

KONSTRUKCIJSKO – TEHNOLOŠKE MJERE I SMANJENJE KOROZIJSKIH OŠTEĆENJA

DESIGN – TECHNOLOGICAL MEASURES AND REDUCTION OF CORROSION FAILURES

Ivan JURAGA¹, Vinko ŠIMUNOVIĆ², Vjenceslav PARAT³, Ivan STOJANOVIĆ⁴

Ključne riječi: korozija, smanjenje korozijskih oštećenja, konstrukcijsko – tehnološke mjere

Key words: corrosion, reduction of corrosion failures, design – technological measures

Sažetak: U radu je prikazana važnost pravilnog oblikovanja strojarских konstrukcija ili njihovih dijelova s ciljem smanjenja opasnosti od korozijskih oštećenja koja svoj uzrok mogu imati u neprimjerenom konstrukcijskom rješenju. Nerijetko su posljedice konstrukcijskih rješenja koja pogoduju iniciranju korozijskih procesa nepredvidivo visoki troškovi održavanja ili pak potpuna neupotrebljivost konstrukcije. Kroz brojne primjere neodgovarajućih konstrukcijskih rješenja koja su dovela do pojave korozije na različitim konstrukcijama u eksploataciji, kao i kroz shematske prikaze konstrukcijskih detalja s pomoću kojih se može izbjeći ili u velikoj mjeri smanjiti intenzitet korozijskog oštećivanja prikazani su slučajevi pojave i izbjegavanja korozije u procjepu, galvanske, erozijske i napetosne korozije. Za navedene pojavne korozijske oblike izneseni su osnovni čimbenici koji uzrokuju pokretanje korozijskog procesa te su prikazane neke od konstrukcijsko – tehnoloških mjera onemogućivanja ili znatnog usporavanja pokretanja korozijskih procesa.

Abstract: The paper presents importance of proper design of engineering structures or their parts in purpose of risk reduction from corrosion failures which their cause can have in unsuitable design solution. Rarely, consequences of design solutions which serve to initiate corrosion process are unpredictable high maintenance costs or unavailability of construction. Through many examples of improperly design solutions which led to corrosion on different construction in exploitation, and through schematic version of design details with which it can be avoided or in large measure reduced intensity of corrosion the paper present examples of appearance and avoidance of crevice corrosion, galvanic corrosion, erosion and stress corrosion. For specified types of corrosion, basic factors which cause corrosion process to start and some of design - technological measures of preventing or retarding the starting of corrosion processes have been brought up.

¹ Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zaštitu materijala, Zagreb

² Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zaštitu materijala, Zagreb

³ ZM-Inženjering, Veslačka 2, Zagreb

⁴ Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zaštitu materijala, Zagreb

1. UVOD

Korozijski problemi i s njima povezana neželjena razaranja raznih konstrukcija najčešće se ne mogu u potpunosti egzaktno predvidjeti. Međutim, pravilnim odabirom konstrukcijskih materijala, oblikovanjem konstrukcije te ispravnim odabirom sustava zaštite, moguće je usporiti korozijske procese ili ih čak spriječiti.

Korozija kao nepoželjno trošenje materijala može se klasificirati na više načina, npr. prema mehanizmu procesa, mediju, vrsti postrojenja i geometriji korozijskog razaranja. Temeljna podjela je prema mehanizmu procesa, i to na kemijsku i elektrokemijsku koroziju. No vrlo često korozijske se pojave klasificiraju i po raspodjeli na površini materijala tj. po geometriji korozijskog razaranja, mjestu i uzroku nastajanja, tako da imamo: opću koroziju, koroziju u procjepu, rupičastu ili jamičastu koroziju, galvansku koroziju, erozijsku koroziju, napetosnu koroziju, interkristalnu koroziju i selektivnu koroziju.

Odabir i oblikovanje konstrukcijskih materijala, počevši od konstruiranja pa do izrade pojedinih dijelova i složenih proizvoda, mjerodavno je za djelovanje unutrašnjih čimbenika korozijskog oštećivanja. Pravilnim oblikovanjem konstrukcije i odabirom materijala, možemo reći da smo napravili prvi ali vrlo važan korak u njenoj zaštiti od korozije. Prema tome o oblikovanju uveliko ovise vrsta, oblik, intenzivnost i tok korozije, i to pogotovo ako ono djeluje i na vanjske čimbenike oštećivanja, što je u praksi čest slučaj.

Značajno je istaknuti važnost zajedničkog rada konstruktora, tehnologa i stručnjaka za koroziju tijekom procesa projektiranja radi postizanja optimalne korozijske otpornosti konstrukcije pri čemu je preporučljivo pridržavati se sljedećih smjernica:

1. Zavareni spojevi, ukoliko su ispravno izvedeni, imaju prvenstvo pred vijčanim spojevima ili zakovičnim koji često mogu dovesti do pojave korozije u procjepu.
2. Oblikovati konstrukciju tako da se na njoj ne zadržava voda, osigurati njezino otjecanje.
3. Kao konstrukcijske materijale treba koristiti metale i nemetale koji su korozijski što otporniji u predviđenim uvjetima. Materijali za brtvila, pakiranje, toplinsku, električnu i zvučnu izolaciju ne smiju sadržavati agresivne sastojke i ne smiju apsorbirati vodu.
4. Spremnici, rezervoari i sl. moraju se tako konstruirati da se lako prazne i čiste.
5. Projektnim rješenjima osigurati jednostavno, učinkovito i jeftino održavanje.
6. Osigurati da se pojedine komponente sustava kod kojih se očekuje brza pojava korozije mogu brzo i jednostavno zamijeniti.
7. Izbjegavati mehanička naprezanja - s ciljem smanjenja opasnosti od napetosne korozije.
8. Izbjegavati oštre zavoje u cjevovodnim sistemima radi smanjenja opasnosti od erozijske korozije.
9. Izbjegavati dodir različitih metala udaljenih u galvanskom nizu - radi sprečavanja galvanske korozije.
10. Izbjegavati lokalno intenzivno zagrijavanje - korozija se izuzetno ubrzava s porastom temperature, a i isparavanjem se znatno uvećava koncentracija medija.
11. Kadgod je to moguće izbjegavati kontakt s agresivnim česticama.
12. Najopćenitije pravilo je da se svaka heterogenost mora izbjegavati (lokalna naprezanja, temperaturne razlike, mjesta gdje se vlaga nakuplja, i sl.).

Sve navedene konstrukcijske i tehnološke mjere mogu znatno usporiti korozijski proces i produžiti vijek trajanja konstrukcije i opreme, te osigurati njihovu projektiranu korozijsku postojanost [1,2].

U radu su obrađeni pojedini korozijski oblici na čije sprečavanje se vrlo često može utjecati oblikovanjem konstrukcije.

2. OBLIKOVANJE KONSTRUKCIJE I POJAVNI KOROZIJSKI OBLICI

2.1. Korozija u procjepu

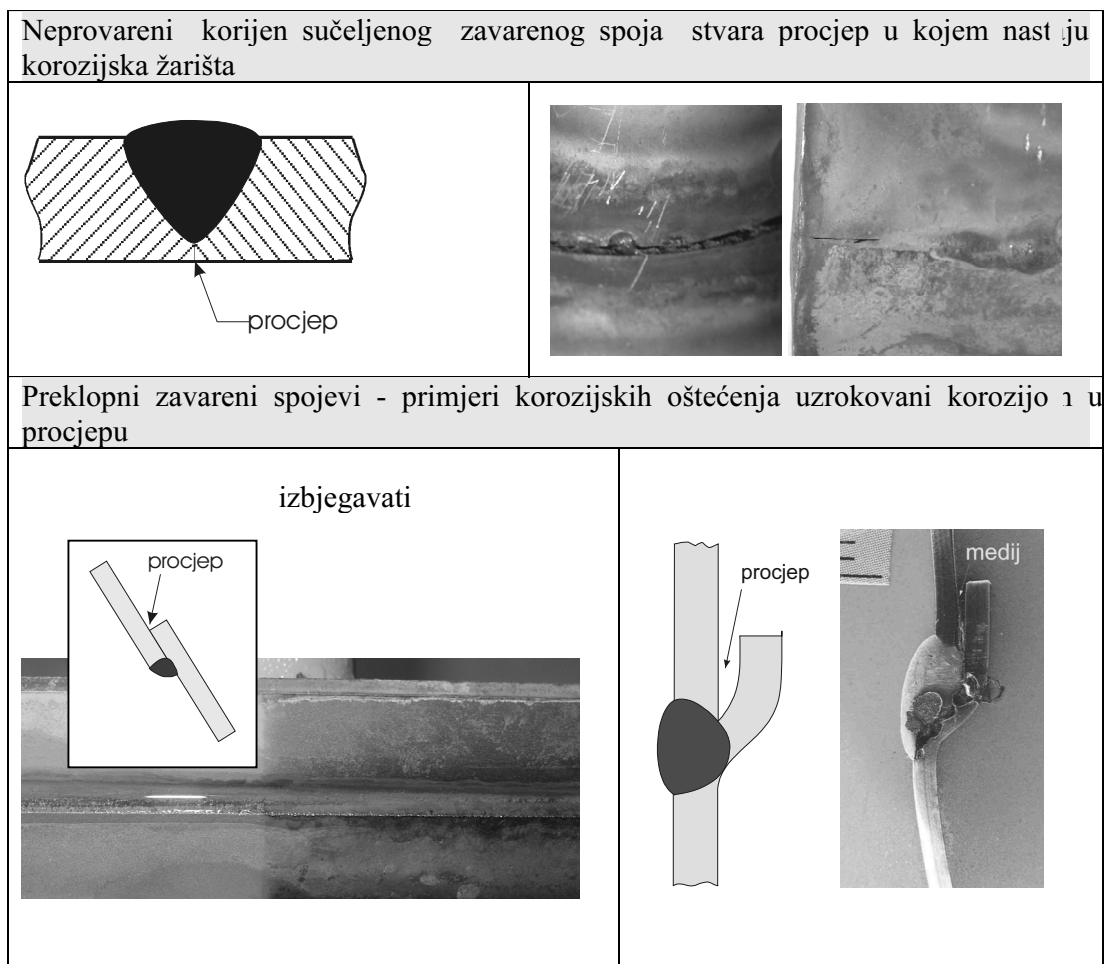
Javlja se u blizini pukotina, procjepa ili razmaka između površina. Može biti inicirana korozijskim medijem u toj pukotini makar je okolna površina suha. Ako je strojni dio čitav u otopini, onda se kao rezultat elektrokemijske reakcije u unutarnjem dijelu pukotine mijenjaju uvjeti, povećava se kiselost otopine, smanjuje se pH vrijednost, povećava se koncentracija agresivnih čimbenika. Unutarnji dio procjepa postaje anodno područje dok se katodna reakcija odvija na vanjskom dijelu procjepa.

Pojava ovog oblika korozije naročito je povezana s oblikovanjem konstrukcije i tehnologijom izrade. Loša konstrukcijsko-tehnološka rješenja najčešći su uzrok iniciranja ovog korozijskog oblika. Korozija u procjepu javlja se i ispod naslaga, nečistoća, na mjestima gdje se dugotrajno zadržava agresivni medij, odnosno tamo gdje je lošim konstrukcijskim rješenjima to omogućeno.

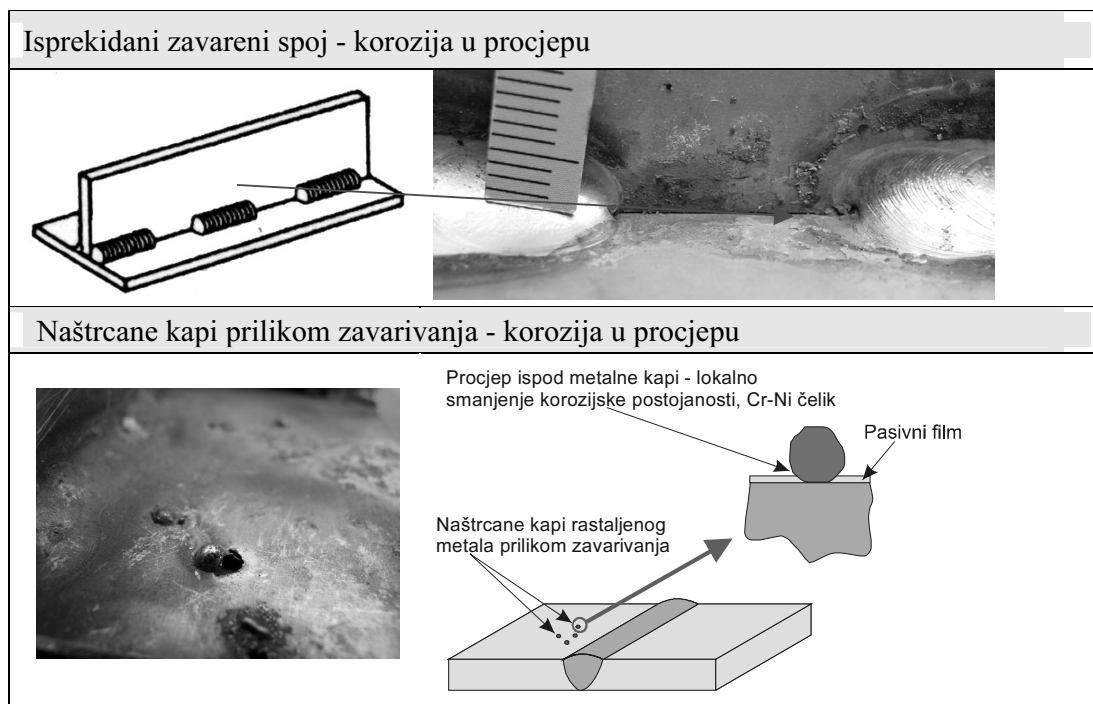
2.2. Konstrukcijsko-tehnološke mjere za sprečavanje korozije u procjepu

Oblikovanje zavarenih spojeva

Prilikom izrade zavarenih konstrukcija naročito je važno pripaziti da se izvrši pravilna priprema i odabir oblika spoja i da se samo zavarivanje izvede bez pogreške. Loše oblikovani i odabrani spoj, pogreške u zavaru, neprovareni korijen zavora, naštrcane metalne kapljice, krivi odabir podloška za zavarivanje, neki su preduvjeti za pojavu korozije u procjepu. U prikazu 1. dani su primjeri korozijskih oštećenja uzrokovani lošom izvedbom i krivim odabirom vrste zavarenog spoja (preklopni i isprekidani). Sa stajališta korozijske postojanosti potrebno je dati prednost kontinuiranim i pravilno protaljenim (posebno u korijenskom dijelu) sučeljenim zavarenim spojevima nad isprekidanim i preklopnim spojevima.



Prikaz 1. Primjeri korozijskih oštećenja zavarenih spojeva uslijed korozije u procjepu.

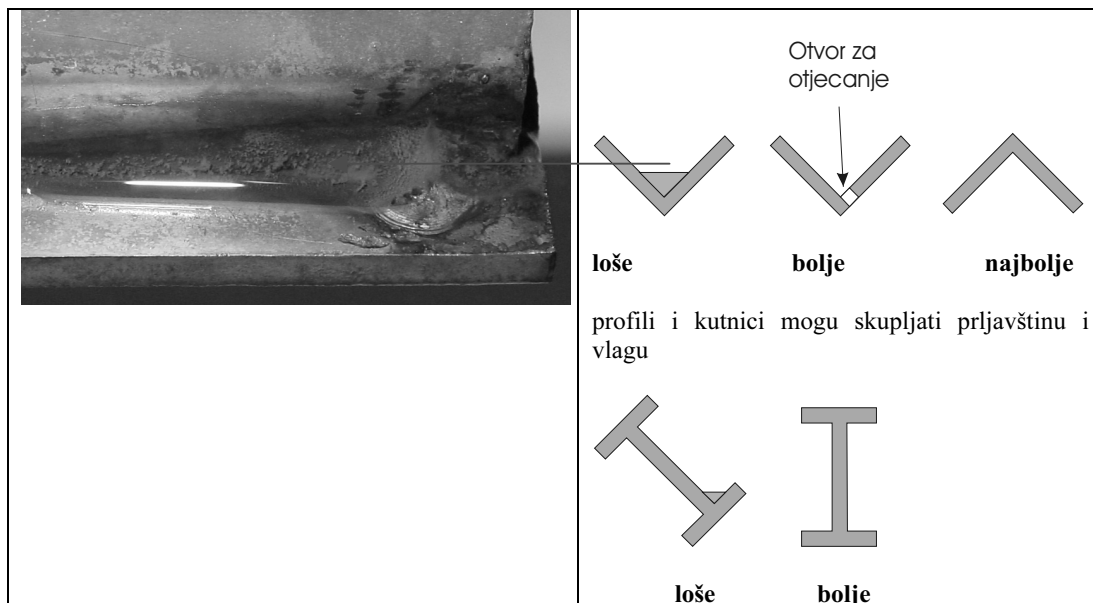


Prikaz 1. Primjeri korozijskih oštećenja zavarenih spojeva uslijed korozije u procjepu
 (nastavak)

Osiguravanje otjecanja

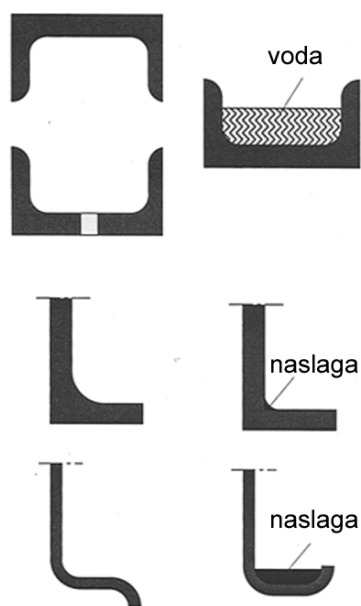
Znatne korozijske probleme na konstrukciji najčešće uzrokuje voda i njezino nakupljanje i zadržavanje. Također, jednako su opasne i naslage ispod kojih se zadržava vlaga i stvaraju se uvjeti identični uvjetima korozije u procjepu. Stoga, radi korozijske otpornosti i trajnosti konstrukcije, potrebno je oblikovati konstrukciju tako da se na njoj ne zadržava voda, odnosno nužno je osigurati njezino otjecanje. Ako koristimo razne čelične profile, potrebno ih je postaviti i orijentirati tako da se na njima ne može zadržavati voda, a ako je to iz nekih razloga neizvedivo potrebno je izbušiti otvore za otjecanje, Slika 1.

Neka konstrukcijska rješenja za sprečavanje nastanka vodenih džepova i stvaranja naslaga prikazana su na Slici 2. Potrebno je izbjegavati oštre uglove jer su oni, radi svog oblika, pogodno mjesto za stvaranje naslaga. Oštre rubove na takvim mjestima potrebno je izvesti sa zaobljenjem.



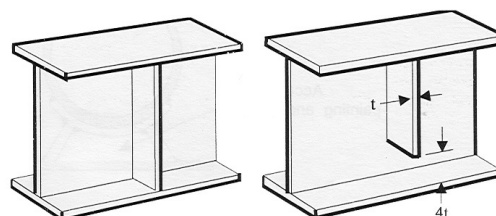
Slika 1. Oblikovanje i položaj raznih profila

PREPORUČLJIVO NIJE PREPORUČLJIVO



Slika 2. Sprečavanje nastanka vodenih džepova i stvaranja naslaga [3]

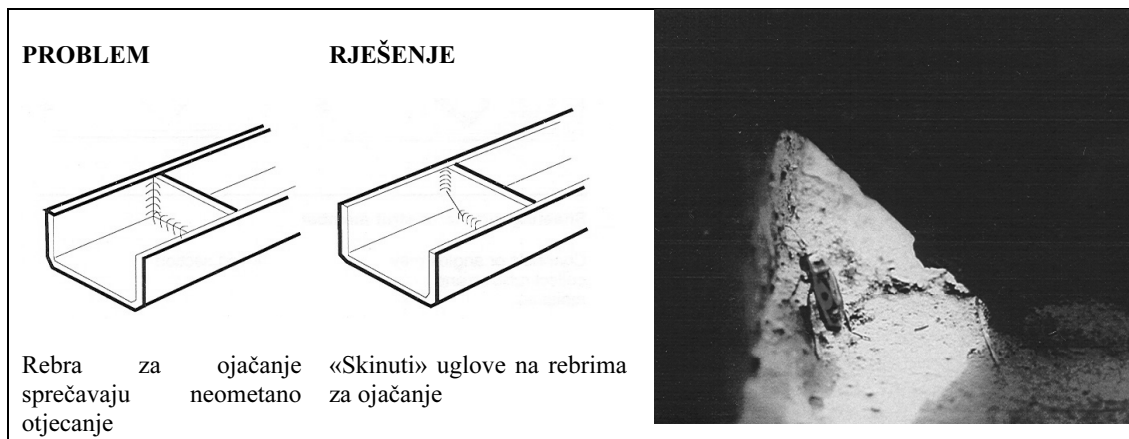
REŠETKE MOSTOVA, NOSIVE GREDE ZA UREĐAJE I OPREMU



Međuukrućenja na Skratiti ukrutu blizu pločastoj rešetci mogu donjeg pojasa (bolje i oblikovati džepove u ekonomičnije) kojima se skupljaju nečistoće i vlaga

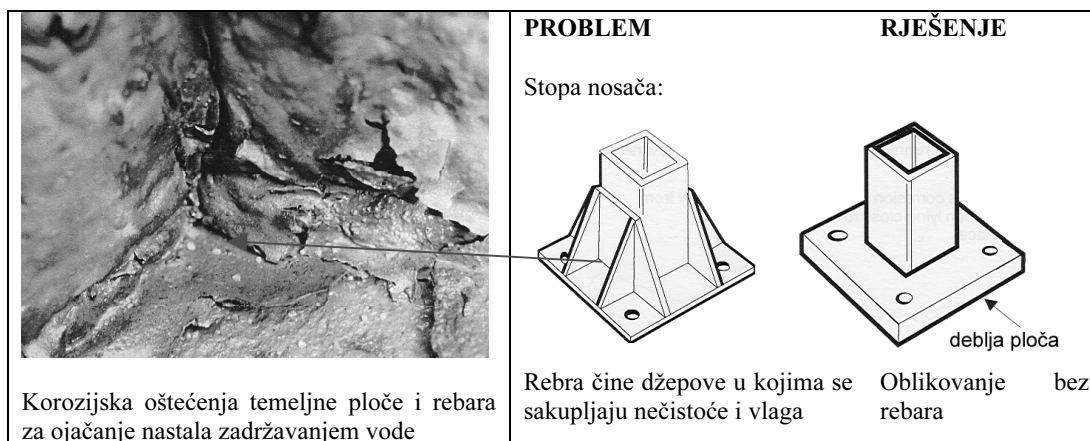
Slika 3. Oblikovanje ukruta radi osiguravanja otjecanja [4]

Prilikom izrade raznih konstrukcija često su koriste metalni profili kao osnovni konstrukcijski elementi. U nekim slučajevima, da bi povećali njihovu čvrstoću i nosivost, na profile se zavaruju razne ukrute. Sa stajališta korozijske zaštite ukrute mogu stvoriti razne korozijske probleme i inicirati početak korozije, ako nisu pravilno oblikovane. Mogu biti prepreka za otjecanje vode i na taj način stvarati mjesta na kojim se nakupljaju nečistoće i naslage. Stoga konstruktor mora osigurati rješenja koja omogućuju otjecanje vode kada koristimo razne ukrute, kako je prikazano na slikama 3. i 4.



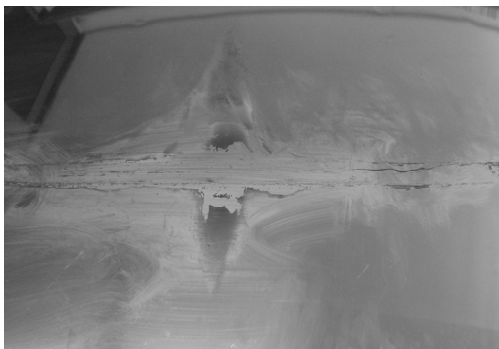
Slika 4. Odrezani ugao rebra za ojačanje radi otjecanja [4,5].

Pogrešno oblikovana stopa nosača, s korozijskog stajališta, može stvoriti znatne korozijske probleme, Slika 5. Na Slici 5. je prikazano konstrukcijsko rješenje kada se koriste rebra za ojačavanje, što je nepovoljno s obzirom na koroziju. Rebra čine džepove u kojima se mogu skupljati nečistoće i zadržavati vlaga. Na istoj slici je prikazana i dobro oblikovana stopa nosača, kod koje se umjesto rebara za ojačavanje koristi deblja ploča. Na taj način je izbjegnuta korozija u procjepu.

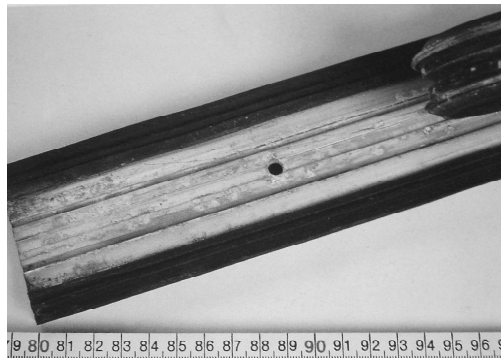


Slika 5. Izbjegavati rebra za ojačanje ako postoji drugo rješenje [4,5].

Voda i vlaga se također mogu zadržavati ispod materijala koji apsorbiraju vodu, raznih traka koje se koriste za pakiranje ili brtvljenje i na taj način inicirati koroziju u procjepu. Na Slici 6. je prikazano korozijsko oštećenje lima od nehrđajućeg čelika nastalo zadržavanjem vlage i vode ispod trake za pakiranje tijekom skladištenja. Primjer korozije u procjepu nastale prodoranjem i zadržavanjem vode ispod gumene trake za brtvljenje prikazan je na Slici 7. Korozijska oštećenja vidljiva su u područjima oko gumene trake.



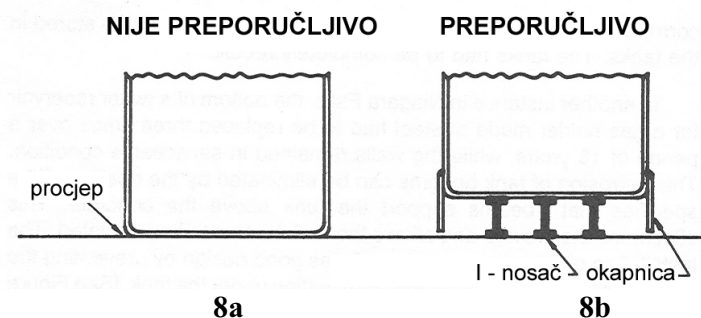
Slika 6. Korozijsko oštećenje lima od nehrđajućeg čelika nastalo u područjima nalijeganja trake za pakiranje.



Slika 7. Korozijska oštećenja aluminijskog okvira prozora nastala prodiranjem i zadržavanjem vode ispod gumene trake [1].

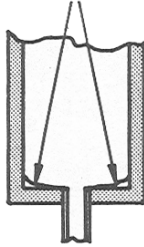
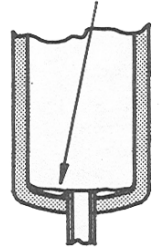
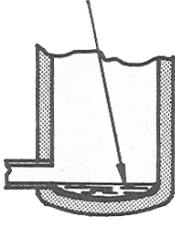
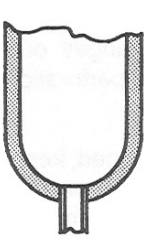
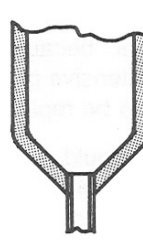
Oblikovanje temelja spremnika i postavljanje otvora za otjecanje

Prilikom postavljanja horizontalnih spremnika na podlogu stvara se procjep između spremnika i podloge, kao što je prikazano na slici 8a. U tom dijelu se postavlja tzv. podložni prsten, koji je nerijetko sklon vrlo ozbiljnim korozijskim oštećenjima. Za izbjegavanje nastanka korozije u procjepu, potrebno je konstruirati temelje spremnika kako je prikazano na Slici 8.b.



Slika 8. Oblikovanje temelja spremnika [2].

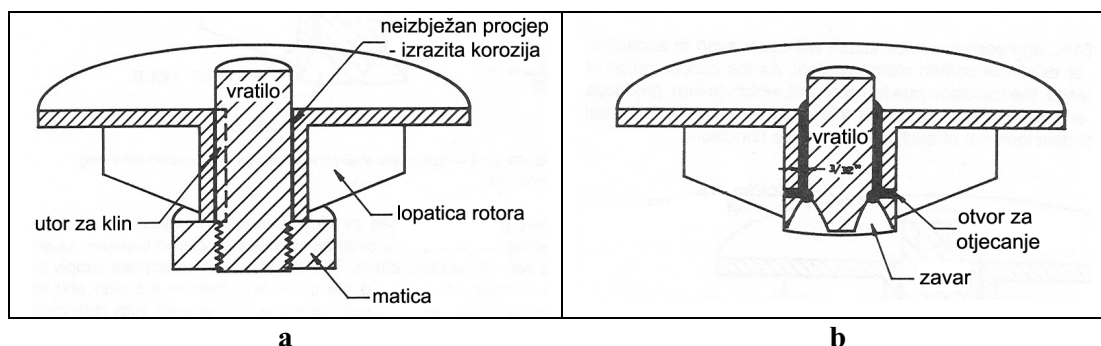
Spremnici za tekućine trebaju biti tako oblikovani da se bez većih teškoća mogu potpuno isprazniti. Treba izbjegavati oštre uglove u kojima se mogu zadržavati naslage. Također je naročito važno pravilno postaviti otvor za istjecanje. Na Slici 9. prikazani su primjeri različitih konstrukcijskih rješenja [2].

LOŠE KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE			DOBRO	NAJBOLJE
naslage	tekućina ne može otjecati			
				

Slika 9. Oblikovanje spremnika za tekućine i postavljanje otvora za istjecanje [2].

Sprečavanje korozije otvaranjem procjepa

Ponekad je prilikom izrade nekih strojnih dijelova nemoguće eliminirati procjep. U tom slučaju potrebno je "otvoriti" procjep, odnosno ostaviti dovoljan razmak između dijelova da agresivni mediji mogu slobodno otjecati, kako je prikazano na slici 10b. Slikom 10a. prikazano je nepovoljno konstrukcijsko rješenje istog rotora od Cr-Ni čelika kod kojeg je u svega nekoliko tjedana došlo do korozijskog razaranja zbog zadržavanja agresivnog medija u području procjepa između glavine rotora i vratila.

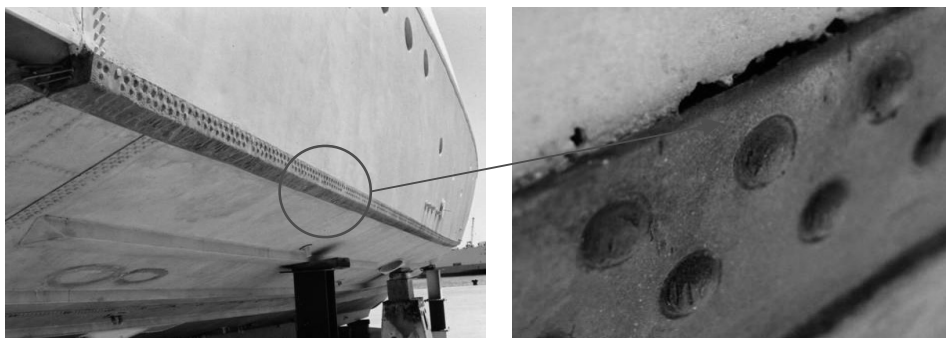


Slika 10. a) Shematski prikaz konstrukcije rotora koji se pokazao u praksi neiskoristiv, radi korozije u procjepu, b) Shematski prikaz konstrukcije rotora s razmakom između vratila i glavine rotora, koji u praksi ima dugi vijek trajanja [2]

2.3. Galvanska korozija (kontaktne ili bimetalne)

Pri izradi različitih konstrukcija vrlo često nije uvijek moguće koristiti sve dijelove izrađene od istog konstrukcijskog materijala, a kao što je poznato, postoje općenito više ili manje "plemeniti" materijali, odnosno svaki metal u određenom elektrolitu ima različiti korozijski potencijal. Manje plemeniti metali imaju visoki negativni korozijski potencijal i manje su otporni na koroziju. Ako se u nekom elektrolitu, u kontaktu, nalaze dva metala različitih korozijskih potencijala, više će korodirati materijal s višim korozijskim potencijalom. U tom procesu više otporan materijal je katoda, a manje otporan anoda, koja se brže troši (korodira).

Na slici 11. je prikazana galvanska korozija aluminija koji se nalazio u kontaktu s ugljičnim čelikom u morskoj vodi.



Slika 11. Galvanska korozija aluminijskog trupa broda u kontaktu s ugljičnim čelikom

- Galvanski niz važnijih konstrukcijskih materijala

U galvanskom nizu poredani su metali prema svom korozijskom potencijalu u određenom elektrolitu, najčešće morskoj vodi, tablica 1. Na vrhu galvanskog niza smješteni su aktivni metali s visokim negativnim potencijalom (manje plemeniti, anode), a na dnu galvanskoga niza nalaze se manje aktivni ili pasivni metali (plemenitiji, katode) [3], [4], [5].

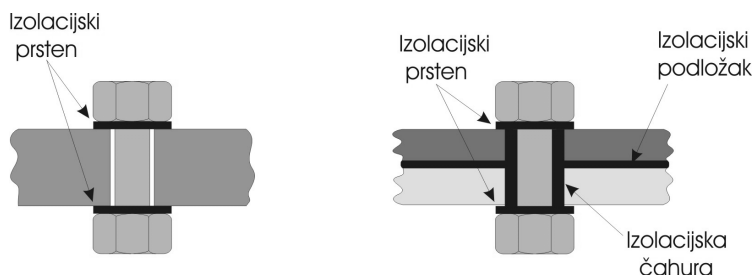
Materijal	Korozijski potencijal E° / V
magnezij	-1,45 do -1,36
magnezijske legure	~ -1,35
cink	-0,83 do -0,76
aluminij s 99% Al	-0,66 do -0,53
duraluminij	~ -0,55
kadmij	-0,53 do -0,51
ugljični čelik	-0,48 do -0,21
sivi lijev	-0,42 do -0,18
SnPb - legura sa 60 % Sn	~ -0,30
olovo	-0,31 do -0,26
kositar	-0,25 do -0,21
austenitni Cr-Ni čelik u aktivnom stanju	~ -0,10
nikl	~ 0,02
mjed sa 60% Cu	0,05 do 0,27
bakar	0,10 do 0,28
CuNi - legura sa 70 % Cu	0,08 do 0,32
krom	~ 0,23
bronca s 88 % Cu, 10 % Sn i 2 % Zn	0,13 do 0,36
srebro	~ 0,30
monel	0,14 do 0,48
titan	~ 0,37
austenitni Cr-Ni čelik u pasivnom stanju	~ 0,60
grafit	~ 0,70
zlato	~ 0,70
platina	~ 0,80

Tablica 1. Galvanski niz važnijih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi [6]

2.4. Konstrukcijsko-tehnološke mjere za sprječavanje galvanske korozije

Izolirati anodu od katode

Ako nije moguće koristiti konstrukcijske materijale istog ili sličnog potencijala ("plemenitosti"), potrebno je spriječiti njihov međusobni kontakt pomoću izolacije. Na taj način sprečavamo galvansku koroziju između dva metala različitih potencijala. Neka od rješenja za odvajanje različitih konstrukcijskih metala prikazana su na slici 13.

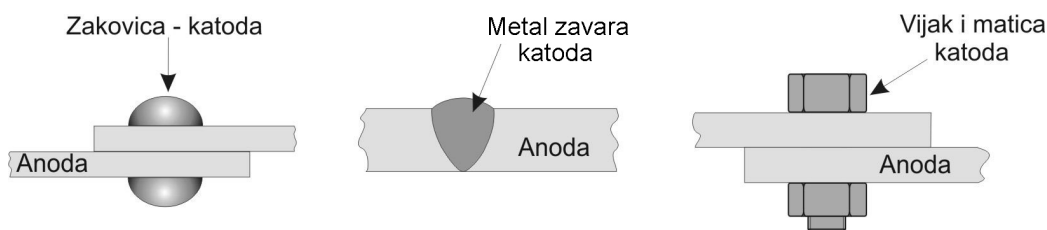


Slika 13. Princip izolacije različitih metala

Kada je izolacija neprimjena

U mnogim eksploatacijskim uvjetima, npr. visoke temperature, izuzetno agresivni mediji, korištenje izolacije često nije izvedivo jer bi bila uništena. U takvim slučajevima treba koristiti plemenitiji metal za spajanje dijelova manje plemenitog metala.

Postoje mnogi primjeri iz prakse u kojima su, na nekoj konstrukciji, dva metala različitog korozijskog potencijala u kontaktu, a da pri tome nije ugrožena korozijska postojanost i vijek trajanja konstrukcije, iako bi se kroz analizu položaja metala u galvanskom nizu ustvrdilo da su ti metali "nespojivi" s korozijskog stajališta. Razlog tome je pravilan omjer anodne i katodne ploštine u galvanskom paru. U galvanskom paru, da bi se izbjegla korozijska oštećenja anode, anodno područje mora biti puno veće od katodnog kako je prikazano na slici 14. u svakom primjeru prikazanog spoja, bilo da se radi o zavarenom, zakovičnom ili vijčanom spoju. Tako se u praksi koriste vijci od nehrđajućeg čelika za spajanje aluminijskih dijelova, dijelovi od mjedi koriste se kod cijevi od ugljičnog čelika, zakovice i vijci od monela kod nelegiranih čeličnih dijelova rotora u pumpama kroz koji protječu jaki elektroliti itd.



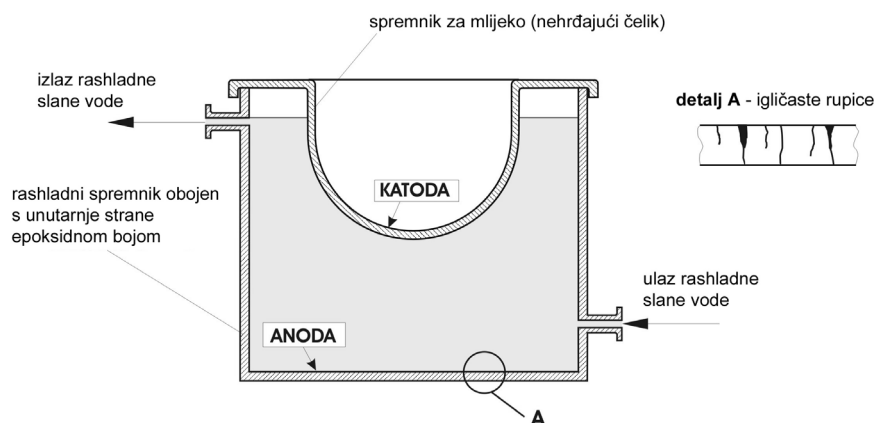
Slika 14. Pravilan omjer katodnih i anodnih ploština pri spajanju materijala.

Korištenje zaštitnih prevlaka radi sprečavanja galvanske korozije

Zaštitne izolacijske prevlake ili boje mogu biti korištene za sprečavanje galvanske korozije između dva različita metala, što katkada može rezultirati poražavajuće s gledišta korozijske zaštite, ako se ne zna za koje područje (anodno ili katodno) upotrijebiti prevlaku i zašto. Primjer takvog korozijskog oštećenja je slučaj galvanske korozije rashladnog spremnika za mlijeko, slika 15. Spremnik za mlijeko izrađen je od nehrđajućeg čelika, dok je spremnik za rashladnu vodu izrađen od ugljičnog čelika. U svojoj nakani da spriječi galvansku koroziju proizvođač je unutrašnju stjenku spremnika za rashladnu vodu (ugljični čelik) obojio epoksidnom bojom. Nakon puštanja u pogon, vrlo brzo, spremnici su počeli curiti na nekim mjestima. Bojanje spremnika za rashladnu vodu, a da pri tom nije obojan i spremnik za

mlijeko, bila je velika pogreška jer se anodno područje drastično smanjilo (sićušne rupice i pore u zaštitnom premazu epoksidne boje zbog loše nanese prevlake), dok je katodno područje ostalo veliko (spremnik za mlijeko). Naravno da bi sa stajališta korozijske zaštite najbolje rješenje bilo izrada oba spremnika od istog materijala, ali ekonomičnije rješenje je bojanje donjeg dijela vanjske strane spremnika za mlijeko, čime je reducirano katodno područje i osiguran vijek trajanja hladnjaka.

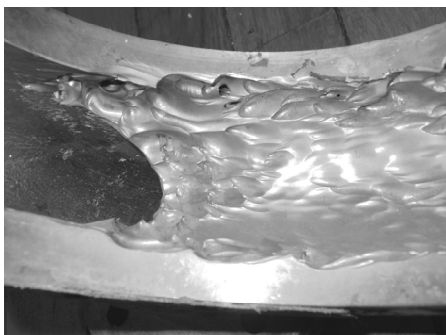
Kada se za izolaciju u galvanskome paru koriste prevlake, nikada se ne smije upotrijebiti prevlaka samo na anodi, ili se prevlači anoda i katoda ili samo katoda [2].



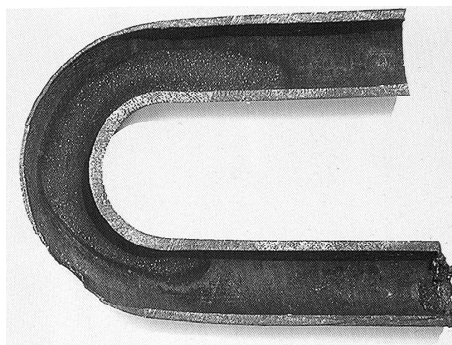
Slika 15. Primjer loše konstrukcije hladnjaka za mlijeko koji je procurio radi korozijskih oštećenja [2]

2.5. Erozijska korozija

Ovaj oblik korozije uključuje istovremeno djelovanje erozije i korozije pri visokim brzinama strujanja fluida. Erozija je trošenje trenjem čvrstog tijela i pokretnog fluida, osobito ako su u njemu dispergirane tvrde čestice. Oštećena površina ima karakteristični sjajni izgled bez korozijskih produkata, slika 16. Kako se povećava brzina strujanja fluida u sustavu, povećavaju se i korozijska oštećenja. Slika 17. prikazuje korozijsko oštećenje dijela unutarnje stijenke cijevi nastalo zbog velike brzine strujanja i nepovoljnog oblika cijevi. Naglo zakrivljenje cjevovoda, odnosno promjena smjera strujanja, izložilo je intenzivno lijevi dio unutarnje stijenke cijevi erozijskom trošenju, smanjujući drastično debljinu stijenke na navedenom mjestu [1,2, 6].



Slika 16. Primjer površine oštećene erozijskom korozijom



Slika 17. Smanjenje debljine stijenke cijevi uzrokovano erozijskom korozijom zbog velike brzine strujanja i nepovoljnog oblika cijevi [1]

2.6. Konstrukcijsko-projektna rješenja za smanjivanje erozijske korozije

Spriječiti stvaranje nanosa i nečistoća u sustavu

Propisati upotrebu filtera na mjestima gdje je moguće očekivati onečišćenje medija. Filtriranjem se uklanjaju dispergirane tvrde čestice iz medija, koje oštećuju stijenke cijevi za vrijeme strujanja, slika 18.

Izbjegavati intermitentni protok. Za vrijeme prekida protoka, nečistoće, nanosi, naslage, mogu se taložiti na stjenkama cijevi (slika 19.) i kasnije, prilikom puštanja sustava u rad, pri relativno malim brzinama strujanja uzrokovati turbulenciju i lokalni porast brzine medija (slika 19.). Kada se mogu očekivati takve pojave, potrebno je projektirati ulaze i otvore za održavanje cjevovoda na mjestima najniže točke sustava tako da se nečistoće, nakupine i sedimenti mogu ukloniti za vrijeme redovitog održavanja [2].



Slika 18. Erozijsko – korozijsko oštećivanje rotora pumpe tvrdim česticama

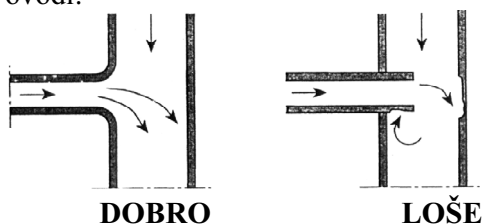


Slika 19. Nanosi nečistoća, kapljice rastaljenog metala zbog prskanja prilikom zavarivanja itd., ubrzavaju erozijsku koroziju [2]

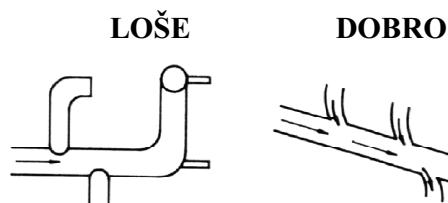
Racionalna konstrukcijska rješenja

Kod cijevnih ogranaka, tzv. "uboda", rubovi ne smiju "stršiti" u struji medija i ometati protok (slika 20.), jer je posljedica takvog oblikovanja turbulencija koja ubrzava erozijsku koroziju. Mjesta grananja sporednih cijevi u odnosu na glavnu bolje je izvesti pod kutom od 30 do 60 stupnjeva, na taj način veća je otpornost erozijskom trošenju nego kod cijevi pod kutom od 90 stupnjeva (slika 21.).

cjevovodi:

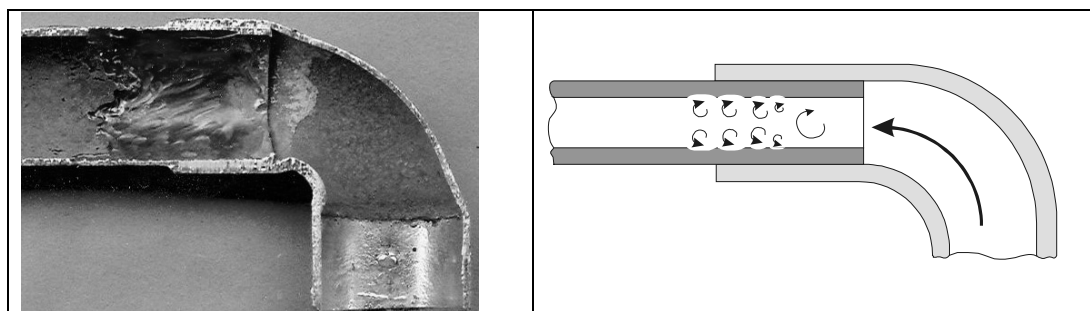


Slika 20. Konstrukcijski detalji s ciljem smanjenja opasnosti od nastanka erozijske korozije [3]

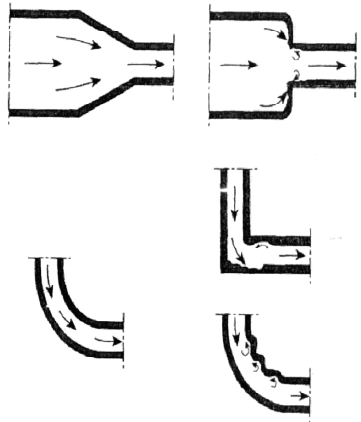
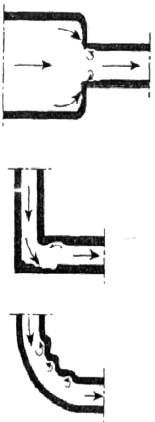
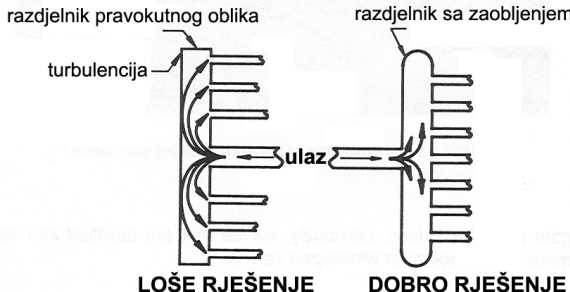


Slika 21. Loš i dobar položaj cijevnih ogranaka [2]

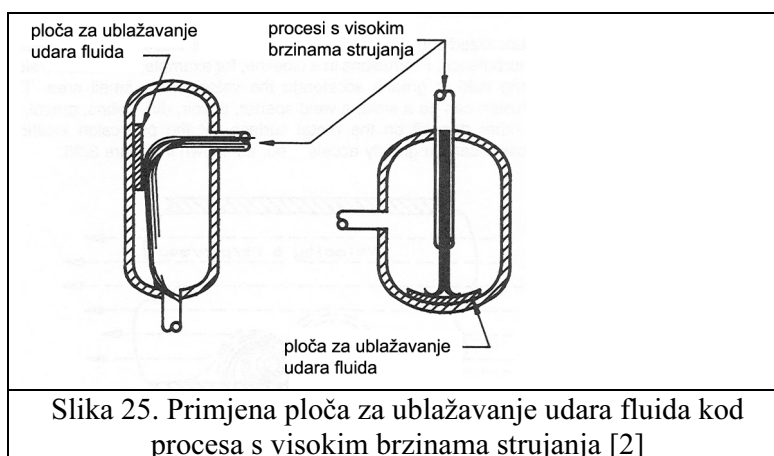
Izbjegavati naglu i skokovitu promjenu presjeka zbog turbulencije, kako je prikazana na slici 22. Promjenu presjeka potrebno je izvesti kontinuirano. Također valja izbjegavati oštre kutove, skretanje cijevi izvesti s blagim zaobljenjem (slika 23.). Na slici 24. prikazano je loše i dobro konstrukcijsko rješenje razdjelnika. Korištenje reverzibilnog protoka i razdjelnika pravokutnog oblika uzrokuje izrazitu turbulenciju i povećano erozijsko trošenje stijenke razdjelnika. Za smanjenje erozijske korozije potrebno je oblikovati razdjelnik sa zaobljenjima i postaviti ulaz na suprotnu stranu razdjelnika od izlaznih cijevi.



Slika 22. Korozijsko oštećenje nastalo radi smanjenja presjeka i velike brzine strujanja

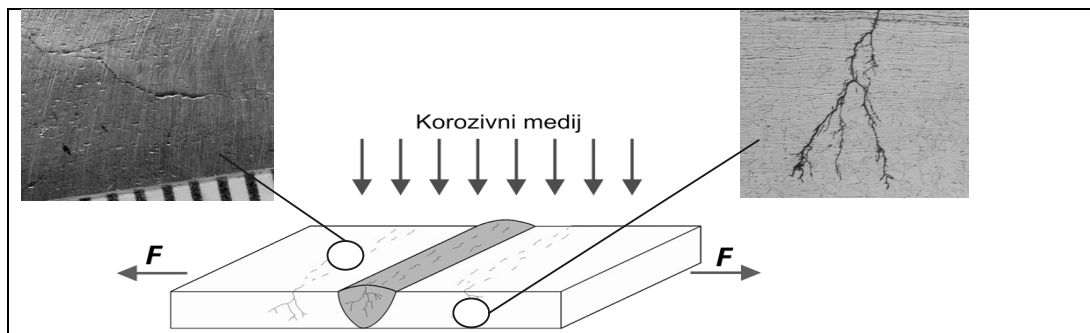
PREPORUČLJIVO	NIJE PREPORUČLJIVO	
		
Slika 23. Sprečavanje pojave erozijske korozije osiguravanjem pravilnog strujanja [3]		Slika 24. Primjer konstrukcijskih rješenja razdjelnika [2]

U procesima s visokim brzinama strujanja potrebno je koristiti zaštitnu ploču za ublažavanje udara fluida. Na mjestima udara fluida mogu se pojaviti intenzivna korozijska oštećenja materijala, stoga je potrebno adekvatno zaštititi navedena područja (slika 25.).



2.7. Napetosna korozija

Napetosna korozija uzrokuje razaranje metala koje nastaje kao posljedica statičkog vlačnog naprezanja dijelova konstrukcije u korozivnoj agresivnoj sredini pri povišenoj temperaturi. U slučaju dinamičkih opterećenja dolazi do loma metala zbog korozijskog umora. Lom (raspućavanje) materijala pod uvjetima trajnog vlačnog naprezanja u korozivnoj sredini naziva se napetosno korozivno raspućavanje, slika 26.



Slika 26. Shematski prikaz napetosne korozije u području zavarenog spoja od Cr-Ni čelika

Napetosna korozija je vrlo složena pojava podložna utjecajima brojnih čimbenika, a napreduje transkristalno ili interkristalno. Ovaj tip korozije nastupit će najčešće na hladno deformiranim lokalitetima, jer tamo zaostaju naprezanja, ili u okolini zavarenih spojeva gdje su veća zaostala naprezanja i strukturne promjene.

Napetosna korozija se gotovo uvijek javlja kod legura, a čisti metali iako nisu potpuno imuni, rijetko pucaju uslijed napetosne korozije. Ovom tipu korozije podložni su nehrđajući austenitni i martenzitni čelici, dok feritni nisu.

Austenitni Cr-Ni čelici posebno su osjetljivi na ovaj tip korozije. U slučaju napetosne korozije kod austenitnih čelika pukotine su najčešće transkristalne (direktno se šire kroz kristal). Ovaj tip korozije se javlja ako su ispunjena sljedeća tri uvjeta:

- prisutnost vlačne napetosti uzrokovane zaostalim ili radnim naprežanjima,
- prisutnost klorida ili kisika u mediju,
- minimalna temperatura od 60°C ispod koje se općenito ne pojavljuje napetosna korozija (osim u izrazito kiseloj otopini) [1].

Napetosna korozija problematična je za predviđanje jer prije pojave pukotina na konstrukciji nema nikakvih naznaka po kojima bi mogli naslutiti njeno iniciranje, pa su otkazi koji nastaju zbog ove vrste korozije neočekivani i nerijetko uzrokuju visoke troškove. Napetosna korozija predstavlja veliki problem u petrokemijskoj industriji.

2.8. Konstrukcijsko-projektna rješenja za sprječavanje napetosne korozije

Smanjenje zaostalih naprežanja i napetosti

Zaostala naprežanja prisutna zbog tehnologije izrade (npr. zavarivanje, naknadna hladna obrada) i lokalna naprežanja zbog krutosti i oblika konstrukcije temeljni su preduvjet za iniciranje napetosne korozije. Konstruktor mora naročito posvetiti pozornost takvim mjestima visokih naprežanja, zbog napetosne korozije, i po mogućnosti eliminirati ih gdje je to praktički izvedivo. Naknadna hladna obrada austenitnih nehrđajućih čelika uzrokuje ekstremno visoka lokalna naprežanja i u određenim agresivnim uvjetima eksploatacije može doći do vrlo razornih korozijskih oštećenja. Na slici 27. prikazan je primjer napetosne

korozije cijevi od nehrđajućeg austenitnog čelika kvalitete AISI 304 koja se nalazila u ugrijanom kloridnom mediju. Vidljivo je kako je desni kraj cijevi, naknadno hladno obrađen, zadobio teške pukotine uzrokovane napetosnom korozijom, dok je lijevi kraj cijevi, žareni, relativno neoštećen. No treba naglasiti da je moguća pojava napetosne korozije i u žarenim cijevima ako se cijev plastično deformira nakon žarenja [2].

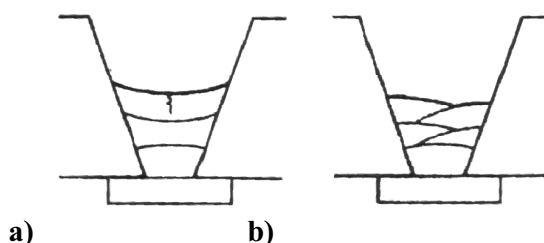


Slika 27. Pukotine uslijed napetosne korozije hladno obrađenog kraja cijevi [2]

Uslijed niske toplinske vodljivosti i visokog koeficijenta toplinskog istezanja austenitnih nehrđajućih čelika, moguća su opasna zaostala naprezanja u ovim materijalima u području zavarenih spojeva, naročito kod sučeljenih zavarenih spojeva. Uslijed izlaganja agresivnom mediju koji sadrži kloride, pukotine napetosne korozije mogu se pojaviti, najčešće, u zoni utjecaja topline (ZUT) zavarenog spoja. Oblik zavora također je povezan sa zaostalim napreznjima i napetostima. Zavar "udubljenog" oblika ima veća površinska vlačna napreznja od zavora blago "ispupčenog" oblika, slika 28., a time i veću sklonost pojavi pukotina. Naročito kod sučeljenih spojeva postoji opasnost od velikih zaostalih napreznja stoga se preporuča da se zavareni spoj izvede prema slici 29. b), s užim i blago ispupčenim slojevima, a ne sa širokim slojevima udubljenog oblika, kako je prikazano na slici 29. a).



Slika 28. Oblik zavora i raspored površinskih vlačnih napreznja [7]



Slika 29. a) Nepovoljan oblik zavarenih slojeva
b) Povoljan oblik zavarenih slojeva [7]

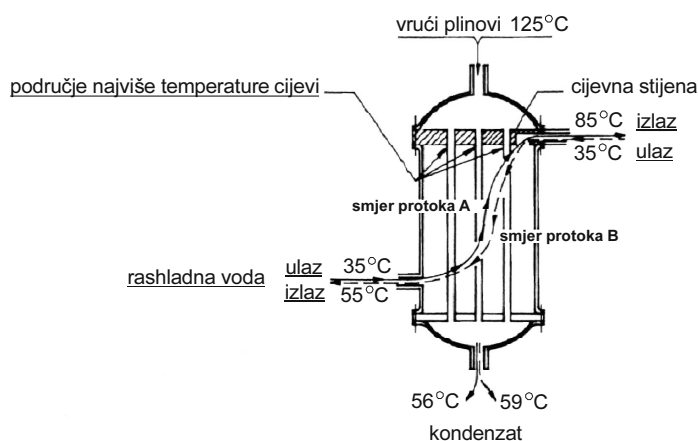
Upotreba nižih temperatura

Utjecaj temperature naročito je bitan jer značajno utječe da li će uopće doći do pojave napetosne korozije. Praktična iskustva nam govore da kod nesenzibiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika do ove korozijske pojave ne dolazi na eksploatacijskim temperaturama ispod 60°C u približno neutralnim kloridnim otopinama [13].

Prilikom strožih ispitivanja napetosne korozije npr. mehanikom loma ovaj prag se spušta ispod 50°C za gašeni 304 čelik, te čak na sobnu temperaturu za senzibilizirani 304 čelik.

Zabilježeni su i brojni slučajevi transkristalne kloridne napetosne korozije nesenzibiliziranog austenitnog nehrđajućeg čelika pri sobnoj temperaturi u atmosferi iznad zatvorenog bazena. Atmosfera bazena uzrokovala je kloridnu napetosnu koroziju na ovjesnim elementima krovne konstrukcije izrađenim od čelika kvalitete AISI 304, 316 i 316 stabiliziranog titanom.

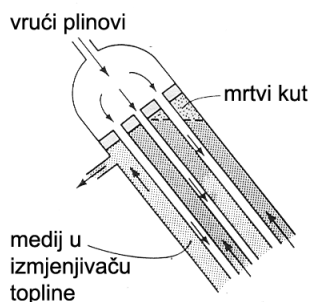
Pogrešni smjer protoka rashladne vode u nekim izmjenjivačima topline može izazvati napetosnu koroziju, slika 30. U uobičajenoj izvedbi rashladna voda ulazi na dnu izmjenjivača topline i izlazi na vrhu, kako je označeno na slici 30. protokom A. Budući da rashladna voda dolazi već zagrijana do gornjeg dijela izmjenjivača topline gdje se nalaze vrući plinovi, njezina će temperatura biti 85°C, stvarajući na taj način temperaturnu zonu na vrhu izmjenjivača topline, u kojoj može doći do napetosne korozije cijevi od nehrđajućeg austenitnog čelika. Promjenom smjera protoka rashladne vode, slika 30. protok B, rashladna voda ulazi u izmjenjivač topline na vrhu, a izlazi na dnu, mjesto najviše temperature uz cijevnu stijenu gdje se nalaze vrući plinovi, hladi voda temperature 35°C, i time je temperatura na vrhu izmjenjivača topline snižena na 55°C i smanjena je opasnost od napetosne korozije.



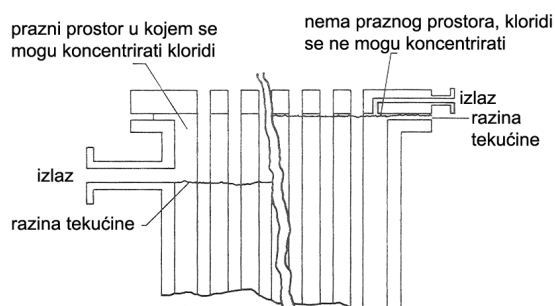
Slika 30. Utjecaj smjera protoka na napetosnu koroziju [2]

Smanjenje koncentracije klorida i eliminiranje mjesta gdje se mogu nakupljati

Kloridi kao npr. KCl, NaCl, CaCl₂ i MgCl₂ nalaze se u praksi u različitim koncentracijama u vodenim otopinama. Opasnost od pojave napetosne korozije raste s porastom sadržaja klorida. Stoga je teško u praksi odrediti granicu ispod koje su s obzirom na povećanje sadržaja klorida čelici otporni. Najveća osjetljivost čelika prema napetosnoj koroziji uzrokovanoj kloridima je u području *pH* vrijednosti 3-8, a korozija je transkristalnog karaktera. No treba istaknuti da održavanje niske koncentracije klorida ne može u potpunosti spriječiti pojavu napetosne korozije npr. u uvjetima kada se kloridi mogu koncentrirati u pukotinama ili zaklonjenim mjestima.



Slika 31. Mrtvi kut u izmjenjivaču topline - opasnost od napetosne korozije [8]



Slika 32. Loše (lijevo) i dobro postavljene izlazne otvore u vertikalnom kondenzatoru, radi otklanjanja napetosne korozije [2]

Uobičajeni razlog za pojavu napetosne korozije je koncentracija klorida uslijed isparavanja na zagrijanim čeličnim površinama. Tekućina koja isparava može biti i svježa voda ili neka druga vrlo razrijeđena otopina koja se zbog svog niskog sadržaja klorida smatra bezopasnom. Međutim kada voda isparava koncentracija klorida u tim tekućinama može toliko porasti da uzrokuje napetosnu koroziju. Ovaj problem može se pojaviti u izmjenjivačima topline u kojima postoje tzv. mrtvi kutovi i prazni prostori u kojima se može povećati koncentracija klorida isparavanjem medija koji se koristi za hlađenje, slike 31. i 32., pri čemu se stvaraju područja konstrukcije sklona oštećenjima u obliku napetosne korozije.

3. ZAKLJUČAK

Tijekom eksploatacije različitih proizvoda, strojarских konstrukcija ili postrojenja vrlo često dolazi do pokretanja korozijskih procesa i oštećivanja što nerijetko onemogućava njihovu upotrebu. Pravilnim oblikovanjem konstrukcije, raznim projektnim rješenjima i tehnologijom izrade može se značajno utjecati na neke pojave korozijske oblike (prvenstveno koroziju u procjepu, galvansku koroziju, erozijsku i napetosnu koroziju) i usporiti ili u nekim slučajevima čak onemogućiti njihovo pokretanje. Kroz primjere korozijskih oštećenja različitih konstrukcija u eksploataciji, prikazano je kako se jednostavnim rješenjima temeljenim na poznavanju pojedinih specifičnosti različitih korozijskih procesa, te pravilnim oblikovanjem i izradom konstrukcije mogu otkloniti korozijski problemi koji nastaju tijekom uporabe. Poznavanje pojedinih vrsta pojava oblika korozijskih oštećenja i poznavanje prirode korozijskih procesa temeljni su preduvjeti za uspješna konstrukcijska, tehnološka i projektna rješenja s ciljem izbjegavanja i smanjivanja korozijskih oštećenja.

Poznavanje pojedinih vrsta pojava oblika korozijskih oštećenja i poznavanje prirode korozijskih procesa temeljni su preduvjeti za uspješna konstrukcijska, tehnološka i projektna rješenja s ciljem izbjegavanja i smanjivanja korozijskih oštećenja.

Stoga je od velike važnosti suradnja između konstruktora i stručnjaka za zaštitu od korozije, tijekom projektiranja, zbog odabira odgovarajuće metode zaštite od korozije radi postizanja optimalne korozijske otpornosti konstrukcije.



4. LITERATURA

1. E.D.D. During: Corrosion Atlas, Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
2. R. J. Landrum: Designing for corrosion control, NACE, Houston, 2000.
3. E. Mattsson: Basic Corrosion Tehnology for Scientists and Engineers, The Institute of Materials, London, 1996.
4. WTIA Tehnical Note No. 12: Minimasing corrosion in welded steel structures, WTIA, Silverwater, 1996.
5. Arhiva Katedre za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Zagreb
6. I. Esih, Z. Dugi: Tehnologija zaštite od korozije, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
7. I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić: Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, Zagreb, 1998.
8. ASM Handbook: Volume 13 – Corrosion, ASM International, Materials Park, 1987.