnih razlogov: **korozija v vlažnem okolju, napake v konstrukciji, staranje materialov, mehanska preobremenitev ali kombinacija vseh naštetih dejavnikov**.

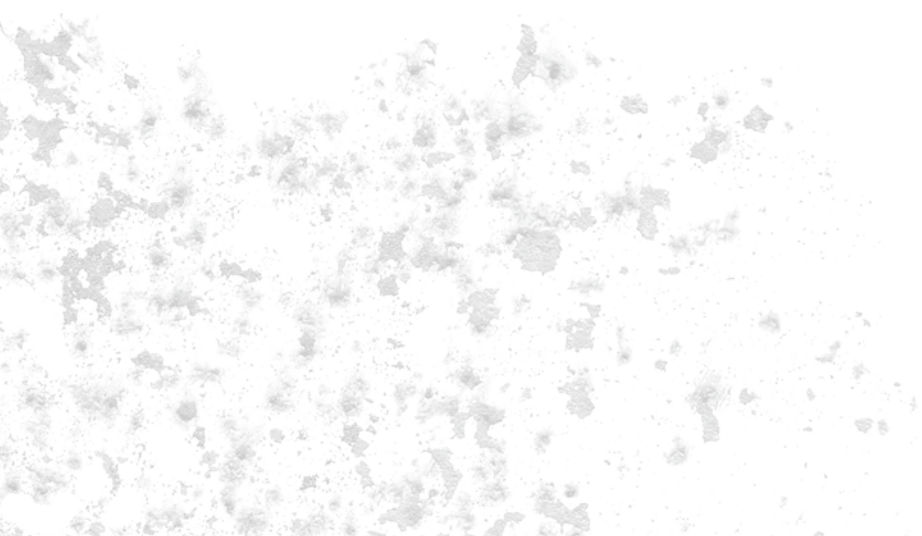
V nadaljevanju boste našli vizualno podprte primere poškodb, ki so razvrščeni glede na vrsto napake in materiala. Vsak primer je opremljen s kratkim opisom mehanizma okvare ter razlago, zakaj je do nje prišlo. Na ta način atlas ne ponuja le vpogleda v svet korozije in poškodb materialov, temveč tudi prispeva k **boljšemu razumevanju zgradbe, lastnosti in omejitev materialov**, ki jih uporabljamo v vsakdanjem življenju.

Zavedanje o teh procesih ni pomembno le za inženirje ali raziskovalce materialov, temveč tudi za vsakogar, ki želi bolje razumeti svet okoli sebe – in morda tudi **preprečiti ali odložiti okvare, ki so pogosto posledica nevidnih, a neizogibnih procesov**.

dr. Tadeja Kosec, univ. dipl. kem.

Kazalo

1.	Pocinkana vodovodna cev – korozija, <i>Skrita rja v ceveh: kako voda načne notranjost cevi</i>	7
2.	Kafetjera – zlom, <i>Kavni prelom: krhka točka pod pritiskom pare</i>	13
3.	Al nosilec zadnjega menjalnika – zlom, <i>Ko aluminij popusti: zlom zaradi utrujenosti v gibanju</i>	19
4.	Ščipalnik za nohte – zlom, <i>Jekleni zlom: mehanske meje manjših orodij</i>	23
5.	Pločevinka Coca-Cola – korozija, <i>Kislina proti kovini: kako pijača načne embalažo od znotraj</i>	27
6.	Krmilo sobnega kolesa – korozija, <i>Znoj in zlitina: zakaj kovinsko krmilo korodira</i>	31
7.	Termovka – korozija, <i>Toplota in vlaga: mikrookolje korozije na termoski</i>	37
8.	Baterija Li-ion, <i>Energija, ki razjeda: notranja degradacija litij-aluminijeve baterije</i>	41
9.	Pipa za umivalnik – korozija, <i>Sijaj, ki bledi: korozija kromiranih armatur v kopalnici</i>	47
10.	Grelnik vode – korozija, <i>Zeleni sledovi: zakaj se v grelniku tvori malahit</i>	51

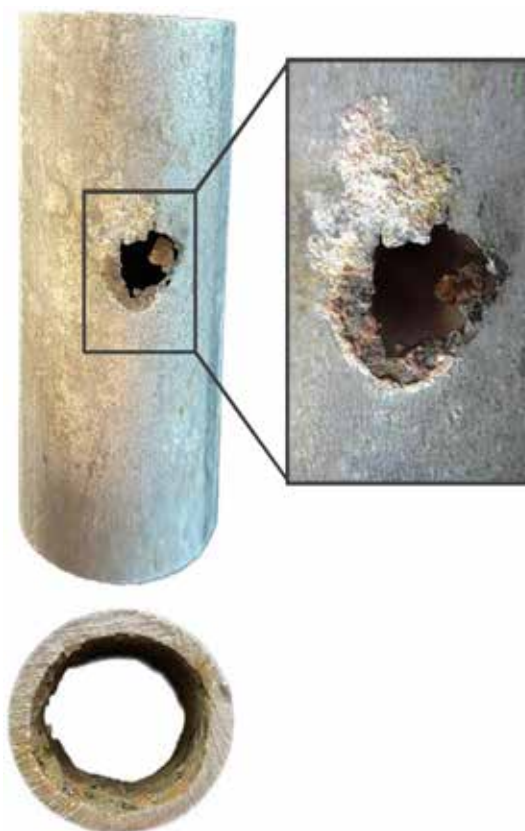


1. Pocinkana vodovodna cev

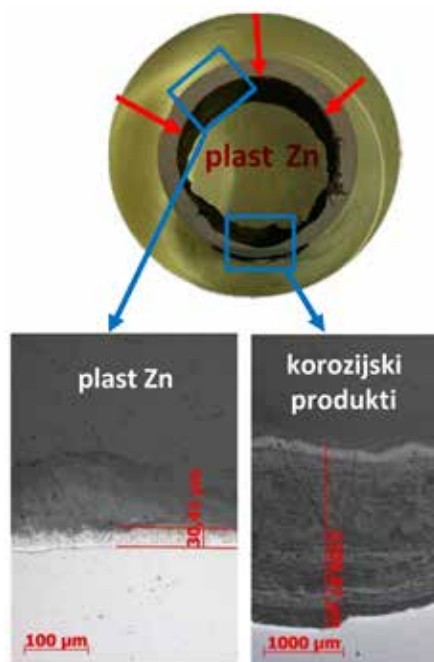
Uvod in opis problema:

Vodovodna cev za hladno sanitarno vodo je po približno 45 letih uporabe prekorodirala in povzročila puščanje vode in zamakanje v horizontalnem delu napeljave. Cev je jeklena, šivna in na notranji in zunanji strani pocinkana. Pocinkanje je izvedeno s kontinuiranim potapljanjem v vroči kopeli cinka skladno s standardom SIST EN 10240:1998 - Notranje in/ali zunanje zaščitne prevleke na jeklenih ceveh - Specifikacija prevlek pri avtomatskem vročem cinkanju. Po tem postopku je debelina cinka (Zn) na zunanji in notranji strani cevi najmanj 55 μm .

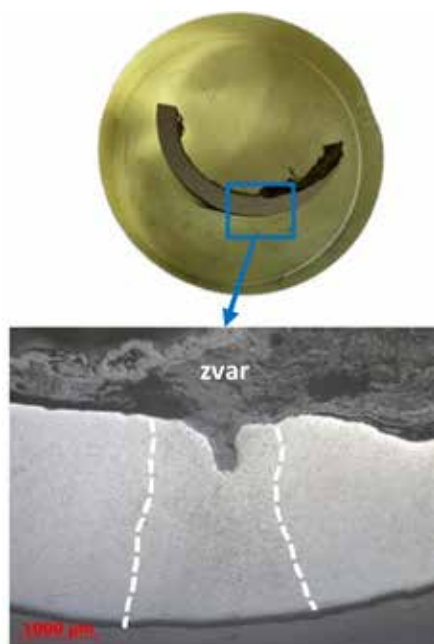
Lokacija perforacije je bila na spodnjem delu vgrajene cevi. Namen predstavljene analize je bil pojasniti vzrok perforacije.



Slika 1a: Vodovodna cev.



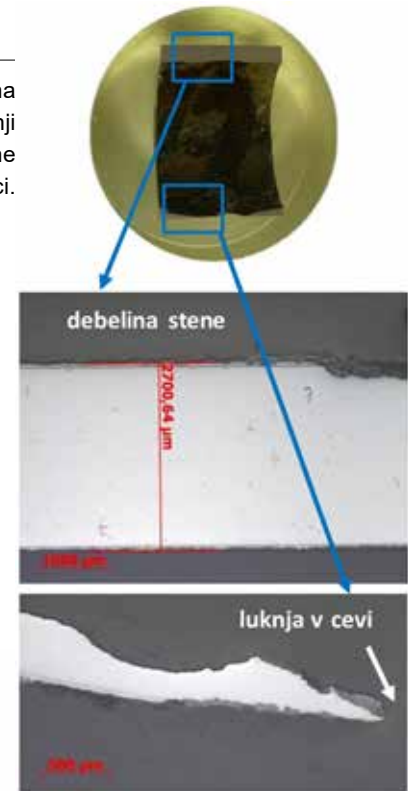
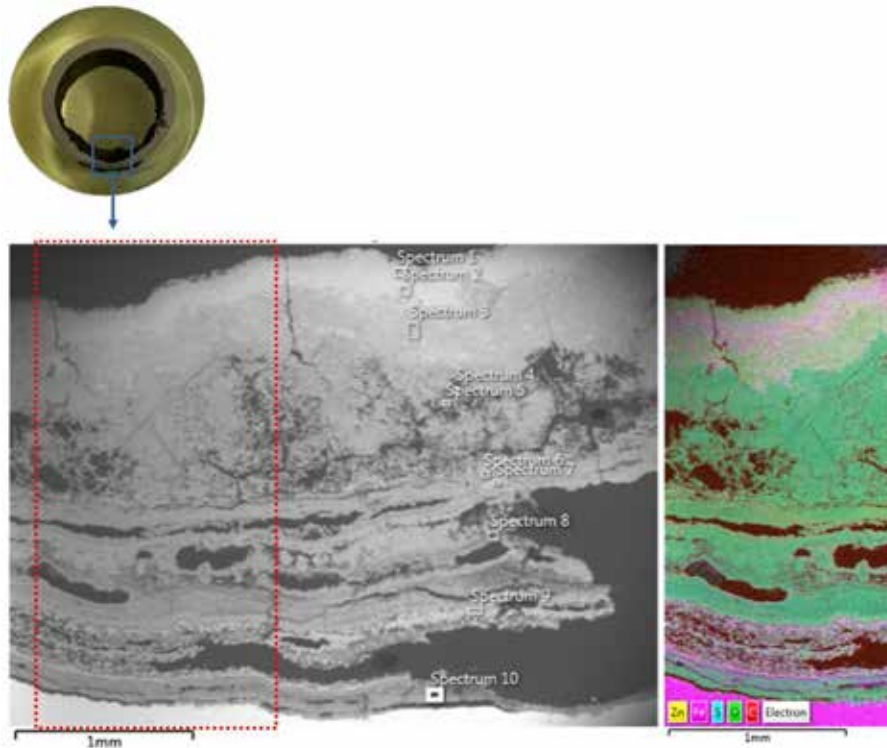
Slika 1b: Na notranji strani vodovodne cevi spodaj (zgornja slika) je stena cevi zaradi korozije močno stanjšana – prisotna je perforacija cevi. Na zgornjem delu notranje strani cevi je še prisotna plast galvanske prevleke v debelini okoli 30 μm (slika levo). Korozijski produkti na spodnji notranji strani cevi so debeline do 2,3 mm (slika desno). Debelina stene nove cevi je bila 2,7 mm.



Slika 1c: Na tej sliki je prikazan metalografski posnetek področja ob zvaru na šivni cevi (jedkalo: 3% Nital). Na področju ob zvaru je prisotna izjeda, vendar pa na tem delu cev ni korozijsko stanjšana.

Slika 1d: Presek vodovodne cevi v vzdolžni smeri: na zgornji strani je debelina stene cevi 2,7 mm, na spodnji strani je prisotna luknja v cevi ter močno stanjšanje stene cevi v okolici.

Analiza korozijskih produktov preko preseka z energijsko disperzijsko spektroskopijo (EDS – ang. Energy dispersive spectroscopy) na elektronskem vrstičnem mikroskopu (SEM – angl. scanning electron microscope) ter Ramansko spektroskopijo:

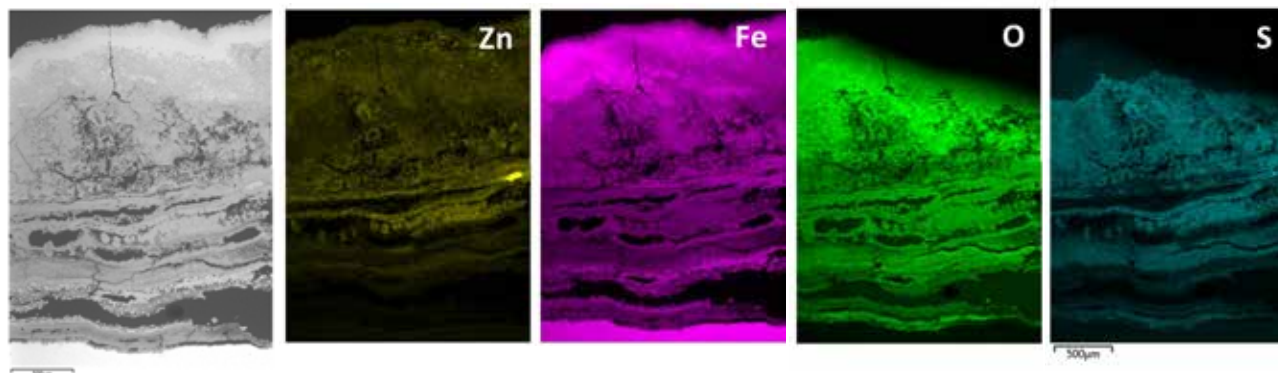


Slika 1e: Mesta točkovnih analiz po preseku korozijskih produktov / desna slika (spekter 1- spekter 10), ter desno prostorska (angl. mapping) EDS analiza preko večjega področja (označeno v rdečem okvirju na levi sliki).

Tabela 1-1: Sestava korozijskih produktov na posamezni poziciji iz slike 1e (utežni %)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
C	5,4	4,5	10,9	53,9	22,4	16,4	15,6	35,4	15,2	33,3
O	1,3	1,3	9,5	31,5	41,9	45,1	28,8	39,8	37,3	34,0
Al	4,6	3,6	2,8	0,4	0,6	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5
S	0,1	0,1	0,1	0,8	1,6	1,5	3,7	1,0	0,4	0,7
Cl	0,0	0,0	0,0	0,5	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2
Fe	77,2	84,1	66,1	11,1	28,9	28,8	7,4	20,8	45,5	30,4
Zn	11,5	6,4	10,2	1,8	4,3	7,6	34,8	2,3	0,7	
P	/	/	/	/	/	/	5,5	/	/	/
Na	/	/	/	/	/	/	3,2	/	/	/

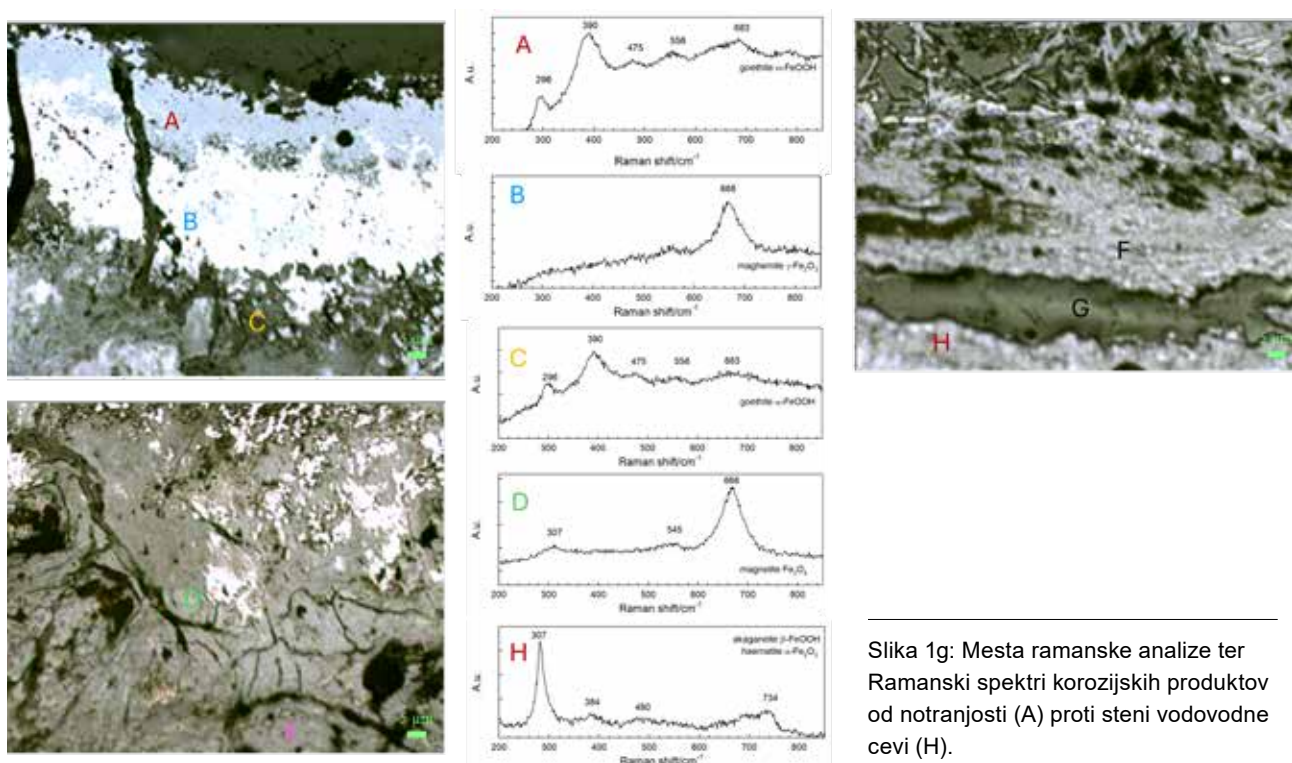
Korozijski produkti so sestavljeni iz različnih korozijskih produktov železa in cinka. V korozijskih produktih smo analizirali tudi žveplo, v eni plasti pa tudi fosfor. Prisotnost spojin fosforja in žvepla v korozijskih produktih železa je tipična ob prisotnosti biofilma, ki je skupek različnih mikroorganizmov ter organskih in anorganskih snovi iz okolice. Glede na sestavo korozijskih produktov v bližini perforacije lahko sklepamo, da so globlje korozijske poškodbe verjetno posledica mikrobiološke korozije (MIC – Microbiologically Influenced Corrosion).



Slika 1f: Posnetek SEM in EDS mikroelementna analiza preseka korozijskih produktov ob perforaciji.

Na sliki 1f je razvidna prisotnost Zn, Fe, O in žvepla po preseku korozijskih produktov na steni vodovodne cevi. Črne praznine so porozna mesta znotraj korozijskih produktov, prisotnost žvepla (S) nakazuje sledi prisotnosti biofilma.

V debeli plasti nekompaktnih korozijskih produktov jekla je veliko votlih mest, kjer so se ustvarili pogoji za gojišča mikroorganizmov, aerobnih in anaerobnih bakterij. Mikrobiološki produkti teh bakterij pospešujejo lokalizirano in splošno korozijo jekla in drugih kovin (korozivni produkti bakterij: CO_2 , H_2S , NH_3 , organske in anorganske kisline, sulfidi in disulfidi).



Slika 1g: Mesta ramanske analize ter Ramanski spektri korozijskih produktov od notranjosti (A) proti steni vodovodne cevi (H).

Ramanska analiza (Slika 1g) je bila narejena na mestu, označenem z rdečim poljem, na sliki 1e. Korozijski produkti so sestavljeni iz različnih korozijskih produktov železa (magnetita (Fe_3O_4), geotita ($\alpha\text{-FeOOH}$) in cinka ter ostalih železovih oksidov in hidroksidov.

Zaključek:

Po vgradnji na površini nove cevi prisoten cink deluje kot pasivna zaščita (žrtvena anoda) proti koroziji. S časom se sloj cinka zaradi kemijskih značilnosti vode, kot so pH, prisotnost karbonatov, kloridov ter drugih agresivnih ionov, iztroši – raztopi. Ko na površini ni več cinka, jeklo cevi prične korodirati. Nekateri korozijski produkti se spirajo z vodo, nekateri pa ostanejo na površini, včasih tudi kot zelo voluminozne okrogle tvorbe (*angl.* tubercles). Pod takimi tvorbami je običajno stena cevi močno stanjšana in sčasoma vodi do perforacij. Debelina korozijskih produktov 2,3 mm v našem primeru kaže na dolgotrajno notranjo korozijo in po vsej verjetnosti tudi prisotnost različnih mikroorganizmov, ki pospešujejo korozijske procese. Zvar ne vpliva na korozijo in posledično na tanjšanje stene vodovodne cevi.

Na življenjsko dobo pocinkanih cevi vpliva kakovost vode, temperatura, pretok in tlak vode ter seveda zasnova, izvedba in vzdrževanje sistema. Natančne tehnične specifikacije in priporočila glede uporabe pocinkanih cevi v notranjih vodovodnih sistemih je definirano v standardu EN 806-2:2005 (*Specifikacija za projektiranje in dimenzioniranje notranjega vodovoda*) ter v smernicah 4MS (<https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/water/drinking-water/distributing-drinking-water/approval-harmonization-4ms-initiative>).

V t.i. pozitivni listi (del B) teh smernic je navedeno, da je pocinkane jeklene cevi primerno uporabljati samo za vodo, v kateri je njihova korozijska hitrost še sprejemljiva. Lastnosti take vode so naslednje: pH $\geq 7,5$ ali prosti $\text{CO}_2 \leq 0,25 \text{ mmol/L}$; alkalnost $\geq 1,5 \text{ mmol/L}$, prevodnost $\leq 600 \mu\text{S/cm}$ pri 25°C ter še določeno območje računskih parametrov, povezani z vsebnostmi ionov Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- ter SO_4^{2-} . V večini držav članic EU se teh cevi ne sme uporabljati za vodovodne sisteme.

Vzrok perforacije pocinkane cevi za vodo je korozijske narave. Debelina stene preiskane cevi je močno stanjšana le na mestu lokaliziranih korozijskih poškodb.

2. Kafetiera

Uvod in opis problema:

Kafetiero je po približno sedmih letih vsakodnevne uporabe med kuhanjem kave odneslo iz kuhalne plošče približno 5 metrov v prostor. Pri iskanju vzroka smo ugotovili, da je kafetjera počila na zgornjem robu spodnjega dela kljub temu, da ima kafetjera varnostni ventil, ki mora sprostiti tlak, če je ta v posodi za vodo presežen (npr. če para ne more normalno prehajati skozi kavni prah).

Kako deluje kafetjera?

Vodo nalijemo v spodnji del kafetiere in v cedilce natresemo mleto kavo. Med segrevanjem se voda spreminja v vodno paro in tlak v spodnjem delu kafetiere narašča. Voda zaradi vedno večjega tlaka steče skozi lijak cedilca, ki je polno mlete kave, navzgor v zbiralnik kave in kava je kuhana.

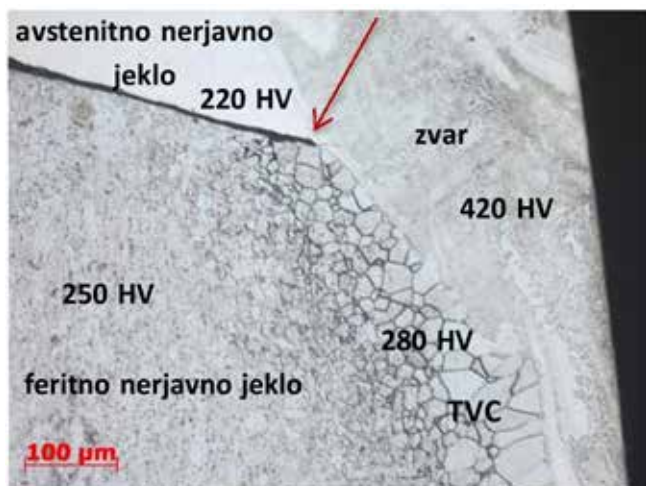


Slika 2a in 2b: Razpoka na spodnjem delu kafetiere iz nerjavnega jekla ter shema delovanja kafetiere.



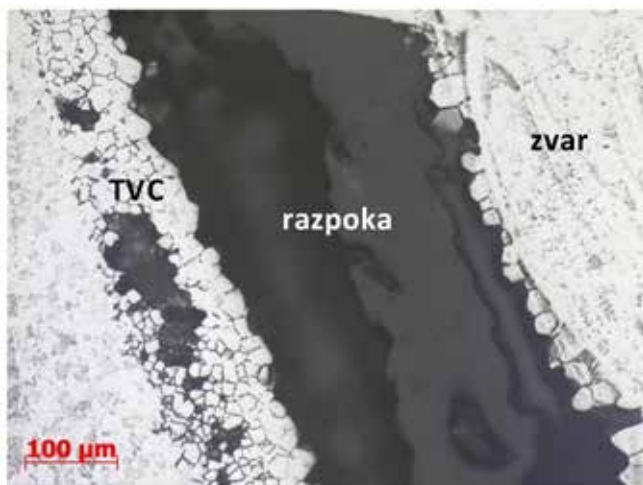


Slika 2c: Razpoka med posodo za vodo ter navojnim delom na spodnjem delu kafetiere iz nerjavnega jekla pri večji povečavi. Stik med zgornjim navojnim delom ter spodnjo posodo za vodo je prevarjen samo na približno $\frac{1}{4}$ celotne stične površine.



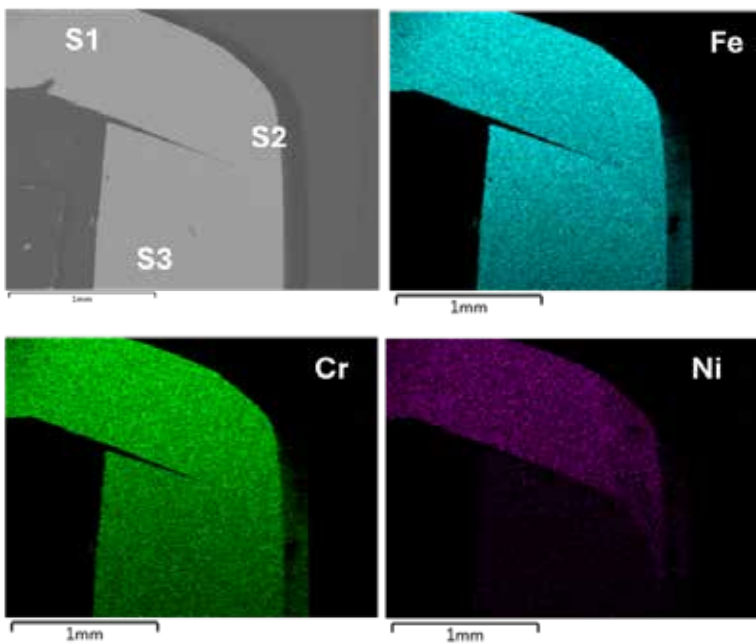
Slika 2d: Spodnji del kafetiere je sestavljen iz feritnega in avstenitnega nerjavnega jekla, ki sta med seboj zvarjena (jedkalo: zlatotopka). Prikazan je zvar na delu, kjer ni razpoke.

V toplotno vplivani coni (TVC) feritnega jekla so zaradi vnosa toplote pri varjenju kristalna zrna zrastle, na kristalnih mejah pa so se izločili karbidi. V TVC je nastala mikrostruktura, ki je močno korozijsko občutljiva, predvsem glede pojava interkristalne in napetostne korozije. Inicialno mesto razpoke je bilo v konici neprevarjenega preseka obeh varjencev spodnjega dela kafetiere, kjer se pri uporabi pojavljajo največje koncentracije napetosti (puščica na Sliki 2d).



Slika 2e: Kafetiera je počila po kristalnih zrnih v toplotno vplivani coni (TVC) na feritnem jeklu, kjer so kristalna zrna največja.

Na spodnji sliki 2f je prikazana EDS mapping analiza preko materiala posode za vodo in navojnega dela, ki sta med sabo zavarjena.



Slika 2f: Spodnji del kafetiere – rezervoar za vodo je sestavljen iz feritnega nerjavnega jekla (ne vsebuje niklja), zgornji, navojni del pa in avstenitnega nerjavnega jekla (vsebuje tudi nikelj).

Zvar je bil izveden brez uporabe dodatnega materiala in je njegova kemijska sestava zato zmes feritnega in avstenitnega nerjavnega jekla, ki se spreminja glede na mesto na zvaru. Kemijska sestava na posameznih mestih preko zgornjega preseka je prikazana v Tabeli 2-1.

Tabela 2-1: Točkovna EDS analiza v utežnih %.

Mesto analize	Cr	Fe	Ni
S 1 (navojni del)	19,2	73,0	7,82
S 2 (zvar)	19,1	74,1	6,87
S 3 (rezervoar za vodo)	17,2	82,6	0,19

Prav tako smo želeli preveriti, koliko kovinskih ionov se izluži med posameznim kuhanjem kave v različnih posodah za pripravo kave. Uporabili smo kavo vrste Arabika, ki je znana po svoji intenzivni aromi s kislim značajem. Analizo kovin v skuhani kavi smo izvedli z metodo ICP-MS.



Slika 2g: Različni načini priprave napitka kave za analizo (1-kafetjera iz nerjavnega jekla, 2-kafetjera iz aluminija, 3-rumena kafetjera (Al), 4-velika džezva, 5-mala džezva, 6-kavni aparat).

Pripravili smo kavno iz kavne Illy, 100 % arabica v razmerju kavni prašek:voda: cca 10g kave na 100 mL vode, pH napitka je bila 5,4-5,5.

Tabela 2-2: Koncentracije kovinskih ionov (v mg/l) v pripravljenem kavnem napitku

	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Pb
1	0,029	0,004	0,76	0,076	0,002	0,004	0,008	0,10	0,0005	0,001	0,002	<0,0002	0,002
2	0,031	0,0003	0,61	0,014	0,002	0,002	0,005	0,14	0,0004	0,001	0,001	<0,0002	0,0007
3	0,077	0,0004	0,35	0,008	0,001	0,003	0,007	0,12	0,0003	0,0008	0,0008	<0,0002	0,001
4	0,004	0,0008	0,78	0,022	0,003	0,006	0,10	0,31	0,001	0,001	0,002	<0,0002	0,0874
5	0,012	0,001	0,88	0,024	0,003	0,005	0,062	0,17	0,0008	0,001	0,032	0,0002	0,79
6	0,036	0,002	1,6	0,43	0,009	0,041	0,068	0,21	0,001	0,004	0,008	0,0009	0,003

V <0,0002; Sb <0,0002

V tabeli so nekatere koncentracije kovinskih ionov odebeljene, ker smo zaznali relativno povečane koncentracije. Nobena koncentracija ni nedopustno velika. Kovinski elementi, kot so Fe, Cu, Zn in Mn so naravno prisotni v kavnih zrnih in so pomembni za prehransko vrednost kave. Ti mikroelementi se naravno nahajajo v koncentracijah 1.2 mg/kg (Mn) do 110 mg/kg (Fe) v praženih kavnih zrnih.

Pri kuhanju kave se zaradi kisle narave kavnega pripravka lahko izlužijo kovinski ioni. Z našimi analizami smo pokazali, da ni tveganja za povišane vrednosti v pripravljenih kavnih napitkih v različnih posodah. Razlog za to je hiter čas priprave (ni daljšega časa stika med napitkom ter materiali, v katerih se kava pripravlja) ter hiter čas do zaužitja.

Zaključek:

Kafetjera, ki je pri kuhanju kave odpovedala, je sestavljena iz dveh vrst nerjavnega jekla. Rezervoar je iz feritnega nerjavnega jekla, ki zaradi magnetnosti omogoča kuhanje na induktivnem kuhališču, preostali del kafetjere pa je iz avstenitnega nerjavnega jekla. Dve različni nerjavni jekli sta med seboj varjeni s pretaljevanjem brez uporabe dodatnega materiala. Kuhanje kave v kafetieri povzroča v materialu spremembe napetosti zaradi spreminjanja tlaka in temperature, kar material utruja (*angl.* Fatigue). Po številnih skuhanih kavah je na zvaru ter v TVC zvara med materialom spodnjega rezervoarja za vodo ter navojnim delom nastala interkristalna razpoka, ki se je z vsakim kuhanjem širila, dokler njena velikost ni zrastle do te mere, da je zvar po celotnem preseku lokalno počil. Poleg tega je razlog za odpoved tudi slaba izvedba zvara, saj sega le preko ¼ celotne stične površine med obema deloma, ki ju spaja. Na tem mestu je izrazita koncentracija napetosti (visok faktor intenzitete napetosti), ki je vodila v interkristalno napetostno korozijsko pokaanje.

Naše analize kave, pripravljene v namenskih posodah iz različnih kovinskih materialov, so pokazale, da ni tveganj za zaužitje kritičnih koncentracij kovinskih in toksičnih elementov.

Vzrok loma je nastanek razpoke med navojnim delom ter posodo za vodo v toplotno vplivani coni (TVC) zvara. Razpoka je potekla utrujenostno po korozijsko občutljivih kristalnih mejah povečanih kristalnih zrn na območju z izrazito povečano koncentracijo napetosti med ponavljajočimi procesi kuhanja kave.

3. Al nosilec zadnjega menjalnika

Uvod in opis problema:

Med cestno vožnjo je počil aluminijast nosilec zadnjega menjalnika, ki je pritrjen na zadnjo os kolesa z vijaki. Zadnji menjalnik na cestnem kolesu premika verigo med zobniki na zadnjem kasetnem gonilniku, kar omogoča prilagajanje prestav glede na teren. Ob pritisku na prestavno ročico menjalnik, opremljen z vzmetjo in vodikom, natančno premakne verigo na večji ali manjši zobnik, s čimer se spreminja odpornost pri poganjanju. Menjalnik je precej masiven, zato se lahko med vožnjo po nesreči zaleti v oviro, kar dodatno obremeni njegov nosilec. Pozicija menjalnika glede na os kolesa se spreminja glede na izbrano prestavo – pri različnih obremenitvah se dolžina ročice, ki jo tvorita menjalnik in nosilec, spreminja, kar vpliva na silo, ki deluje na mesto vpetja.



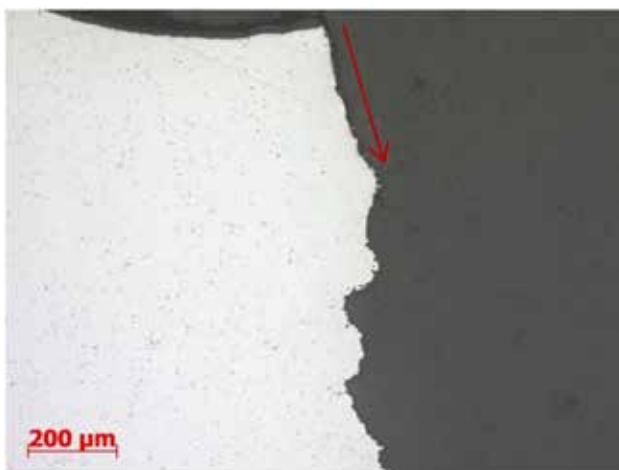
Nosilci menjalnika so posebej obremenjeni na gorskih kolesih, kjer je verjetnost trka s terenom med vožnjo večja, kar pogosto vodi do njihovega zloma. Pri cestnih kolesih so take poškodbe in odpovedi redkejšje. Prelom nosilca v tem primeru se je zgodil tik ob mestu vpetja, kjer je pritrjen z vijakom preko površinsko teksturirane podložke, namenjene preprečevanju zavrtitve. Podložka je na nosilcu pustila odtis na mestu stika, prav tako pa izvrtina v nosilcu zmanjša njegov presek, kar dodatno oslabi konstrukcijo.

Slika 3a: Prelom nosilca zadnjega menjalnika iz aluminija.



Slika 3b: Prelom nosilca zadnjega menjalnika iz aluminija.

Inicialno mesto utrujenostne razpoke je na Slikah 3a in 3b označeno s puščico. Teksturirana podložka je na aluminijastem nosilcu pustila ostre odtise. Na mestu, kjer se pojavljajo največje obremenitve je površinska poškodba predstavljala inicialno mesto za nastanek utrujenostne razpoke.



Slika 3c in 3d: Prerez lomne ploskve, na zgornjem – ravnem delu je razpoka nastajala postopoma, utrujenostno. Smer poteka loma je označena s puščico (3c). Prerez lomne ploskve trenutnega - krhkega loma (3d).

Na Slikah 3c in 3d sta prikazani lomni ploskvi porušenega nosilca. Na približno 1/3 zgornjega dela je lomna ploskev relativno gladka. Na tem delu površine je postopoma nastajala utrujenostna razpoka. Inicialno mesto razpoke je označeno s puščico. Utrujenostna razpoka je predstavljala zarezo, pa tudi zmanjšanje nosilnega preseka. Preostali del lomne ploskve se je pri obremenitvi porušil trenutno – krhko.



Slika 3e: Lomna površina krhkega loma poteka po kristalnih zrnih (jedkalo: Keller Al).

Tabela 3-1: Rezultati kemijske analize vzorca v ut. %.

	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
zadnji menjalnik	0,199	0,634	0,002	0,055	0,007	0,258	0,964	0,030	97,8
Al 6061	≤ 0,7	0,4 - 0,8	≤ 0,15	0,04 - 0,35	≤ 0,15	0,15 - 0,4	0,8 - 1,2	≤ 0,25	95,9 - 98,6

Športna oprema iz aluminija je največkrat izdelana iz aluminija serije Al 6xxx zaradi odlične kombinacije trdnosti, lahкости (specifična teža), korozijske odpornosti in sposobnosti obdelave (npr. z ekstruzijo).

Zaključek:

Prelom nosilca zadnjega menjalnika je posledica slabe zasnove, saj je na mestu največjih obremenitev prisotna izvrtina, ki zmanjšuje presek nosilca. Zaradi večkratne uporabe in morda tudi posamičnega dogodka – udarca menjalnika ob oviro – se je razpoka začela tvoriti in širiti ob posameznih menjavah prestav. Nastanek razpoke je pospeševala prisotnost zarez (odtisov), nastalih pri privijačenju na os kolesa, ter oslabitev zaradi izvrtine na kritičnem mestu.

Proizvajalec je v naslednjih izvedbah nosilec izboljšal tako, da je vpetje sedaj izvedeno preko polne izvrtine namesto »kljuka« in brez izvrtine na kritičnem mestu. S tem je zagotovljen večji presek nosilca, zmanjšane so koncentracije napetosti, hkrati pa je izboljšana tudi togost na tem delu.

Vzrok za lom Al menjalnika tako ni korozija, ampak je vzrok mehanske narave.

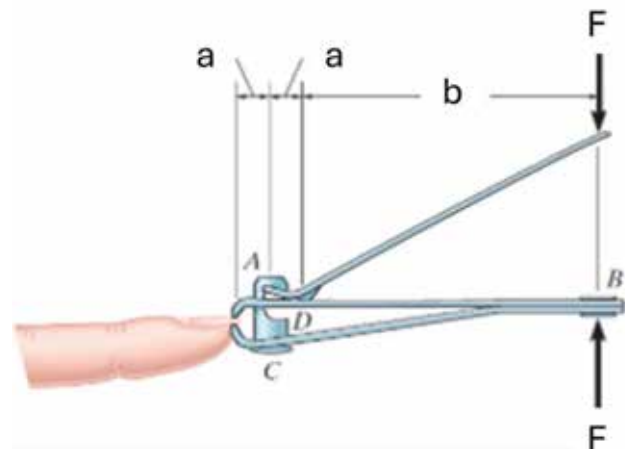
4. Ščipalnik za nohte - zlom

Uvod in opis problema:

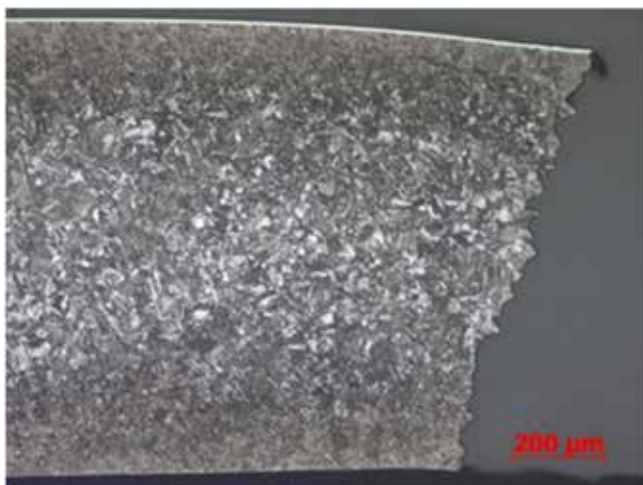
Pri ščipalniku za nohte se je pri nekajkratni uporabi zlomila ročica – vzvod, s katerim vnesemo silo na rezalo, ki odščipne noht. Mikrotrdota nohta je odvisna od relativne vlažnosti in je pri normalni vlažnosti med 20 in 25 Vickersov (HV 1) – referenca (<https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0119>). Pri uporabi ščipalnika za nohte vzvod zavrtimo in na ta način s pritiskom nanj ustvarimo dovolj veliko silo (F na shemi), da lahko odščipnemo noht. Največja sila je pri tem ravno na mestu preloma – na tem mestu je debelina stene nekoliko tanjša od preostalega dela ter prekinjena z izvrtino na sredini z namenom pripetja ter vrtenja vzvoda na ščipalniku (mesto D na shemi). Material vzvoda je pločevina iz jekla za poboljšanje v poboljšanem stanju z martenzitno – bainitno mikrostrukturo. Jeklo ima visoko trdoto in slabo duktilnost.



Slika 4a: Krhki prelom ščipalnika za nohte.



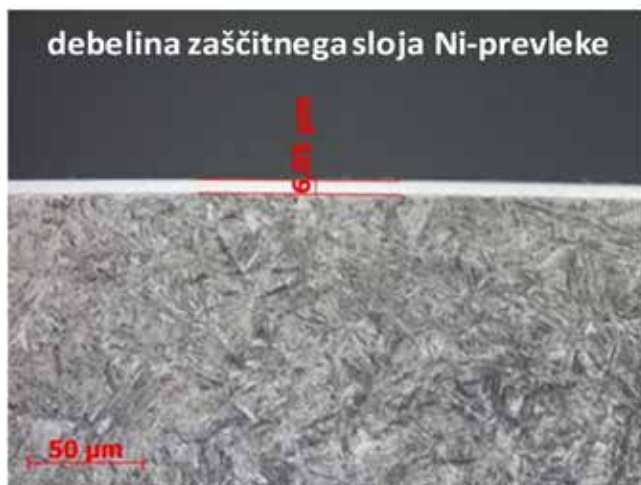
Slika 4b: Shema: Delovanje ščipalnika za nohte, vir sheme: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/figure-shown-finger-nail-clippers-shown-machine-uses-top-lever-upper-cutting-blade-lower-c-q62970263>



Slika 4c: Kaljeno jeklo za poboljšanje. Martenzitno bainitna mikrostruktura (jedkalo: 3% Nital).

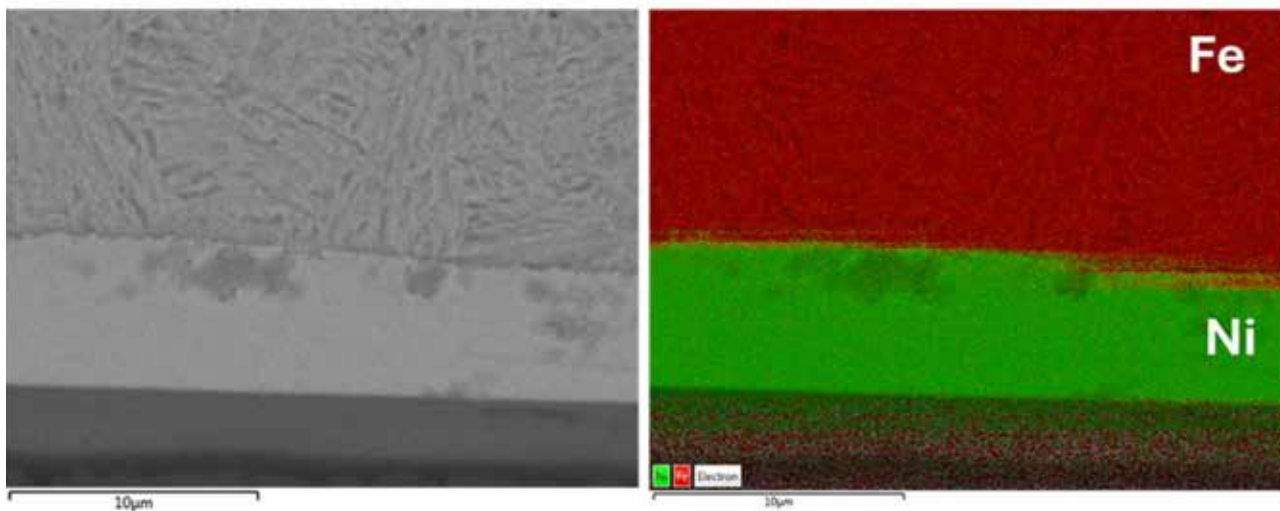


Slika 4d: Lomna površina krhkega loma poteka po kristalnih zrnih.



Slika 4e: Na površini jekla je zaščitni sloj Ni-prevleke debeline 6 mm. Mikrostruktura na površini jekla je martenzitna.

Slika 4f: Na površini ščipalnika je zaščitni sloj Ni-prevleke debeline 6 μm.



Zaključek:

Vzvod ščipalnika za nohte je med ščipanjem izpostavljen upogibni obremenitvi, zlasti na krivini, kjer je prišlo do preloma. Ker je izdelan iz visokotrdnega jekla z omejeno duktilnostjo in dodatno oslavljen z izvrtino, je manj odporen na ponavljajoče se mehanske napetosti, kot so tiste, ki nastanejo pri večkratni uporabi. Zaščitna prevleka, namenjena protikorozijski zaščiti in izboljšanju estetike, ni vplivala na nastanek poškodb, saj je bila glavna vzrokov oslabitev materiala in koncentracija napetosti na kritičnem mestu.

Vzrok zloma je mehanske narave.

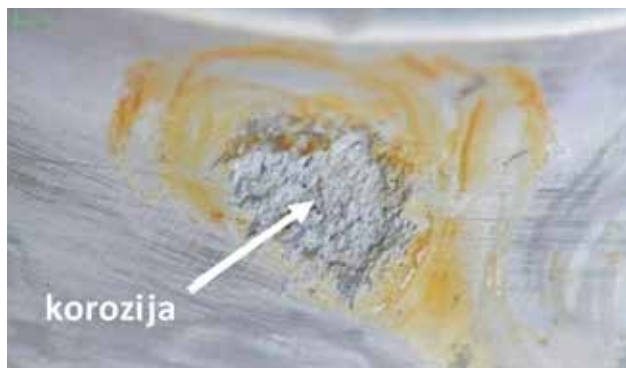
5. Pločevinka Coca-Cola

Uvod in opis problema:

Pločevinka Coca-Cola je bila v začetku leta 2014 prinesena iz ZDA in shranjena pri sobnih pogojih. Po približno petih letih je prišlo do perforacije in iztekanja vsebine. Ob hitrem pregledu zunanosti pločevinke smo opazili lokalne poškodbe na spodnjem zunanjem robu. Zanimalo nas je kaj je vzrok teh poškodb.



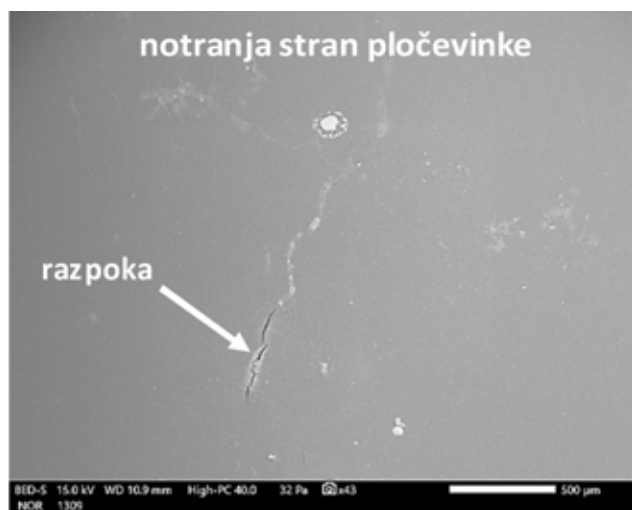
Slika 5a: Področja kjer je prišlo do perforacije in iztekanja tekočine.



Slika 5b: Korozijska na zunanjem delu pločevinke in posušene sledi tekočine (rumeno - rjavo).



Slika 5c in 5d: Korozija na zunanji strani pločevinke. Na notranji strani pločevinke je lak debeline 10 mm.



Slika 5e in 5f: Razpoka na notranji strani pločevinke. Zunanja stran pločevinke: “exfoliation” tip korozije.

Zaključek:

Glavna sestavina Coca-Cole je fosforna kislina. Pijača ima pH vrednost med 2,5 in 3, kar pomeni, da deluje kislo, v takih pogojih pa aluminij hitro korodira (vir: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01206102>). Notranja stran pločevinke je običajno zaščitena z organsko prevleko, ki preprečuje stik pijače z aluminijem. Do puščanja pločevinke je prišlo zaradi poškodbe te notranje prevleke in prisotnosti mikrorazpoke, ki je verjetno nastala med globokim vlekom pločevinke. Naše preiskave so razkrile vidne razpoke na notranji strani pločevinke.

Coca-Cola, ki je iztekla skozi razpoko in se zadrževala na zunanji strani, je korozijsko vplivala na dno pločevinke. Dno, ki na zunanji strani ni lakirano, je začelo korodirati, pri čemer so poškodbe bolj izrazite na zunanji kot na notranji strani pločevinke.

Vzrok perforacije pločevinke je v začetku najverjetneje napaka pri izdelavi (razpoka pri vlečenju) ter v nadaljevanju korozija zaradi puščanja vsebine Coca-Cole ter njenega zadrževanja na nelakiranem delu.

6. Krmilo sobnega kolesa

Uvod in opis problema:

Kolesarjenje v zaprtih prostorih na pametnih trenažerjih z uporabo aplikacij, kot so Zwift, TrainingPeaks, MyWhoosh, Rouvy in druge, je v zimskem času odlična izbira za trening ali tekmovanje. Pri tem se pri običajnem cestnem kolesu odstrani zadnje kolo, zadnja os pa se vpne v trenažer. Ker se med kolesarjenjem v zaprtih prostorih ne premikamo in običajno kolesarimo v ogrevanih, omejenih prostorih, se močno znojimo – več kot pri kolesarjenju na prostem. Pomagamo si lahko z ventilatorji, a po koncu vadbe se pod kolesom pogosto nabere prava luža znoja. Znoj med vadbo doseže različne dele kolesa, še posebej pa je izpostavljeno krmilo, ki je zaradi boljšega oprijema in udobja ovito s penastimi trakovi. Pod temi trakovi se znoj ujame in težko posuši.

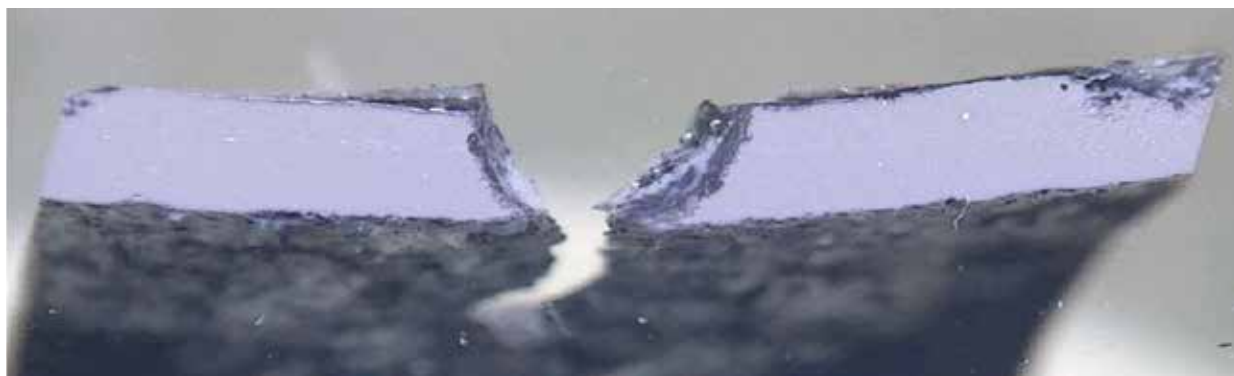
Človeški znoj, ki mu v slovenščini pravimo tudi pot, vsebuje predvsem vodo ter manjše količine mineralov, laktata in sečnine. Njegova mineralna sestava se razlikuje glede na posameznika: klorid (Cl: 0,7–1,2 g/l), natrij (Na: 0,46–1,84 g/l), kalcij (Ca: 0–0,04 g/l), kalij (K: 0,16–0,32 g/l) in magnezij (Mg: 0,004–0,015 g/l) – vir: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Znojenje>.



Slika 6a: Kolesarjenje na sobnem kolesu.

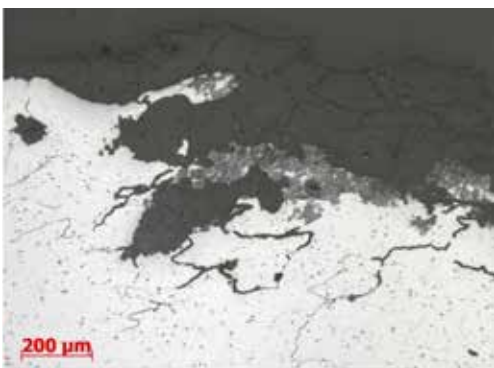
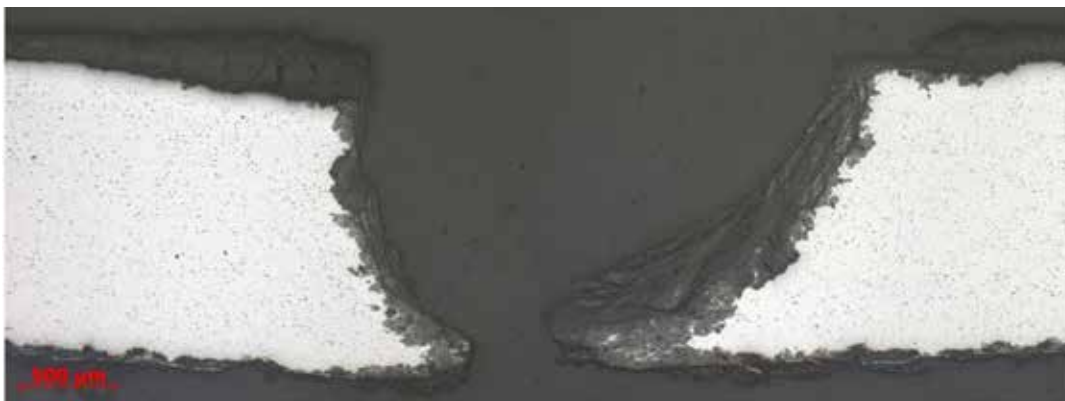


Slika 6b: Korozijski produkti na krmilu cestnega kolesa, ki je bilo čez zimo uporabljen za kolesarjenje na trenažerju. Stena krmila je popolnoma skorodirala - luknja na krmilu.

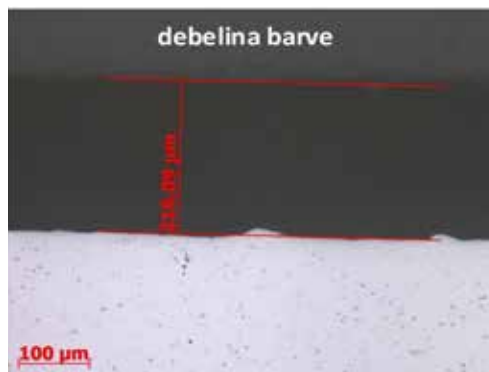
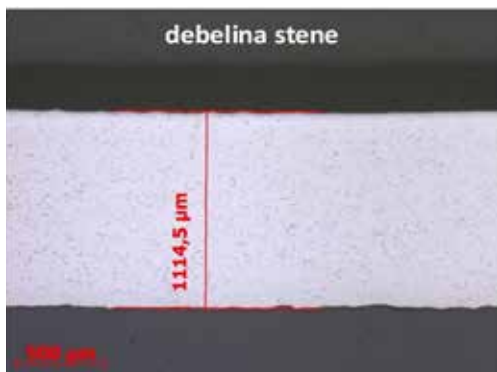


Slike 6c: Prerez preko stene krmila na mestu, kjer je le-to popolnoma skorodiralo.

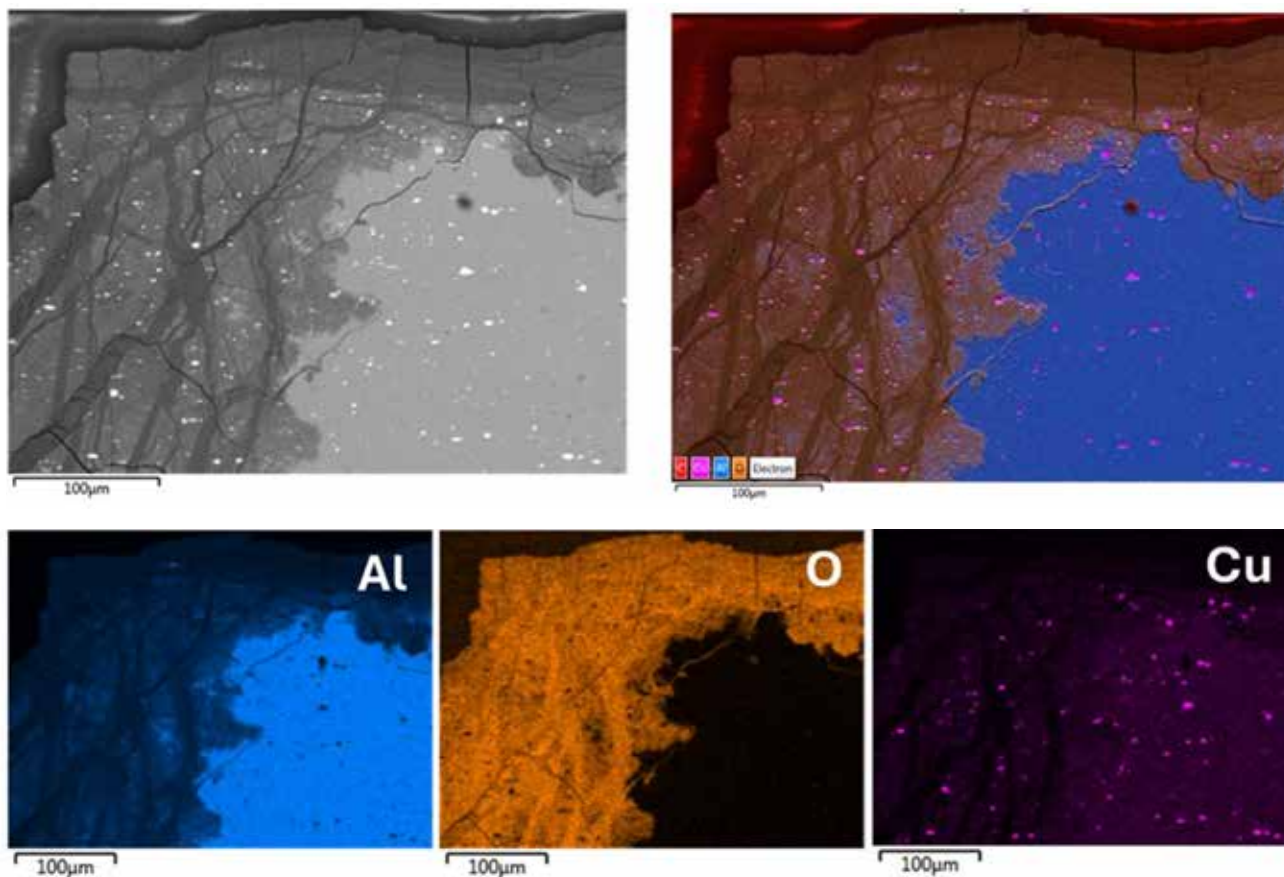
Slika 6d in 6e: Korozijski produkti na delu, kjer je stena krmila popolnoma skorodirala.



Slika 6f: Korozijski produkti in interkristalna korozija.



Slika 6g in 6h: Debelina stene, kjer ni prišlo do korozije, je cca 1115 mm, debelina barve cca 215 mm.



Slika 6i: EDS mapping (površinska analiza) preko korozijskih produktov na poškodovanem krmilu.

Tabela 6-1: Rezultati kemijske analize krmila v ut.%.
 (The following table is provided in the image but is not included in the HTML output as per the instructions.)

	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn
krmilo kolesa	0,179	0,610	0,803	0,018	0,026	4,32	0,635	0,043
EN AW 2014	≤ 0,7	0,5 - 1,2	0,4 - 1,2	≤ 0,10	≤ 0,15	3,9 - 5,0	0,2 - 0,8	≤ 0,25
EN AW 2017	≤ 0,7	0,2 - 0,8	0,4 - 1,0	≤ 0,10	-	3,5 - 4,5	0,4 - 1,0	≤ 0,25

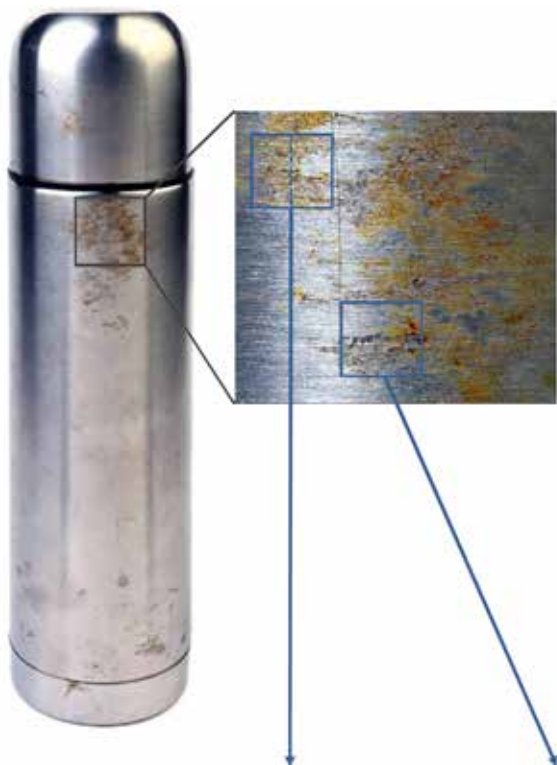
Zaključek:

Po dveh sezonah zimskega kolesarjenja v zaprtem prostoru in eni poletni sezoni kolesarjenja na prostem smo s krmila odvili trak in odkrili obsežne korozijske poškodbe, vključno s perforacijo. Za podrobnejšo analizo smo skozi perforacijo pripravili metalografski ohrus, ki je razkril obseg korozijskih poškodb. Na mestih poškodb smo zaznali korozijske produkte aluminija, ki vsebujejo aluminij (Al) in kisik (O). Ti produkti so razpokani, korozija pa napreduje po mejah zrn (interkristalno). Z elementno analizo smo v korozijskih produktih, poleg prevladujočih Al in O, ugotovili tudi prisotnost klora (Cl), ki je v obliki kloridov – sestavina znoja – in deluje kot pospeševalec korozije.

V primeru menjalnika kolesa smo omenili, da je večina športne opreme izdelane iz aluminijevih zlitin iz serije 6xxx. Krmilo kolesa je izdelano iz serije 2xxx – to je zlitina aluminija, ki je legirana z bakrom. Razlog za to je predvsem v višji trdnosti ter razmerju med trdnostjo in maso te zlitine.

Človeški znoj je po svoji naravi zelo koroziven. Pot se je ujel med penasti trak krmila in se tam zadrževal. Vzrok za intenzivno interkristalno ter splošno korozijo krmila kolesa je korozija.

7. Termovka



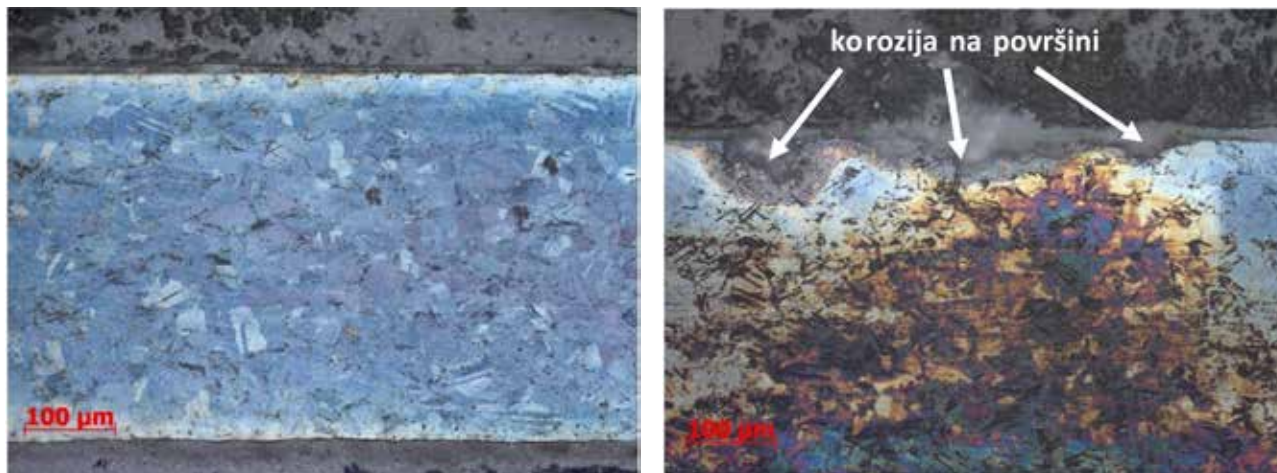
Uvod in opis problema:

Kovinska termo steklenica (SKKJ: termovka ali termos) za ohranjanje toplote tekočine za pitje je izdelana iz krtačene pločevine iz nerjavnega jekla. Po letih uporabe se je na različnih delih površine začela pojavljati korozija. Korozija je vidna na delih, ki jih pri uporabi pogosteje prijemamo z rokami. Želeli smo preveriti vzrok pojava rdečkastih produktov na zunanji površini termovke.

Slika 7a: Korozija na površini termovke.

Slika 7b in 7c: Prečni in vzdolžni prerez termovke. Na prečnem prerezu so vidne sledi obdelave površine, na vzdolžnem pa opazimo korozijske poškodbe na površini termovke.





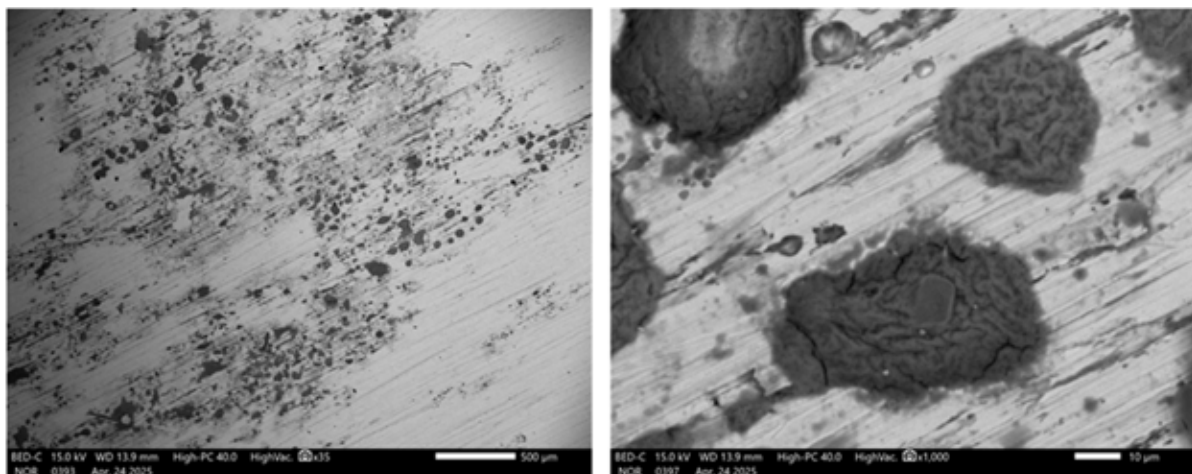
Slika 7d in 7e: Mikrostrukturna analiza z uporabo barvnega jedkala je pokazala, da je material avstenitno nerjavno jeklo. Desna slika prikazuje korozijske poškodbe na površini prečnega prereza (jedkalo: Beraha II).

Tabela 7-1: Rezultati kemijske analize termovke v ut.%.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
termovka	0,06	0,45	0,92	0,066	0,009	17,95	7,80	0,03
AISI 304	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	17,5 - 19,5	8,0 - 10,5	≤ 0,11

Kemijska analiza termovke odstopa od zahtev za AISI 304, pri tem je vsebnost Ni malo nižja, vsebnost P pa malo višja.

SEM analiza korozijskih produktov: Iz SEM/EDS analize je razvidno, da je izvor korozijskega napada najverjetneje dotikanje termovke s potnimi rokami ter izpostavljenost vlažnemu okolju. Korozijski produkti vsebujejo klor, ki je ena od sestavin znoja (glej primer krmila kolesa). Zunanost termovke se verjetno ne čisti tako intenzivno in temeljito kot notranost. Poleg tega nekateri detergenti za čiščenje vsebujejo agresivne snovi (npr. klor), ki lahko delujejo korozivno, če se jih po čiščenju ne spere temeljito. Ciklično nihanje vlage in temperature je povzročilo postopno korozijo krtačenih delov nerjavne pločevine.



Slika 7f: Korozijske poškodbe na površini termovke.

Tabela 7-2: Rezultati EDS analize na površini korozijskih produktov

C	O	Na	Mg	Si	Cl	Ca	Cr	Fe	Ni	Total
16,5	42,3	0,46	0,31	0,66	0,92	1,44	6,26	29,5	1,62	100

Zaključek:

Krtačene površine so na splošno bolj podvržene korozijskim napadom, ne glede na material. V neravninah na površinah se ujame vlaga ter nečistoče s sestavinami, ki pospešujejo korozijo. Krtačenje »raztrga« površino zaradi česar postane bolj občutljiva za korozijo. Avstenitno nerjavno jeklo je sicer proti koroziji dobro odporno pri pogojih, ki omogočajo tvorbo pasivnega filma na površini (tanek, nekaj nanometrov debel sloj Cr-oksida, ki zagotavlja dobro korozijsko odpornost teh jekel in zaradi česar ta jekla imenujemo »nerjavna« jekla). Iz EDS analize korozijskih produktov in prisotnosti Ca, Mg in Cl sklepamo, da je do korozije prišlo zaradi dotikanja termovke s potnimi rokami. Dejstvo, da so madeži prisotni na zgornjem robu pod pokrovom, kjer običajno držimo termovko, dodatno potrjuje to dejstvo. S prijemanjem krtačene površine iz potnih rok vnesli znoj, ki se je skupaj z drugimi nečistočami oprijel hrapave površine. Ob prisotnosti vlage so nastale lokalne korozijske poškodbe, ki so poškodovale Cr-oxid in vodile do korozije jekla in tvorbe vidnih rjavih korozijskih produktov – to so na tej vrsti jekla Fe, Cr – oksidi, hidrooksidi in spineli.



8. Baterija Li-ion

Uvod in opis problema:

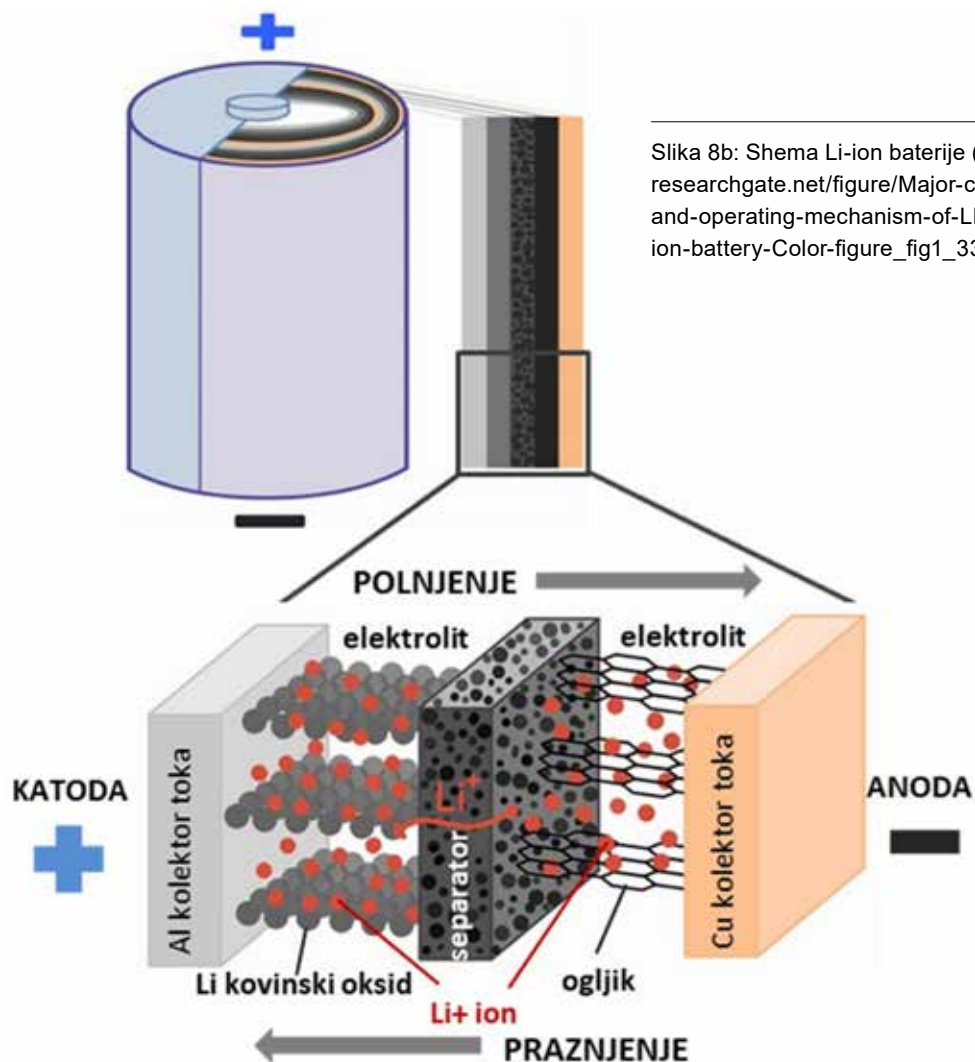
Li ionske (Li-ion) baterije se zaradi svojih odličnih lastnosti uporabljajo kot sestavni del prenosnikov, pametnih telefonov, tablic, ipd. Imajo visoko energijsko gostoto, kar pomeni, da shranijo veliko energije glede na težo in prostornino. Znale so po nizki samoizpraznitvi v času, ko niso v uporabi. Omogočajo veliko ciklov polnjenja in praznjenja ter podpirajo hitro polnjenje brez večjih izgub. Pri Li ionskih baterijah ni potrebe po popolni izpraznitvi pred ponovnim polnjenjem.

Želeli smo preveriti njihovo strukturo ter sestavo in odkriti, ali je možno zaznati kakšne nepravilnosti pri iztrošeni bateriji.

Li-ion baterija je baterija za polnjenje, pri kateri se Li-ioni premikajo od anode proti katodi pri praznjenju in obratno pri polnjenju.



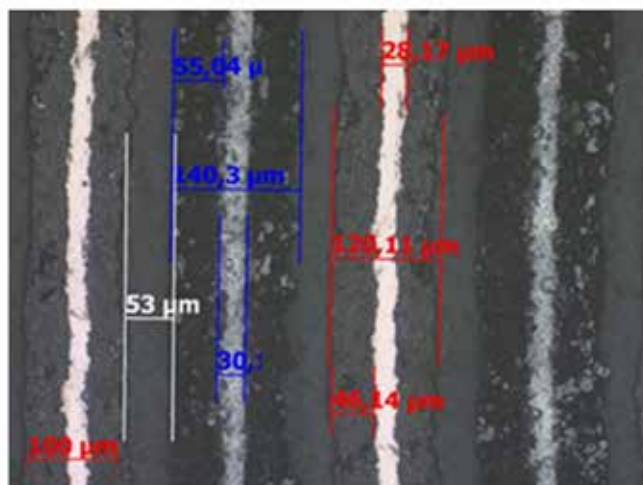
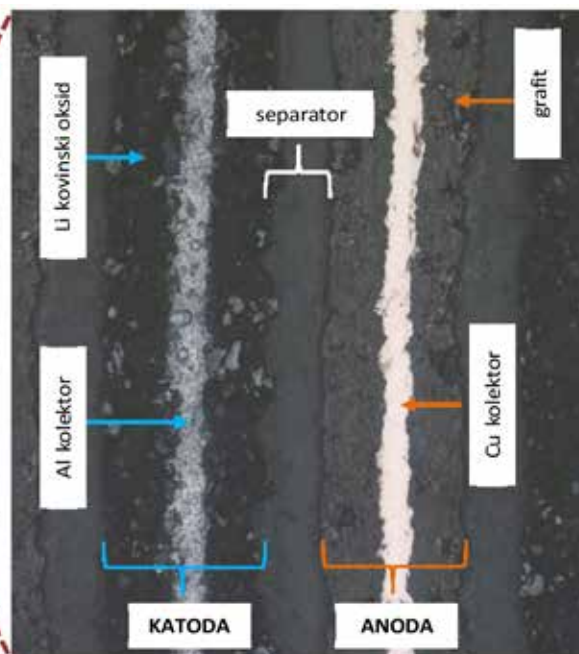
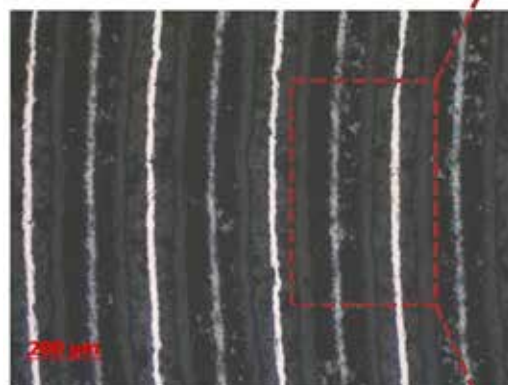
Slika 8a: Sestavljena iztrošena baterija prenosnika.



Slika 8b: Shema Li-ion baterije (https://www.researchgate.net/figure/Major-components-and-operating-mechanism-of-LIBs-LIB-lithium-ion-battery-Color-figure_fig1_338518830).

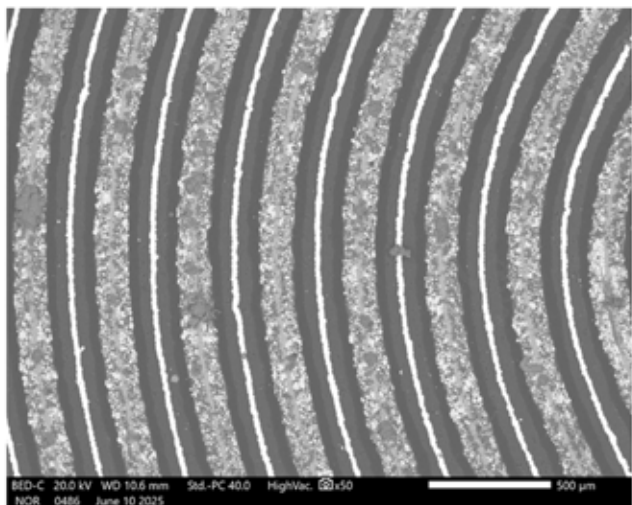
V preseku baterije (Slika 8b) se vidi anodo, ki je običajno grafit. Katoda je Li-kovinski oksid kot npr: LiCoO_2 , LiFePO_4 . Med njima je separator, to je tanka plast, ki preprečuje stik med elektrodami. Elektrolit ni viden. Trdne elektrolitne medfazne plasti (SEI) so zelo pomembne za delovanje baterije.

Slika 8c: Optični mikroskopski posnetek prereza Li-ion baterije na metalografsko pripravljenem obrusu.

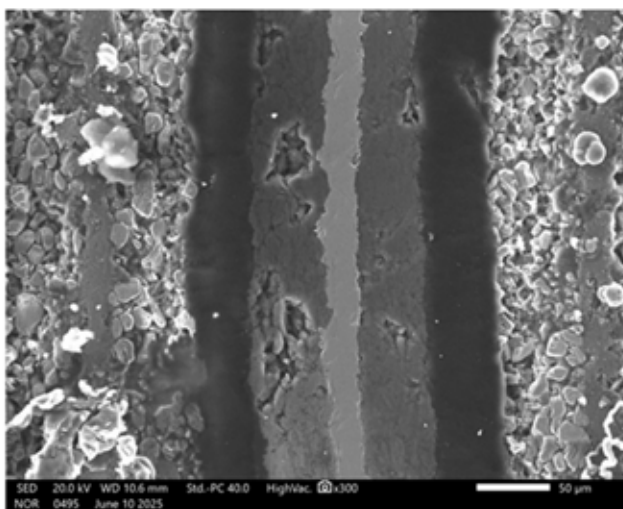
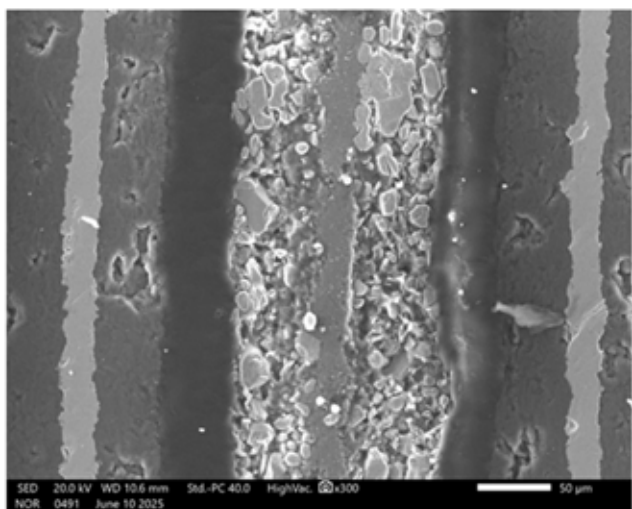


Slika 8d: Optični mikroskopski posnetek prereza Li-ion baterije in debeline posameznih plasti.

Debeline plasti v prerezu Li-ion baterije so: katoda ~ 140 μm , Al kolektor ~ 30 μm , Li kovinski oksid ~ 55 μm , separator ~ 53 μm , anoda ~ 120 μm , Cu kolektor ~ 28 μm in grafit ~ 46 μm .



Slika 8e: SEM posnetek prereza Li-ion baterije na metalografsko pripravljenem obrusu.

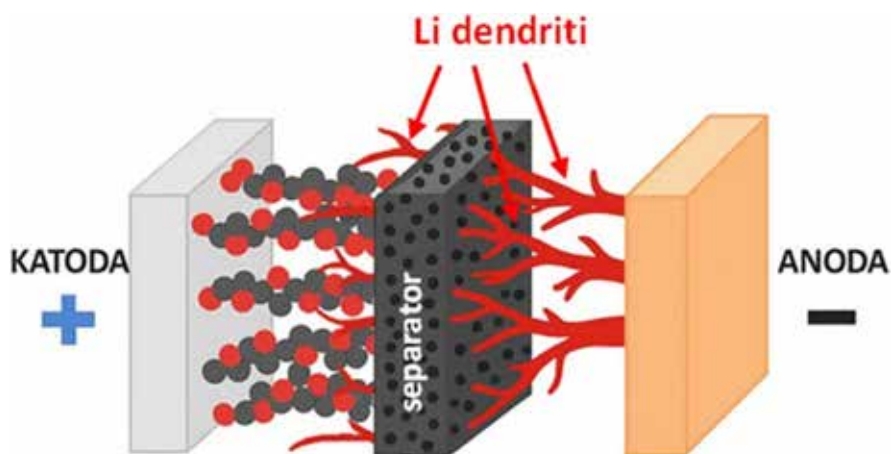


Slika 8f: SEM posnetek prereza Li-ion baterije na metalografsko pripravljenem obrusu (katoda in anoda).

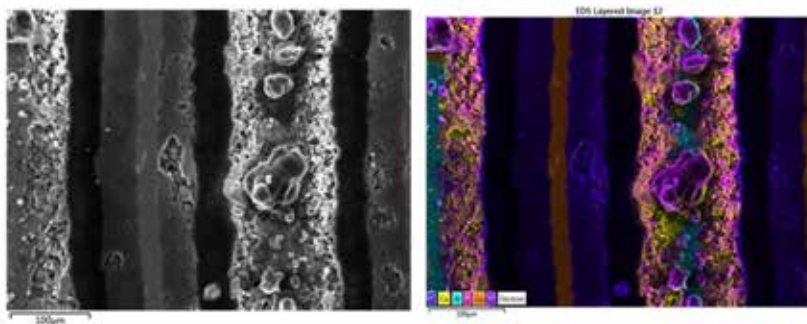
Iztroženost Li-ionske baterije se v nekaterih primerih lahko prepozna s pregledom pod elektronskim mikroskopom (SEM, TEM), a običajno skupaj tudi z drugimi analiznimi tehnikami.

Pokazatelji iztrošenosti, ki so vidni pod mikroskopom, so:

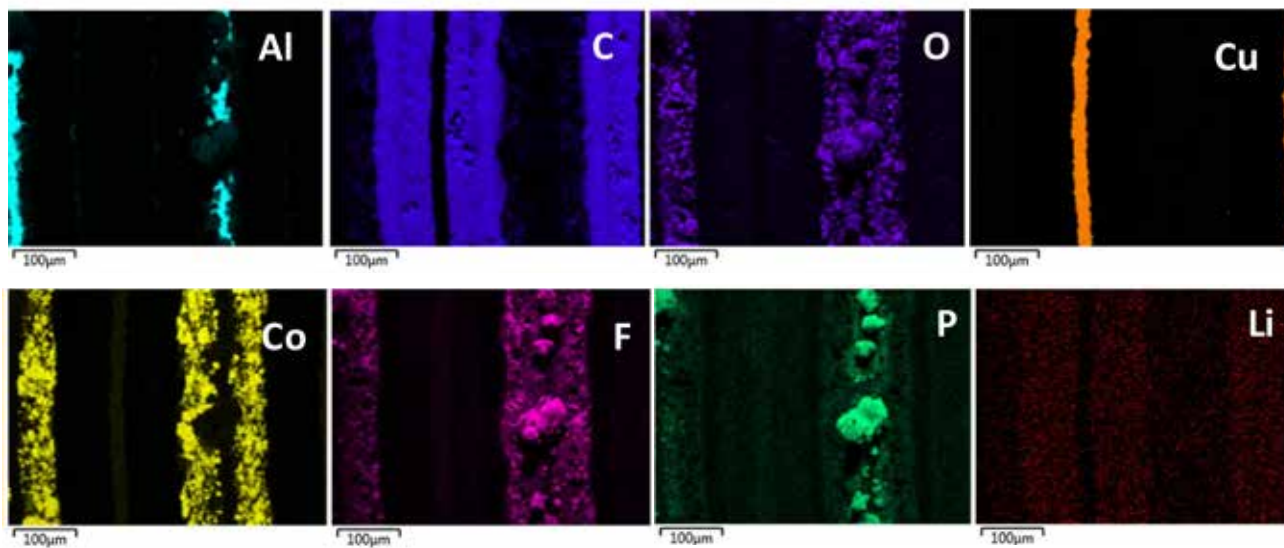
- Strukturne spremembe na anodi (grafit): po več ciklih se grafitna anoda lušči, postane porozna in/ali mehansko poškodovana, lahko se tvorijo razpoke in odstopanja prevodne plasti. Na spodnji sliki (elementna mapping analiza) lahko opazimo poroznost in napake v grafitni plasti (vijolično polje). Prav tako se na zgornji sliki (ob Cu kolektorju) vidi, da je plast grafita nehomogena, da se lušči in odstopa.
- Debeljenje SEI plasti (solid electrolyte interphase): SEI je pasivna plast, ki nastane na katodi. Z vsakim ciklom se odebeljuje in postane nehomogena, kar omejuje pretok ionov. Ocenili smo debelino SEI plasti ob Al kolektorju; ta je 140 μm in je debelejša od anode ob Cu kolektorju- 120 μm .
- Spremembe na katodi: LiCoO_2 , NMC ali druge katodne snovi lahko kažejo fazne spremembe, mikrorazpoke ali celo delaminacijo od tokovnega kolektorja. Lahko pride tudi do rekristalizacije ali tvorbe amorfnih plasti. V SEI plasti zaznamo veliko nehomogenosti. Z SEM smo potrdili te ugotovitve.
- Litijevi dendriti: v primeru okvarjene baterije (npr. prekomerno polnjenje) se lahko tvorijo Li dendriti, ki so igličaste strukture in lahko preluknjajo separator – kar povzroči kratek stik. Naše preiskave tega niso potrdile.



Slika 8g: Shema rasti Li dendritov v Li-ion bateriji.



Slika 8h: Mapping EDS analiza preko prereza posameznih plasti znotraj baterije.



Zaključek:

V iztrošenih baterijah prenosnega računalnika, ki so iz Li-ionskih enot, smo želeli preveriti, ali lahko pogledamo v njihovo notranjost. Med zgoraj naštetimi možnimi pokazatelji iztrošenosti smo opazili nekatere spremembe, ki so vodile do zmanjšane kapacitete.

Običajno se mikroskopske analize dopolnijo še z elektrokemijsko impedančno spektroskopijo, meritvami kapacitete pri cikliranju in pa z analizo kemijske sestave plasti.

9. Pipa za umivalnik

Uvod in opis problema:

Pipa za umivalnik je sčasoma, po nekaj letih uporabe v sanitarijih, izgubila površinski sijaj. Površina nove pipe je bila na začetku sijajoča, z uporabo pa je postala lisasta, na mestih lis so prisotni različni odtenki rumene barve ter mat barve. Na otip površina ni hrapava, kar pomeni, da spremenjena barva ni posledica nalaganja vodnega kamna.

Pipe so običajno izdelane s postopkom litja iz medenine (zlitina bakra in cinka, za boljšo obdelovalnost se dodaja tudi svinec). Z namenom zaščite pred korozijo, pa tudi zaradi lepšega izgleda in enostavnejšega čiščenja se na površino nanese korozijsko obstojno prevleko, ki je običajno krom. Preiskavo smo opravili z namenom, da ugotovimo, kaj je povzročilo spremembe na površini.

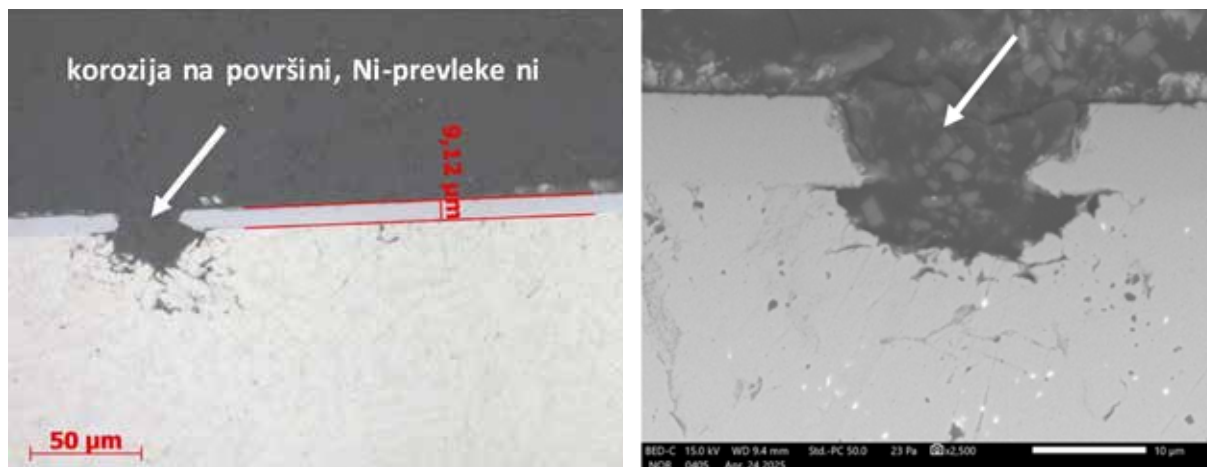


Slika 9a: Korozija na površini pipe.

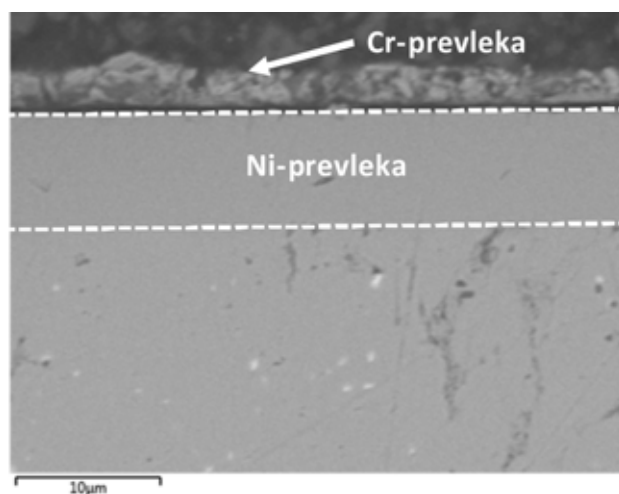
Pri preiskavi smo prerezali steno pipe na mestu prisotnih poškodb in pripravili metalografski obris. Pri tem smo ugotovili, da je površinska prevleka sestavljena iz dveh slojev. Spodnji sloj je iz niklja, debeline okoli 9 μm , zgornji – viden sloj pa iz kroma debeline okoli 2 μm .

Iz spodnjih metalografskih ter SEM posnetkov je na mestih poškodb vidno, da sloj niklja manjka, poškodbe pod njim so v obliki razširjenih jamic (ozka vhodna odprtina tik pod prevleko, ki se v notranjosti razširi). Korozija se iz notranjosti korozijskih jamic širi vzdolž β zrn, ki so bogatejše s cinkom in predstavljajo v $\alpha+\beta$ mikrostrukturi anodo, za korozijo bolj občutljivo fazo.

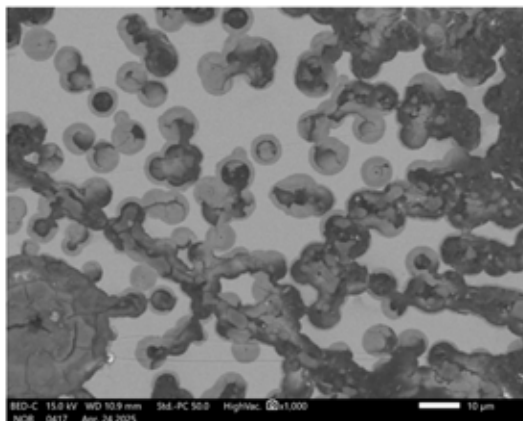
Metalografski posnetek prereza pipe, kjer so zaznane lokalne poškodbe v prevleki (označeno s puščico)



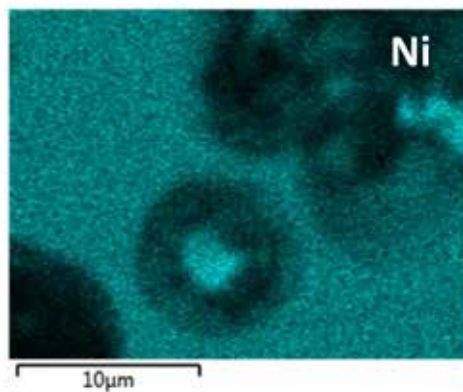
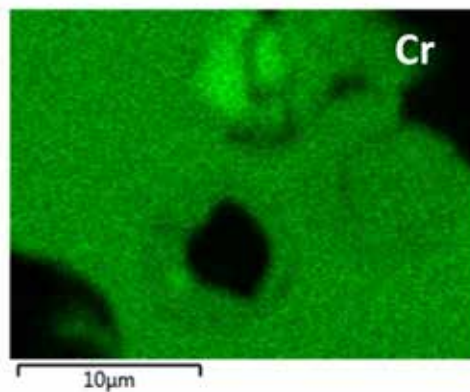
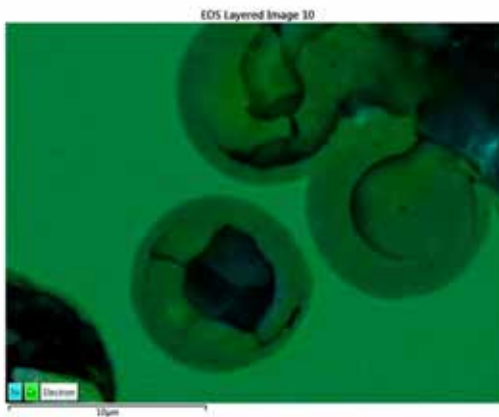
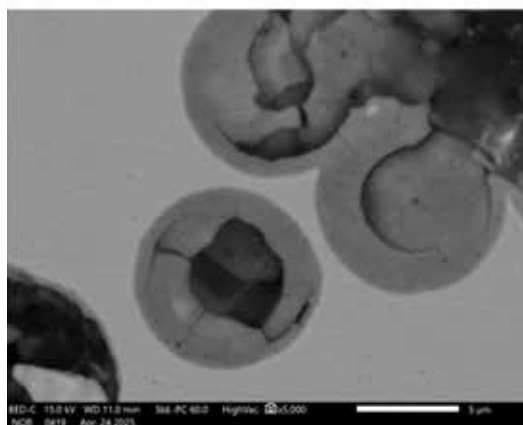
Slika 9b in 9c: Debelina Ni-prevleke je cca 9 μm. Na področju, kjer so korozijske poškodbe Ni-prevleke ni več.



Slika 9d: Nad Ni-prevleko je tanjša plast Cr-prevleke.



Slika 9e: SEM posnetek korozijskih poškodb na površini pipe. Poškodbe so kroglasto simetrične, posamezne poškodbe se med seboj združujejo v linijo poškodb.



Slika 9f: SEM fotografija in EDS »mapping« analiza.

Preiskava poškodovane površine pipe na SEM mikroskopu je pokazale, da so poškodbe, gledano iz vrha okrogle in tvorijo koncentrične kroge z ostankom (opna) Cr-prevleke z luknjico – perforacijo na sredini ter spodaj (vidno pri gledanju v načinu z odbitimi elektron) večje okroglo območje z manjkajočo prevleko niklja. Iz morfologije površine sklepamo, da preko drobne poškodbe Cr-prevleke (drobna črna pika nanometerske velikosti na sredini skrajno desnega kroga na SEM posnetku zgoraj), ki je bodisi poroznost v prevleki ali pa kaka druga nepravilnost, v notranjost pride voda skupaj z drugimi nečistočami, ki lahko vsebujejo snovi, nevarne za potek korozije. Na tem mestu se pričneta pod prevleko kroma odtapljati nikljeva prevleka in medenina, topni korozijski produkti pa se sproti spirajo. Glede na obliko in potek lise na površini pipe je zelo možno, da je pipa dalj časa puščala in je po površini tekel tanek sloj vode. Ko skorodira dovolj velika površina Ni-prevleke in medenine pod Cr-prevleko, se le ta zaradi lastne teže udre in sčasoma z vodo spere stran.

Zaključek:

Na pipi so vidne korozijske poškodbe prevleke, ki je sestavljena iz Ni podsloja, ter Cr končnega sloja. Cr-sloj prevleko ščiti proti koroziji, Ni sloj pa je med Cr-prevleko ter medenino dodan zaradi izboljšanja oprijema. Zelo verjetno je, da je glavni vzrok korozijskih poškodb na površini bilo dalj časa prisotno minimalno puščanje vode, pri čemer je določen del površine bil nenehno prekrit s tankim slojem vode. Voda v kombinaciji z ostanki čistil je čez drobne nepravilnosti v Cr prevleki korozijsko delovala na Ni-podprevleko ter medenino pri čemer so se sčasoma s tvorile globoke korozijske jamice.

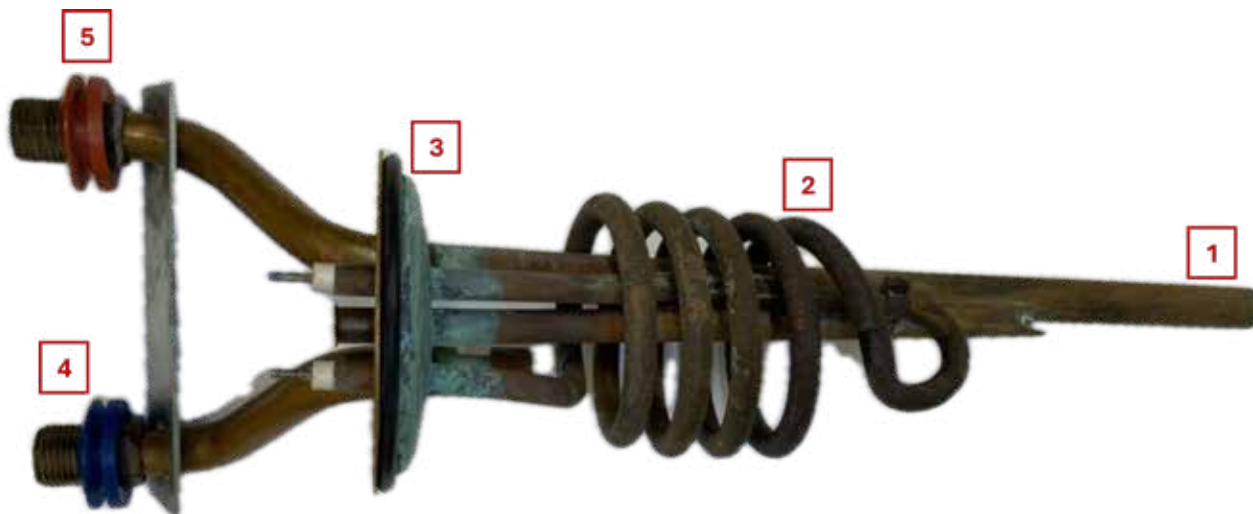
10. Grelnik vode



Uvod in opis problema:

Grelnik vode je star več kot 40 let. Vgrajen je bil na območju Slovenije z mehko vodo. Na vidnih priključkih za toplo (rdeč) in hladno (moder) vodo iz bakra so na notranji strani vidni korozijski produkti zelene barve. Želeli smo preveriti sestavo korozijskih produktov in ugotoviti, ali je zelena barva zaradi prisotnosti kloridov ali karbonatov. Prav tako smo želeli preveriti, ali so korozijski produkti v priključnih ceveh za toplo ali hladno vodo podobni.

Slika 10a: Grelnik vode volumna 10 litrov z bakrenim grelcem.



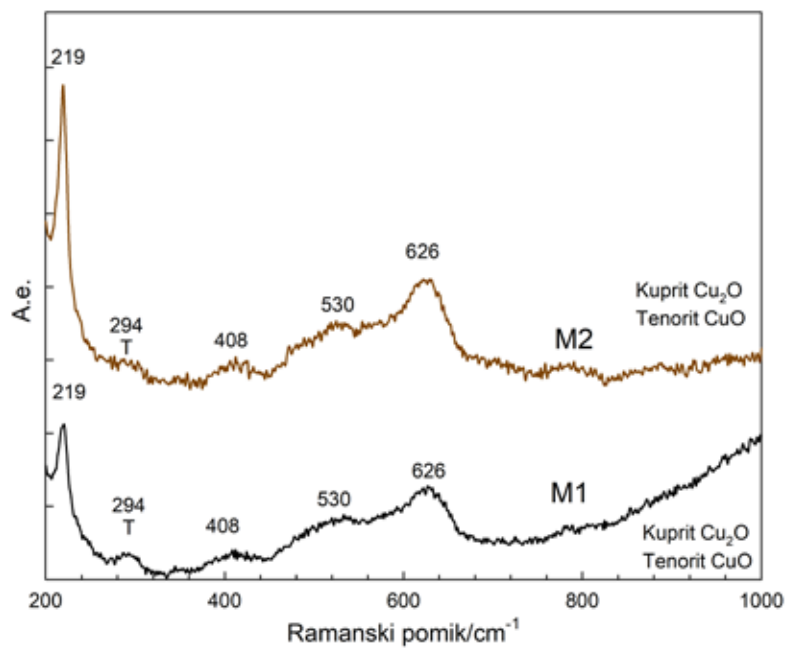
Slika 10b: Bakreni grelec v notranjosti 10 litrskega grelnika vode. Na označenih mestih smo naredili EDS in Ramanske analize.

Tabela 10-1: EDS analiza korozijskih produktov, odvzetih na različnih mestih grelnika v at %

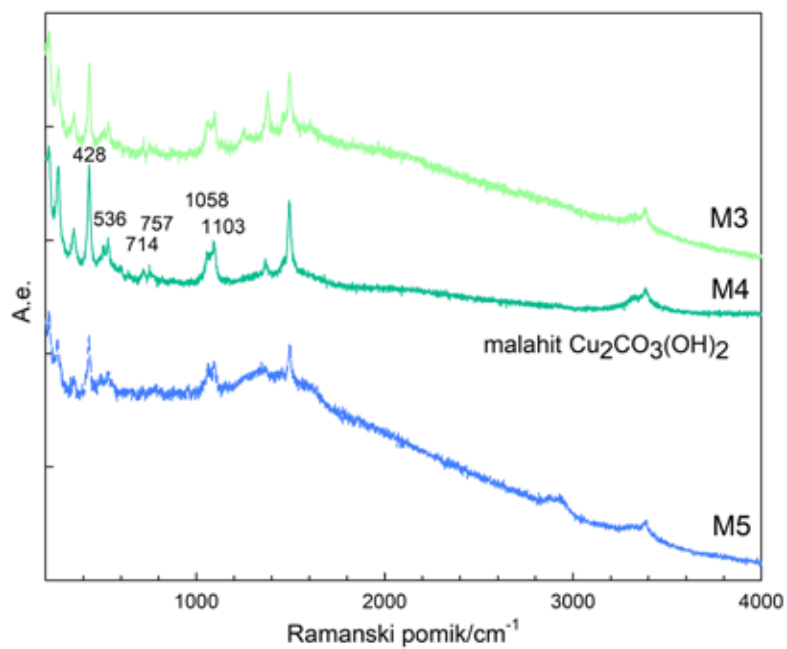
	C	O	Cu	Cl	Ca	Mg	Al	S	Zn
M 1	36,4	45,2	18,3	/	0,14	/	/	/	/
M 2	40,5	27,6	31,7	/	/	/	/	/	/
M 3	23	49	2,97	/	23,3	0,71	0,18	0,69	/
M 4	25,7	54,8	17,7	0,06	/	/	/	/	1,36
M 5	32	50,8	12,7	0,05	0,93	/	/	/	1,54

Iz bakrovih korozijskih produktov se v vodo izločajo tudi bakrovi ioni. Bakrovi ioni in bakrovi korozijski produkti so lahko toksični. V tem primeru so korozijske poškodbe bakra grelca plitve - površinske, skorodirala je zelo majhna količina bakra.

Na označenih mestih M1, M2, M3 M4 in M5 smo na odvzetih vzorcih naredili tudi Ramansko analizo. Rezultati so prikazani na spodnjih spektrih (Slika 10c).



Slika 10c: Ramanski spektri na mestu 1 in 2, korozijski produkti so bakrov(i) in (II) oksid.



Slika 10d: Ramanski spektri na mestu 3,4 in 5, korozijski produkti so bakrov hidroksikarbonat, malahit.

Zaključek:

Potrditev prisotnosti malahita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) brez prisotnosti dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ali drugih običajnih karbonatov (kot sta kalcit ali aragonit) v bojlerju za pripravo tople vode odpira več možnih kemijskih in fizikalnih razlag.

Malahit je bakrov korozijski produkt, ki se tvori na bakreni površini v rahlo alkalni in s kisikom nasičeni vodovodni vodi. V zelo trdih vodah z visoko trdoto se običajno tvori vodni kamen, v primeru vode iz priobalnega območja, pa je prevladujoča reakcija korozija bakra. Ta vodi do tvorbe kuprita in tenorita, ki sta stabilna oksida, ter zeleno obarvanih produktov. Z Ramansko analizo potrjeni produkt zelene barve je malahit $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, ki se tvori tako na gornjem delu bakrenega grelca kot na priključkih za toplo in hladno vodo. Če je v vodi malo kalcija in magnezija ali se vodni kamen sploh ne nalaga, je malahit lahko prevladujoča korozijski produkt, ne pa zaradi običajnega nalaganja vodnega kamna.

Čeprav je baker nujno potreben hranilni element, lahko prekomeren vnos preko pitne vode povzroči prebavne težave, kot sta slabost in bruhanje, pri občutljivih skupinah pa lahko kronična izpostavljenost vodi do poškodb jeter. Pravilnik o pitni vodi (Uradni list RS, št. 61/2023) določa, da je varna meja vsebnosti bakra v pitni vodi 2,0 mg/L.

Laboratorij za kovine, korozijo in protikorozijsko zaščito
v Oddelku za materiale na Zavodu za gradbeništvo Slovenije
deluje na različnih področjih. V okviru javne službe smo
dejavni predvsem raziskovalno - vključujemo se v raziskovalne
aktivnosti v okviru stabilnega financiranja, vodimo in
sodelujemo v nacionalnih in mednarodnih projektih.

Pomemben del našega delovanja predstavljajo tudi tržne
dejavnosti, kot so certificiranje proizvodov in izvajanje
specialnih preskušanj. Pogosto se srečujemo z nestandardnimi
izzivi, ki zahtevajo tesno sodelovanje med tehničnimi
strokovnjaki in raziskovalci.

Tudi ta publikacija, Korozijski atlas, je rezultat takega
sodelovanja – preplet strokovnega znanja, raziskovalnega
pristopa, s katerim želimo pritegniti radovedne bralce,
ki si željo poglobljenega razumevanja tematike.



Kontakt:
kovine@zag.si

The logo for ZAG, consisting of the letters 'ZAG' in a bold, white, sans-serif font, set against a dark blue square background.

**ZAVOD ZA
GRADBENIŠTVO
SLOVENIJE**

SLOVENIAN
NATIONAL BUILDING
AND CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE