

Korozija i očuvanje integriteta i funkcionalnosti čeličnih mostova

Kuvek, Korina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:212718>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Korina Kuvek

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Korina Kuvek

KOROZIJA I OČUVANJE INTEGRITETA I FUNKCIONALNOSTI ČELIČNIH MOSTOVA
CORROSION AND PRESERVATION OF INTEGRITY AND FUNCTIONALITY OF STEEL
BRIDGES

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Prof. dr.sc. Sanja Martinez

Članovi ispitnog povjerenstva: 1.) Prof. dr. sc. Sanja Martinez

2.) Prof. dr. sc. Helena Otmačić Čurković

3.) Prof. dr. sc. Marica Ivanković

Zagreb, 2022.

Ovim putem želim zahvaliti svojoj mentorici prof. dr. sc. Sanji Martinez na ukazanom povjerenju te na strpljenu i razumijevanju pri izradi ovog završnog rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je kroz cijeli život kao i kroz školovanje bila izuzetna podrška.

Također, zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama koji su mi uljepšali studiranje te vrijeme provedeno na ovom fakultetu ispunili predivnim uspomnama.

SAŽETAK

Korozija je proces raspadanja konstrukcijskog materijala djelovanjem različitih agensa te kao takva može dugotrajno naštetiti integritetu, a time i funkcionalnosti čeličnih mostova. Ako se ne primijeni adekvatna zaštita ili se ostavi potpuno nezaštićen, konstrukcijski čelik će pod utjecajem okoliša vrlo brzo korodirati što može dovesti do negativnih posljedica u pogledu troškova ili u gorep slučaju, do sigurnosnog rizika. Najčešći oblici korozije koji se manifestiraju na čeličnim mostovima su jednolika korozija, galvanska korozija, korozija u procijepu, jamičasta korozija, interkristalna korozija, erozijska korozija i napetosna korozija koje će detaljnije biti opisane u ovom preglednom radu. Iako ne postoji univerzalno rješenje ovog problema, razmotrit ćemo neke najprimjenjivnije tehnike u očuvanju čeličnih mostova kao i metode korištene pri njihovim periodičnim inspekcijama koje se provode s ciljem pravovremene detekcije i sanacije oštećenja.

Ključne riječi: korozija, čelični mostovi, utjecaj okoliša, zaštita od korozije, inspekcija čeličnih mostova

Corrosion and preservation of integrity and functionality of steel bridges

ABSTRACT

Corrosion is a process of disintegration of structural material by the action of various agents, and as such it can permanently damage the integrity and thus the functionality of a steel bridge. If adequate protection is not applied or left completely unprotected, structural steel will corrode very quickly under the influence of the environment, which can lead to negative consequences in terms of costs or, in the worst case, to safety risks. The most common forms of corrosion manifested on steel bridges are uniform corrosion, galvanic corrosion, crevice corrosion, pitting corrosion, intergranular corrosion, erosion corrosion and stress corrosion, which will be described in detail in this paper. Although there is no universal solution to this problem, we will consider some of the most applicable techniques in the preservation of steel bridges, as well as the methods used during their periodic inspections, which are carried out with the aim of timely detection and repair of damage.

Key words: corrosion, steel bridges, environmental influence, corrosion protection, steel bridge inspection

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OBLICI KOROZIJE TIPIČNI ZA ČELIČNE MOSTOVE.....	2
2.1. Jednolika korozija	2
2.2. Galvanska korozija.....	3
2.3. Korozija u procjepu.....	4
2.4. Jamičasta korozija	4
2.5. Interkristalna korozija	5
2.6. Erozijska korozija.....	6
2.7. Napetosna korozija.....	7
3. UTJECAJ OKOLIŠA NA ODABIR KOROZIJSKE ZAŠTITE ČELIČNIH MOSTOVA.....	8
4. METODE ZAŠTITE ČELIČNIH MOSTOVA OD KOROZIJE.....	10
4.1. Premazi za abrazivno obrađen čelik.....	10
4.1.1. Sustav premaza bogatih cinkom	11
4.1.2. Metalizacija toplinskim naštrecavanjem.....	11
4.2. Vruće pocinčavanje	12
4.3. Čelik otporan na vremenske uvjete	14
4.4. Nehrdajući čelik	16
4.5. Dupleksni premazi.....	17
5. INSPEKCIJA ČELIČNIH MOSTOVA	17
5.1. Metode inspekcije čeličnih mostova	17
5.1.1. Metode primjenjive na vanjske/površinske defekte.....	18
5.1.2. Metode primjenjive na unutarnje/podpovršinske defekte.....	22
5.1.3. Metode primjenjive na kabele, tetive i užad od konstrukcijskog čelika	27
5.1.4. Nove metode u inspekciji čeličnih mostova	30
5.2. Primjena tehnologije robota u inspekciji čeličnih mostova	31
5.2.1. Zračni roboti (dronovi)	32
5.2.2. Roboti za čvrste podloge.....	33
6. ZAKLJUČAK	34
7. LITERATURA	

1. UVOD

Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskog materijala, a uzrokovana je različitim fizikalnim, kemijskim, fizikalno-kemijskim i biološkim čimbenicima. Smatra se suprotnim procesom metalurške ekstrakcije čistog metala iz rude. Takvi metali su vrlo nestabilni te se egzotermnom reakcijom s okolinom nastoje vratiti u svoje prvobitno, stabilno stanje, a to je proces korozije [1].

Svojim djelovanjem, korozija ima direktan i indirektan utjecaj na naš svakodnevni život. Njezin direktan utjecaj je vidljiv skraćivanjem životnog vijeka imovine dok se indirektan utjecaj osjeti na brojnim troškovima koje trpe proizvođači i dobavljači prenoseći ih također na potrošače [2]. Istraživanje provedeno 2013. godine od strane NACE-a (eng. National Association of Corrosion Engineers) je procijenilo da globalni trošak od korozije iznosi 2,5 bilijuna američkih dolara što je ekvivalentno 3,4% globalnog BDP-a [3].

Korozija je također glavni uzrok propadanja čeličnih mostova, pogotovo onih u priobalnom području gdje je prisutan veliki utjecaj vlage i soli [4]. Oni imaju iznimno važnu ulogu u prometnoj infrastrukturi, a rezultati njihovog propadanja mogu varirati od progresivnog slabljenja konstrukcije tijekom dugog vremenskog perioda pa sve do iznenadnog rušenja. Posljedice ovakvog ishoda su katastrofalne u pogledu visokih troškova, ali za sobom mogu odnijeti i ljudske žrtve.

Rušenje mosta preko rijeke Ohio 1967. godine primjer je katastrofalnih posljedica djelovanja korozije na čeličnu konstrukciju mosta (*Slika 1.*). Razlog rušenja je bio pojava napetosne korozije koja je zbog nedostatka tehnologije ostala nezapažena [5].



Slika 1. Rušenje mosta preko rijeke Ohio 1967. godine kao posljedica korozije [5]

Da bi se izbjeglo ponavljanje ovakvih nesreća, čelične mostove je potrebno zaštititi od djelovanja korozije. Postoje različite metode zaštite, a njihova primjena uvelike ovisi o djelovanju okoline u kojoj se čelični most nalazi.

Međutim, niti jedna metoda zaštite ne može vječno štiti čelične mostove od korozijskog utjecaja. Zato je potrebno provoditi periodične inspekcije konstrukcije kojima se mogu detektirati potencijalna oštećenja te ih pravovremeno sanirati.

U ovom preglednom radu će biti spomenuti najčešći oblici korozije koji se javljaju na čeličnim mostovima te utjecaj različitih uvjeta okoline na intenzitet korozije čeličnih mostova. Bit će riječi i o tehnikama koje je moguće primijeniti u njihovoj zaštiti te o metodama inspekcije koje se provode za što učinkovitiju detekciju oštećenja.

2. OBLICI KOROZIJE TIPIČNI ZA ČELIČNE MOSTOVE

Sedam oblika korozije koji se najčešće mogu uočiti na čeličnim mostovima kao posljedica izloženosti djelovanju okoliša su: jednolika korozija, galvanska korozija, korozija u procijepu, jamičasta korozija, interkristalna korozija, erozijska korozija i napetosna korozija.

2.1. Jednolika korozija

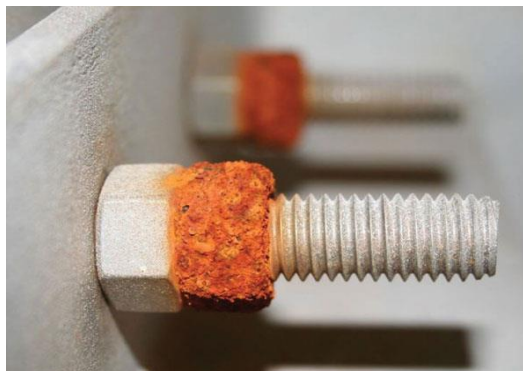
Jednolika korozija, također poznata kao opća korozija, uključuje stanjivanje čeličnih komponenti mosta, a javlja se u obliku jednolikog sloja hrđe. Ovaj oblik korozije je u praksi najbezopasniji jer je vidljiv golim okom što ga čini lakšim za detektirati, ali i pratiti. Najčešće zahvaća čelične mostove u sušnim područjima i to dijelove mosta koji su površinom najveći (Slika 2.) i ne akumuliraju vlagu [4].



Slika 2. Prikaz jednolike korozije na površinski velikom elementu čeličnog mosta [6].

2.2. Galvanska korozija

Galvanska korozija (bimetalna korozija) nastaje kada dva metala, različitih elektrodnih potencijala, stavimo u prisutnost elektrolita. Razlika u elektrodnim potencijalima rezultira protokom elektrona iz jednog metala (anoda) u drugi metal (katoda). Jačina i brzina galvanske korozija ovisi o razlici elektrodnih potencijala između dva metala. Kod čeličnih mostova se obično javlja na mjestu gdje se strukturne komponente dolaze u kontakt s čeličnim komponentama mosta što najbolje možemo vidjeti na primjeru sa *Slike 3* [4].



Slika 3. Primjer galvanske korozije gdje je ne strukturna komponenta, vijak, napravljena od elektronegativnijeg materijala u odnosu na čelik s kojim je u kontaktu, te time predstavlja anodu u elektrolitskom okruženju koja pritom korodira [4]

2.3. Korozija u procjepu

Korozija u procjepu je lokalizirani oblik korozije koji se javlja na procjepu između dvije spojne metalne površine (*Slika 4.*) [4]. Uzrokuju je razlike u koncentraciji metalnih ili kloridnih iona, a najčešće kisika, unutar i izvan procijepa čime se uspostavlja elektrokemijska koncentracijska ćelija. Izvan procijepa su sadržaj kisika i pH vrijednost visoki dok je koncentracija klorida niska pa to postaje katodno područje. S druge strane koncentracija kisika i pH vrijednost su niži unutar procijepa, a koncentracija klorida je veća pa je to anodno područje u kojem dolazi do korozije. Legure koje imaju sposobnost stvaranja zaštitnog pasivnog filma, kao što su nehrđajući čelici, su posebno podložne pojavama korozije u procijepu [7].

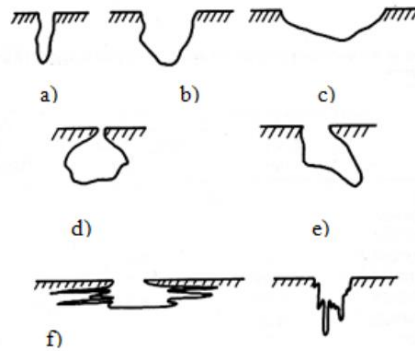


Slika 4. Prikaz korozije u procijepu između dviju spojenih površina čeličnog mosta [8]

2.4. Jamičasta korozija

Jamičasta (eng. pitting) korozija je lokalizirani oblik korozije koji prodire duboko u površinu metala i stvara jamičasta oštećenja. Javlja se zbog lokaliziranog popuštanja pasivnog filma pod utjecajem agresivnih aniona, najčešće klorida, u vodenim otopinama. Predstavlja jedan od najopasnijih oblika korozije zbog svoje nepredvidivosti i otežane detekcije. Događa se vrlo brzo i prodire u metal bez da uzrokuje značajan gubitak njegove mase. Autokatalitički je proces što znači da jednom kada se jamica formira, medij unutar jamice postane osiromašen kisikom te obogaćen metalnim i kloridnim ionima, a pH vrijednost se znatno smanjuje.

Takvi uvjeti sprječavaju repasivaciju zaštitnog filma te uzrokuju daljnju propagaciju jamice [9]. Najčešći oblici formiranih jamica prikazani su na *Slici 3*.

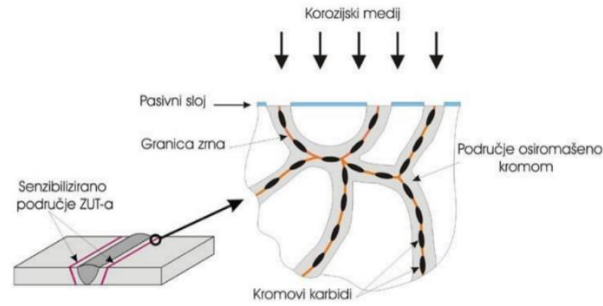


Slika 3. Oblici formiranih jamica: a) uska, duboka; b) eliptična; c) široka, plitka; d) potpovršinska; e) izbočena; f) horizontalna i vertikalna [9]

2.5. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je oblik korozije koji razara metal po granicama zrna te se neprimjetno širi u dubinu i izaziva naglo smanjenje žilavosti i čvrstoće metala što na posljetku može dovesti do njegovog pucanja. Kao i jamičasta, zbog svoje nepredvidivosti može biti vrlo opasna. Uglavnom se javlja na metalnim legurama kao što su nehrđajući čelik te legure na bazi nikla i aluminijska.

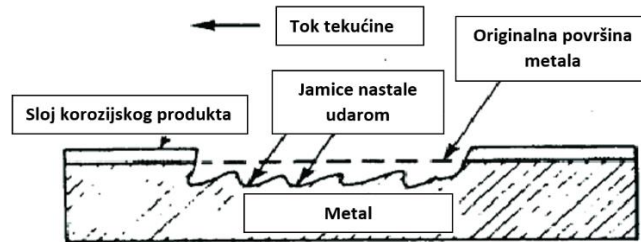
Pojava interkristalne korozije se može povezati sa pojavom senzibilizacije kao posljedicom unosa topline kod npr. toplinske obrade ili zavarivanja metala zbog čega nastaju različiti precipitati i segregati kao što su različiti intermetalni spojevi ili spojevi metala s nemetalom kao što je npr. ugljik (karbidi). Kada je nehrđajući čelik u senzibiliziranom stanju, formiraju se korozijski mikročlanci u kojima je mala anoda, napravljena od kromom osiromašenog čelika, u kontaktu s velikom katodom, koju čine površine pasivne jezgre zrna što omogućuje interkristalno napredovanje korozije [9]. Mehanizam djelovanja interkristalne korozije na nehrđajući čelik je prikazan na *Slici 4*.



Slika 4. Mehanizam djelovanja interkristalne korozije na nehrđajući čelik [9]

2.6. Erozijska korozija

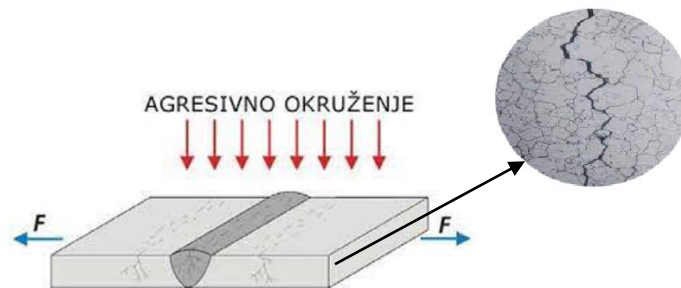
Erozijska korozija se odnosi na destrukciju površine metala kao posljedicu mehaničkog djelovanja u obliku strujanja tekućine preko površine metala dovoljnom brzinom da ukloni zaštitni korozivski produkt s površine [4]. Čestice koje su prisutne u tekućini (npr. pijesak) bruse površinu metala time trošeći sloj korozivskih produkata što na koncu dovodi do kontinuiranog korozivskog napada na goli metal (Slika 5.) [9].



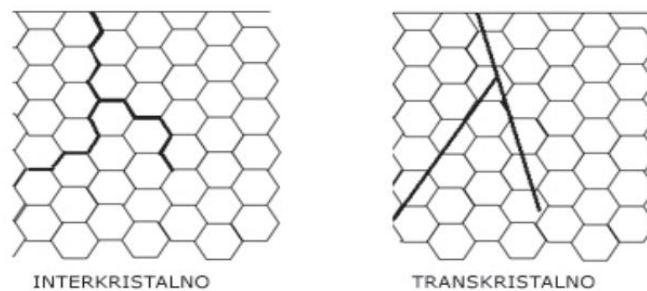
Slika 5. Mehanizam djelovanja erozijske korozije [10]

2.7. Napetosna korozija

Napetosna korozija nastaje uslijed istovremenog djelovanja agresivnog korozijskog medija i mehaničkih (vlačnih) napreznja (Slika 7.). Najčešće se javlja na hladno deformiranim lokalitetima ili u blizini zavarenih dijelova zbog zaostalog napreznja. Čisti metali su obično otporniji na napetosnu koroziju u odnosu na legure. Kao posljedica ovog tipa korozije nastaju napukline na površini metala koje se šire interkristalno ili transkristalno (Slika 8.) i to uvijek okomito na smjer napreznja [5].



Slika 7. Djelovanje napetosne korozije na metalnu površinu [5]



Slika 8. Načini širenje napuklina kod napetosne korozije: a) interkristalno; b) transkristalno [5]

3. UTJECAJ OKOLIŠA NA ODABIR KOROZIJSKE ZAŠTITE ČELIČNIH MOSTOVA

Odabir idealnog sustava zaštite čeličnih mostova od korozije uvelike ovisi o njihovoj „makro“ i „mikro“ okolini. „Makro“ okolina čeličnog mosta se odnosi na lokalne vremenske uvjete kao što su kiša, temperatura te različite kontaminirajuće tvari poput klorida. S druge strane, „mikro“ okolina se odnosi na određene elemente mosta, a definirana je njihovim materijalom, konfiguracijom te orijentacijom u odnosu na djelovanje vlage i sunčeve svjetlosti. Stoga prema ovim definicijama, čelični most može imati jednu „makro“ okolinu, ali i do nekoliko različitih „mikro“ okolina.

Nadalje, „makro“ okolina se može podijeliti na ruralnu (blagu), industrijsku (umjerenu) i obalnu (ekstremnu). Ove generalne klasifikacije se koriste kao polazne točke projektantima mosta kod odabira odgovarajuće korozijske zaštite konstrukcije.

Ruralna (blaga) okolina se uglavnom odnosi na područja daleko od obale, u unutrašnjosti, gdje je mala izloženost vlazi, solima te polutantima poput SO₂ [11].

Industrijska (umjerena) okolina se odnosi na urbana područja u kojima je znatan utjecaj zagađivača zraka poput SO₂, CO₂, klorida i prašine [12].

Obalna (ekstremna) okolina se odnosi na područja uz morsku obalu gdje je izuzetno visok utjecaj soli i vlage na čelične mostove [11].

Međutim, mnogi mostovi neće jasno pripadati jednoj od ovih kategorija. Često se javljaju velike varijacije u okolišu čak i unutar vrlo malog geografskog područja zbog lokalnih učinaka. Tako utjecaj soli i vlage može znatno varirati na jednom kraju čelične strukture u odnosu na drugi. Istraživanja su pokazala da se razine soli u zraku dramatično smanjuju s udaljavanjem od morske obale pa tako karakteristike obalnog okoliša mogu jenjavati čak i unutar nekoliko stotina metara od obale. S druge strane, oluje mogu raznositi sol u zraku kilometrima u unutrašnjost gdje utjecaj soli inače nije primjetan [11].

Sve ovo, kao i iskustva s prijašnjim performansama mostova, ukazuje na to da korozivnost specifične lokacije ne ovisi samo o blizini mora ili oceana već i o učestalosti vjetrova i oluja te nadmorskoj visini. Stoga ne možemo reći da postoji određena detaljna karta definiranih granica između umjerenih i jakih mjesta korozije [11].

Prema standardu ISO 9223:2012 korozivnost atmosfere se može klasificirati na kategorije od C1 (vrlo niska korozivnost) do C5 (vrlo visoka korozivnost) s dodatnom kategorijom, CX (ekstremna korozivnost) [13]. Očekivani raspon brzine korozije za svaku klasifikaciju prikazan je u *Tablici 1*.

Tablica 1. Brzina korozije ugljičnog čelika s obzirom na klasifikaciju korozivnosti atmosfere [13]

Kategorija	Korozivnost	Brzina korozije ugljičnog čelika / $\mu\text{m}/\text{god}$
C1	Vrlo niska	$\leq 1,3$
C2	Niska	≤ 25
C3	Srednja	≤ 50
C4	Visoka	≤ 80
C5	Vrlo visoka	≤ 200
CX	Ekstremna	≤ 700

Definiranje korozivnosti atmosfere je važno jer su otpornost čelika i trajnost zaštitnih premaza pod izravnim utjecajem okoline. Tako je na nekim mjestima moguća primjena više različitih metoda zaštite od korozije dok su na drugim mjestima, mjestima ekstremne korozivnosti, te mogućnosti ograničene [11].

4. METODE ZAŠTITE ČELIČNIH MOSTOVA OD KOROZIJE

Metode koje se najčešće primjenjuju kod zaštite čeličnih mostova od korozije su:

- primjena cinkom bogatih premaza
- metalizacija toplinskim naštrcavanjem
- vruće pocinčavanje
- primjena čelika otpornog na vremenske uvjete (COR-TEN)
- primjena nehrđajućeg čelika
- primjena dupleksnih premaza

Prve tri metode se temelje na principu katodne zaštite žrtvovanom anodom gdje se namjerno primjenjuju elektronegativniji metali, u ovom slučaju cink, u odnosu na štice čelik. Pri tom će elektronegativniji metal biti anoda te će korodirati „žrtvujući“ se da zaštiti čeličnu konstrukciju.

Četvrta i peta metoda se odnose na konstruiranje mosta od čelika s visokom otpornošću na vremenske utjecaje i koroziju, koji tvori okside na granici čelika i okoline koji bolje prijanjaju od normalnih željeznih oksida (hrđe) nastalih korozijom običnog ugljičnog čelika. Posljednja metoda se odnosi na primjenu kombinacije više različitih premaza radi poboljšanja izdržljivosti [11].

4.1. Premazi za abrazivno obrađen čelik

Tek sedamdesetih godina prošlog stoljeća je u praksu nanošenja zaštitnih premaza ušla i mehanička priprema čeličnih površina u svrhu uklanjanja bilo kakvih nečistoća koje bi smanjile djelotvornost premaza. Prednosti ovakve pripreme čeličnih površina su osiguravanje najboljeg mogućeg mehaničkog povezivanja i prijanjanja, ali i ublažavanje posljedica korozije te mehaničkih oštećenja [11]. Kod čeličnih mostova se za pripremu površine koristi mlaz abrazivnog sredstva, a kako je to najčešće pijesak, postupak se zove pjeskarenje.

Čestice pijeska djelovanjem komprimiranog zraka udaraju u metalnu površinu nakon čega ona bude ravnomjerno hrapava [14].

Ovakva obrada čelične površine je potrebna prije nanošenja premaza bogatih cinkom te prije metalizacije toplinskim naštrcavanjem prilikom zaštite čeličnih mostova.

4.1.1. Sustav premaza bogatih cinkom

Premazi bogati cinkom se sastoje od velikog udjela cinkovog praha pomiješanog s određenim vezivom te tako pružaju katodnu zaštitu čeliku. Da bi katodna zaštita bila moguća, koncentracija cinkovog praha mora biti dovoljno velika da se omogući vodljivost između čestica cinka i čelika zbog čega je izuzetno važno stalno miješanje i homogenost smjese. S obzirom na vrstu veziva, razlikujemo anorganski i organski temeljni cinkov premaz [15].

Kod anorganskih temeljnih premaza se kao vezivo koriste silikati dok se kod organskih najčešće koriste epoksidi i poliuretani. Generalno, anorganski temeljni premazi pružaju bolju katodnu zaštitu upravo zbog silikatnih veziva koji reagiraju s česticama cinka u smjesi što omogućava primjenu većih koncentracija cinka. Što je koncentracija cinka u osušenom filmu veća to će i premaz duže trajati. S druge strane, kod organskih temeljnih premaza su čestice cinka kapsulirane vezivom. Nadalje, organski premazi imaju lakše nanošenje koje se najčešće obavlja na terenu, dok se anorganski uglavnom nanose u radnji. Da bi i jedan od ovih tipova temeljnog premaza bio djelotvoran, površina na koju se nanose mora biti dobro očišćena (pjeskarenje) [16].

Ovaj tip premaza se može nanijeti četkom ili prskanjem na čelik. Prilikom nanošenja prskanjem, dovodni vodovi trebaju biti što kraći kako bi se izbjeglo taloženje cinkovog praha i nastajanje neravnih slojeva filma [15].

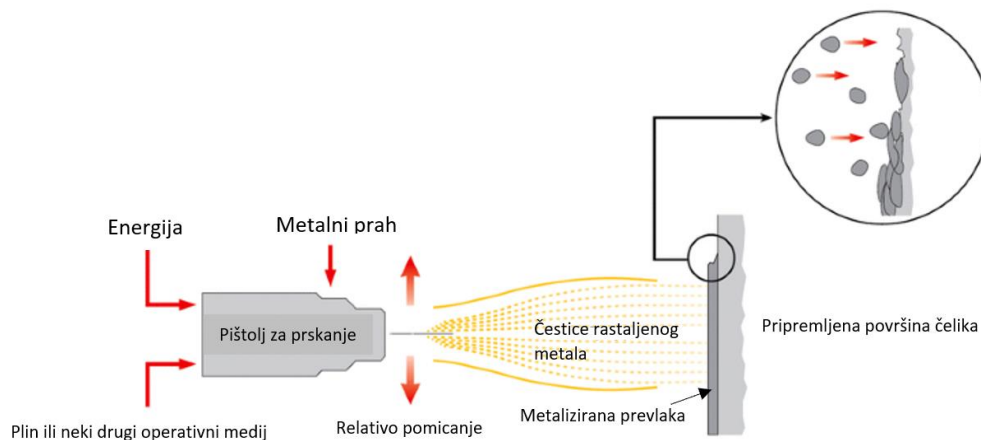
4.1.2. Metalizacija toplinskim naštrcavanjem

Metalizacija toplinskim naštrcavanjem se odnosi na nanošenje metalnog materijala u rastaljenom stanju, prskanjem na podlogu osnovnog materija, u ovom slučaju čelika, pri čemu nastaje zaštitna prevlaka. Na čelične mostove se najčešće nanose prevlake od čistog cinka ili aluminija te legure s 85% cinka i 15% aluminija.

Metalizirani premazi se nanose pomoću pištolja za prskanje s izvorom topline za taljenje metalne sirovine koja se najčešće nalazi u obliku praha. Takvi pištolji za prskanje koriste komprimirani zrak za usmjeravanje rastaljenog metala na ciljanu površinu čelika.

Izvor topline za taljenje metalne sirovine može biti plamen ili električni luk što je vrlo slično izvorima topline kod opreme za zavarivanje.

Prilikom udara rastaljenog metala na površinu čelika, dolazi do stvrdnjavanja sloja nanesenog metala te nastaje čvrsti premaz koji djeluje na principu katodne zaštite žrtvovanom anodom [11].



Slika 9. Prikaz nanošenja metaliziranog premaza na površinu čelika metodom toplinskog naštrcavanja [17]

4.2. Vruće pocinčavanje

Vruće pocinčavanje se sastoji od dvije glavne faze, kemijske priprema materijala koji želimo zaštititi te samog procesa pocinčavanja. Za provođenje svih faza procesa potrebno je posebno postrojenje zbog čega terenska primjena nije moguća.

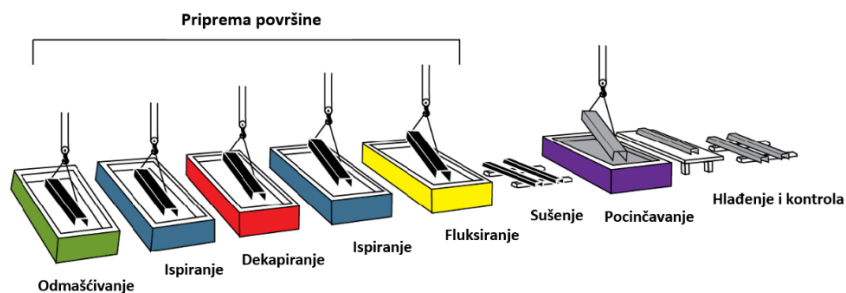
Faza pripreme površine materijala koji je potrebno cinčiti se provodi nizom od 4 tehnološke operacije: odmaščivanje, dekapiranje, ispiranje i fluksiranje. Svaka od ovih operacija zahtijeva uranjanje čeličnog materijala u bazene duljine oko 12 m koji imaju različite namjene [11].

Odmaščivanje se provodi uranjanjem čeličnih dijelova konstrukcije u bazene napunjene vodenom otopinom specifičnih biorazgradivih tenzida pri temperaturi od 40°C i blago povišenoj pH-vrijednosti gdje ostaju uronjeni 10 do 20 minuta.

Zatim se ispiru uranjanjem i izranjanjem u bazenu s vodom nakon čega slijedi postupak dekapiranja pri kojem se čelični dijelovi prebacuju u bazen napunjen 4-16%-tnom otopinom kloridne kiseline pri sobnoj temperaturi.

Dekapiranje može trajati od 20 do 60 minuta ovisno o jačini kiseline, ali i o količini hrđe na površini čeličnih dijelova. Nakon toga ponovno slijedi njihovo ispiranje. Posljednji korak pripreme površine čeličnih dijelova koje želimo cinčati je fluksiranje. Ono se vrši uranjanjem i izranjanjem u bazenima s vodenom otopinom cinkova i amonijeva klorida pri temperaturi od 40°C.

Nakon postupka pripreme površine za cinčanje, čelični dijelovi konstrukcije se premještaju u sušare gdje se suše 15 do 20 minuta na temperaturi od 65 °C nakon čega slijedi sam proces pocinčavanja. Čelični dijelovi konstrukcije se uranjaju u bazen s rastaljenim cinkom pri temperaturi od 450 °C, a zbog topline dolazi do stvaranja metalurške veze između cinka i čelika te dolazi do formacije zaštitnog sloja cinka koji djeluje na principu katodne zaštite žrtvovanom anodom. Gotovi pocinčani čelični dijelovi se na kraju hlade i još jednom kontroliraju te im se mjeri debljina zaštitne cinkove prevlake [18]. Cijeli postupak je slikovito prikazan na *Slici 10*.



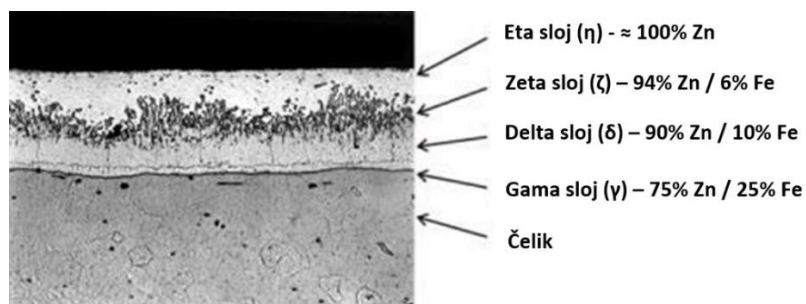
Slika 10. Pojedine faze postupka vrućeg pocinčavanja [11]

Kvaliteta zaštitne prevlake od cinka uvelike ovisi o kemijskom sastavu čelika na koji se nanosi. Čelik koji sadrži udio silicija manji od 0,04% ili između 0,14% i 0,24% se klasificira kao „nereaktivni“ čelik. Njegovim vrućim pocinčavanjem se formiraju 4 sloja zaštitne prevlake: eta, zeta, delta i gama (*Slika 11*).

Ovi slojevi se razlikuju prema udjelu cinka i željeza pa će tako gama sloj, koji je najbliži površini čelika, imati najveći udio željeza dok će vanjski sloj, eta, biti relativna čist sa otprilike 100%-tnim udjelom cinka.

Debljina prevlake kod „nereaktivnih“ čelika je oko 0,1 mm i neće se mijenjati bez obzira na to koliko vremena čelični dijelovi ostanu u bazenu s rastaljenim cinkom.

S druge strane, ako je udio silicija između 0,04% i 0,14% ili je veći od 0,24% govorimo o „reaktivnom“ čeliku. Kod ovakvog tipa čelika, vanjski, eta sloj zaštitne cinkove prevlake neće biti od 100%-tnog cinka već će biti legura cinka i željeza zbog čega će čitava prevlaka biti predebela i krhka. Debljina prevlake „reaktivnog“ čelika može ići preko 0,25 mm što uzrokuje pojavu delaminacije. Zato je kod vrućeg pocinčavanja „reaktivnog“ čelika potrebno kontrolirati vrijeme uranjanja u bazen s rastaljenim cinkom, temperaturu te umjesto dekapiranja primijeniti pjeskarenje kod pripreme površine [19].



Slika 11. Slojevi zaštitne cinkove prevlake dobivene vrućim pocinčavanjem [19].

4.3. Čelik otporan na vremenske uvjete

Čelik otporan na vremenske uvjete (eng. weathering steel) je niskolegirani čelik visoke čvrstoće koji u normalnim atmosferskim uvjetima pruža iznimnu otpornost od korozije u odnosu na obični ugljični čelik [20]. Dobiva se dodavanjem male količine bakra, kroma, nikla, silicija i fosfora ugljičnom čeliku pri čemu nastaje legura s poboljšanom otpornošću na vremenske uvjete [21].

Kad se izlože okolišu, ovi čelici u vrlo kratkom vremenskom periodu formiraju sloj hrđe na površini. Ova hrđava patina stvara zaštitnu barijeru koja sprječava prodiranje kisika i vlage do površine čelika čime se smanjuje stopa korozije [20].

Dvije najčešće specifikacije čelika otpornog na vremenske uvjete su ASTM A588 i A242, standardne specifikacije za niskolegirani konstrukcijski čelik visoke čvrstoće. Ove oznake su im dodijeljene od strane ASTM (eng. American Society for Testing and Materials), grupe za međunarodne standarde. Poznati su još i pod nazivom COR-TEN „A“ i „B“ (eng. corrosion resistance and tensile strenght) [23].

Čelični mostovi konstruirani pomoću ovog tipa čelika ne zahtijevaju premazivanje. Kod održavanja su jedino potrebne povremene kontrole i čišćenja kako bi im se osigurala dugotrajnost. Zato su mostovi od ove vrste čelika česta pojava na teško pristupačnim i opasnim mjestima. Osim toga su i ekonomičniji. Početni troškovi izgradnje ovih čeličnih mostova su 5% niži od troškova izgradnje čeličnih mostova zaštićenih premazima. Osim početne uštede, smanjeni su i budući izravni troškovi održavanja, ali i neizravni troškovi koji se odnose na potencijalno zaustavljanje prometa. Primjer mosta izgrađenog od ove vrste čelika je vidljiv na *Slici 12*.

Međutim, postoje određeni vremenski i klimatski uvjeti koji mogu uzrokovati probleme s izdržljivošću i otpornošću na koroziju kod ovih tipova čelika. Tako bi se trebala izbjegavati primjena tih čelika u izgradnji mostova na mjestima gdje su koncentracije klorida vrlo visoke kao što su obalna područja. Također bi se trebala izbjeći primjena u okolini u kojoj vladaju stalni mokri i vlažni uvjeti [22].



Slika 12. Prikaz mosta izgrađenog od čelika otpornog na vremenske uvjete [24]

4.4. Nehrđajući čelik

Nehrđajući čelik, poznat još i kao inox, je korozijski postojan čelik koji u svom sastavu sadrži najmanje 10,5% kroma. Moderni nehrđajući čelik u sebi može još sadržavati i nikal, molibden i titan. Ipak, krom je element koji nehrđajućem čeliku daje otpornost na koroziju jer reagira s kisikom iz atmosfere te formira tanki, zaštitni sloj poznat kao pasivni film.

S obzirom na kristalografiju i fazni sastav, razlikujemo nekoliko vrsta nehrđajućih čelika, a to su: austenitni, feritni, martensitni i dupleksni nehrđajući čelik.

Austenitni nehrđajući čelik je poznat kao nemagnetni čelik. Sadrži 0,02-0,15% ugljika, 16-24% kroma, 8-20% nikla, a moguće je dodavanje molibdena, titanija, dušika itd. Otporan je na interkristalnu koroziju, stabilan je pri niskim temperaturama te je iznimno žilav, a plošno centrirana kubična kristalna rešetka mu osigurava visoku deformabilnost. Najveći mu je nedostatak snižavanje granice razvlačenja zbog malog udjela ugljika.

Feritni nehrđajući čelik sadrži 12-18% kroma i manje od 0,1% ugljika. Magnetičan je, ima izvrsnu otpornost na vibracije i nije osjetljiv na napetosnu koroziju, a dodatkom molibdena mu se povećava otpornost i na jamičastu koroziju. Pri niskim temperaturama je sklon lomljenju [25].

Martensitni nehrđajući čelik ima veći udio ugljika od ostalih oblika, 1,2%, te sadrži 11,5-18% kroma. Najrjeđe je zastupljen oblik nehrđajućeg čelika, a koristi se kada je potrebna visoka vlačna čvrstoća ili otpornost na udarce [26, 27].

Dupleksni nehrđajući čelik ima dvofaznu mikrostrukturu koja se sastoji od zrna feritnog i austenitnog nehrđajućeg čelika (50% feritnog i 50% austenitnog). Dvostruka mikrostruktura ga čini dvostruko jačim od običnog feritnog ili austenitnog nehrđajućeg čelika [26].

S obzirom na „makro“ okolinu mostova, nehrđajući čelici ne bi trebali razviti nikakve produkte korozije, osim u vrlo agresivnom korozijskom okolišu kao što su obalna područja. Međutim, korištenje nehrđajućeg čelika za izgradnju čitavog mosta je izuzetno skupo [11].

4.5. Dupleksni premazi

Dupleksni premaz je tip premaza koji kombinira dva ili više različitih sustava premaza kako bi se postigla veća izdržljivost u usporedbi s bilo kojim individualnim sustavom premaza.

Primjerice, vijek trajanja obojenog i vruće pocinčanog dupleksnog premaza bi mogao biti 1,5 do 2,3 puta veći od sume vijeka trajanja ovih pojedinačnih premaza, ovisno o agresivnosti okoliša. Međutim, to se nije pokazalo svugdje kao slučaj. Tako su recimo, unatoč prednostima dupleksnih premaza, neka ubrzana istraživanja pokazala da premaz bogat cinkom na čeliku otpornom na vremenske utjecaje ne donosi prednost u odnosu na isti premaz nanesen na obični čelik. Iako, trebalo bi naglasiti da ubrzana ispitivanja možda neće vrlo precizno simulirati performanse tog dupleksnog premaza u stvarnom okolišu [11].

5. INSPEKCIJA ČELIČNIH MOSTOVA

Inspekcija čeličnih mostova se provodi sa svrhom produljenje životnog vijeka i upotrebljivosti konstrukcije, ali i osiguravanja sigurnosti te smanjenja potencijalnih troškova zamjene dijelova. Kod većine čeličnih mostova se preporuča provođenje inspekcije jednom u dvije godine.

U ovom dijelu rada će biti riječi o različitim metodama inspekcije koje je moguće primijeniti na čelične mostove kao i o nekim novim razvijajućim metodama. Također, biti će opisana i primjena robotike u inspekciji što znatno olakšava posao inspektorima [28].

5.1. Metode inspekcije čeličnih mostova

Za provođenje inspekcija čeličnih mostova koriste se NDT (eng. non-destructive testing) metode, odnosno metode kontrole bez razaranja materijala. Ove metode se uglavnom provode na terenu, a s obzirom na vrstu čeličnih elemenata i mjesto pojave defekata dijele se na:

- metode primjenjive na vanjske/površinske defekte
- metode primjenjive na unutarnje/podpovršinske defekte
- metode primjenjive na kabele, tetive i užad od konstrukcijskog čelika

Osim ovih metoda, postoje i neke nove metode inspekcije koje su u fazi razvoja [28].

5.1.1. Metode primjenjive na vanjske/površinske defekte

Metode inspekcije primjenjive na vanjske/površinske defekte se smatraju jednostavnima za primjenu, a ubrajaju vizualni pregled, penetrantsko ispitivanje, ispitivanje magnetskim česticama te ispitivanje vrtložnim strujama [28].

5.1.1.1. Vizualni pregled

Metoda vizualnog pregleda je najprimjenjivija ne razarajuća metoda inspekcije zbog svoje jednostavnosti, ekonomičnosti, ali i brzine izvedbe. Iako se većina vizualnog pregleda izvodi golim okom, neki slučajevi mogu zahtijevati vizualna pomagala poput dalekozora, povećala ili boroskopa. Inspektor koji provodi inspekciju mora biti upoznat s vrstama i razinama oštećenja koja se javljaju na čeličnim konstrukcijama.

Najveći nedostatak ove inspekcijske metode je njena subjektivnost. Primjerice, dva različita inspektora mogu dobiti različite rezultate inspekcije zbog različitih utjecaja na njihovu prosudbu kao što su rad na visini, ograničenje vidnog kuta te osvjetljenje (*Slika 13.*). Također, vizualni pregled ograničava inspektora na utvrđivanje samo površinskih oštećenja [28].



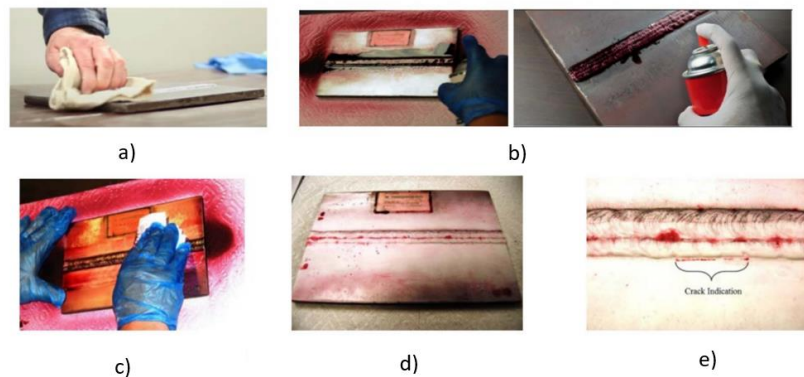
Slika 13. Teškoće kod izvođenja vizualnog pregleda čeličnog mosta: a) slabo osvjetljenje, b) rad na visini [28]

5.1.1.2. Penetrantsko ispitivanje

Metoda penetrantskog ispitivanja se temelji na nanošenju tekućeg penetranta na površinu konstrukcije. Penetrant je boja, obično crvena, koja ima sposobnost prodiranja u pukotine, šupljine i druga površinska oštećenja. Radi na principu kapilarnog djelovanja pri čemu penetrant niske površinske napetosti može prodrijeti u čistu i suhu površinu čelika. Zato je važno prije nanošenja penetranta očistiti i odmastiti ispitivanu površinu. Nakon nanošenja, ostavlja se 10 do 60 minuta da se upije u sve nepravilnosti nakon čega se višak boje uklanja s površine, najčešće vodom i suhom krpom. Na kraju se dodaje razvijlač koji je obično bijele boje, a zadatak mu je izvući penetrant iz pukotine čime sama pukotina postaje uočljivija.

Ovisi o vrsti korištenog penetranta, proces se provodi pod bijelim ili ultraljubičastim svjetlom [29]. Provođenje postupka je prikazano na *Slici 14*.

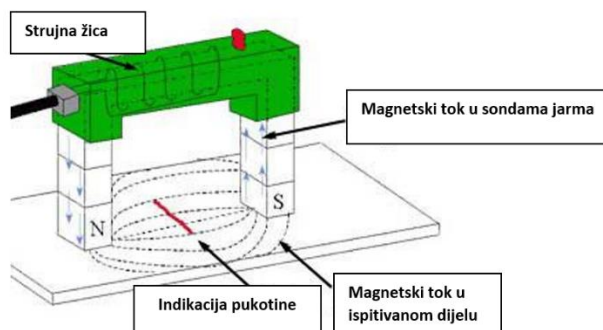
Penetrantsko ispitivanje se uglavnom primjenjuje za otkrivanje i nadzor površinskih pukotina zavarenih spojeva čeličnih mostova. Proces je vrlo jednostavan i jeftin, ali dugotrajan pa nije isplativ kad je potrebno provoditi inspekcije na više različitih lokacija [28].



Slika 14. Postupak provođenja penetrantskog ispitivanja: a) čišćenje i odmašćivanje ispitivane površine, b) nanošenje penetranta, c) uklanjanje penetranta, d) nanošenje razvijlača, e) indikacija pukotine [28]

5.1.1.3. Ispitivanje magnetskim česticama

Metoda inspekcije magnetskim česticama se primjenjuje kod otkrivanja površinskih oštećenja i to isključivo kod feromagnetičnih materijala. Brža je i jeftinija metoda u odnosu na penetrantsko ispitivanje te ne zahtijeva opsežne pripreme ispitivane površine. Provodi se tako da se na ispitivanu površinu prisloni magnetski jaram kroz koji prolazi električna struja i pritom stvara magnetsko polje između sonde jarma čije silnice prolaze i kroz ispitivanu površinu (Slika 15.) [28].



Slika 15. Prikaz magnetskog polja nastalog primjenom magnetskog jarma [28]

Ako je na ispitivanoj površini prisutan bilo kakav defekt, dolazi do curenja magnetskog polja oko defekta. Kako bi se defekt što lakše otkrio, na ispitivanu površinu čeličnog mosta je potrebno nanijeti magnetske čestice pri čemu se obično koriste sitne čestice željeza. Pri tom postoje dva načina nanošenja magnetskih čestica, suho i mokro. Kod mokrog nanošenja se čestice željeza miješaju s vodom ili uljem te se prskaju na ispitivanu površinu. Kod suhog nanošenja se koristi prah većeg zrna nego što je to slučaj kod mokrog nanošenja te je višak čestica potrebno ukloniti otpuhivanjem. Bez obzira na metodu nanošenja magnetskih čestica, rezultat će biti isti. Ukoliko postoje pukotine na ispitivanoj površini koje su okomite na smjer silnica magnetskog polja, čestice će se okupiti oko njih.

Ovom metodom je moguće odrediti postojanje pukotina na ispitivanoj površini, ali ne i njihovu dubinu [30].

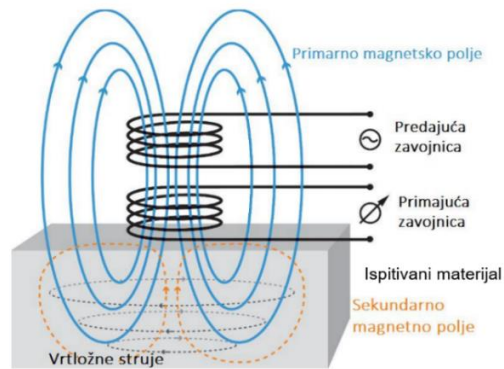


Slika 16. Prikaz inspekcije čeličnih mostova primjenom metode s magnetskim česticama [28]

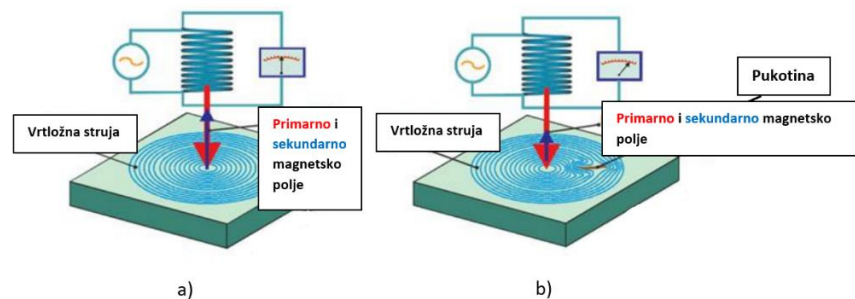
5.1.1.4. Ispitivanje vrtložnim strujama

Metoda vrtložnim strujama (eng. eddy currents) se temelji na induciranju vrtložnih struja u električni vodljivom materijalu uz pomoć dvije zavojnice omotane oko sonde. Naime, jedna zavojnica, tzv. predajuća zavojnica, je spojena na izvor izmjenične struje pritom stvarajući primarno magnetsko polje. Kada se sonda približi ispitivanoj površini čeličnog mosta, induciraju se vrtložne struje koje prodiru u dubinu elemenata čeličnog mosta. Vrtložne struje stvarju svoje vlastito, sekundarno, magnetsko polje koje je suprotnog smjera od magnetskog polja zavojnice. Međusobno suprotstavljanje primarnog i sekundarnog magnetskog polja uzrokuje smanjenje impedancije primajuće zavojnice. Međutim, ako je na ispitivanom elementu mosta prisutna pukotina ili nekakvo drugo površinsko oštećenje, vrtložne struje se na tom mjestu prekidaju što dovodi do pada napona primajuće zavojnici, ali i do povećanja njezine impedancije. Tako je mjerenjem napona i impedancije na primajućoj zavojnici moguće uočiti oštećenja na površini čeličnog mosta [28, 31]. Opisani princip rada metode vrtložnih struja je vidljiv na *Slikama 17 i 18*.

Inspekcija čeličnih mostova vrtložnim strujama je vremenski učinkovit proces te se često koristi kada na mostu postoji više mjesta koje je potrebno ispitati. Praktična je za otkrivanja oštećenja kroz vodljive i nevodljive prevlake [28].



Slika 17. Princip rada metode ispitivanja vrtložnim strujama [32]



Slika 18. Otkrivanje pukotina metodom vrtložnih struja: a) vrtložna struja na površini bez oštećenja, b) vrtložna struja na površini s pukotinom [31]

5.1.2. Metode primjenjive na unutarnje/podpovršinske defekte

Metode o kojima će ovdje biti riječ se uglavnom koriste za otkrivanje unutrašnjih oštećenja elemenata čeličnog mosta iako ih je moguće primijeniti i kod otkrivanja površinskih oštećenja. Koriste se u svrhu dimenzioniranja i karakteriziranja oštećenja prethodno opaženih metodama za vanjske/površinske defekte. Ove vrste inspekcijskih metoda su vrlo spore te zahtijevaju posebnu obuku i skupu opremu.

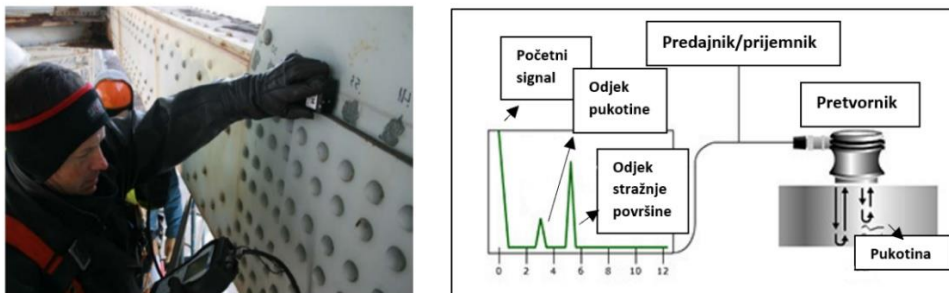
U ove metode se ubrajaju ultrazvučno ispitivanje, akustična emisija, infracrvena termografija te radiografsko ispitivanje [28].

5.1.2.1. Ultrazvučno ispitivanje

Metoda ultrazvučnog ispitivanja koristi ultrazvučne valove frekvencijskog raspona od 0,5 MHz do 20 MHz kako bi ispitala strukturne komponente čeličnog mosta [33].

Najčešće primjenjivana ultrazvučna metoda je metoda odjeka za koju su potrebni ultrazvučna sonda koja služi kao predajnik i prijemnik ultrazvučnih valova, pretvornik i uređaj za prikaz odziva. Ultrazvučni pretvornik pretvara električnu energiju u mehaničku energiju titranja visoke frekvencije koja stvara ultrazvučne valove. Nastali ultrazvučni valovi se šire kroz ispitivani materijal, u ovom slučaju kroz konstrukciju čeličnog mosta. Ukoliko signal naiđe na diskontinuitet (npr. pukotine ili granice materijala različite impedancije) dio energije signala će se reflektirati natrag. Reflektirani ultrazvučni signal će se pretvoriti natrag u električni signal te se šalje na obradu i u uređaj za prikaz odziva [34].

Prednost ove metode je to što je vrlo osjetljiva i precizna, područje debljina ispitivanog materijala neograničeno te njezino provođenje ne zahtijeva nikakva zaštitna sredstva. Manje je učinkovita kod ispitivanja tankih elemenata i elemenata složene geometrije [28].



Slika 19. Primjena ultrazvučne metode na konstrukciju čeličnog mosta te princip rada metode [28, 35]

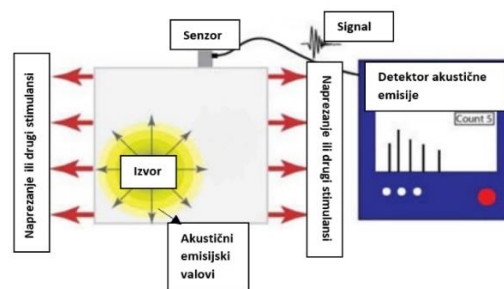
5.1.2.2. Akustična emisija

Metoda ispitivanja akustičnom emisijom koristi oslobađanje ultrazvučnih valova naprezanja pri detekciji nedostataka konstrukcije čeličnog mosta. Ovi ultrazvučni valovi ne potječu od vanjskog izvora, kao što je to slučaj kod metode ultrazvučnog ispitivanja, već potječu iz ispitivanog materijala [36].

Primjenom naprezanja ili nekog drugog stimulansa na ispitivani objekt, dolazi do širenja akustičnih emisijskih valova. Ovi valovi se šire od pukotina, kružnim uzorcima pri čemu ih senzori (pretvornici) pričvršćeni na ispitivanu površinu bilježe te prikazuju instrumentom za detekciju akustične emisije. Prije pričvršćivanja senzora na ispitivanu površinu, potrebno je ukloniti premaz. U nekim slučajevima se čak koriste i magnetski držači za lakše pričvršćivanje senzora. Za provođenje bolje inspekcije potrebno je postaviti više senzora od jednom, a kako bi se lakše locirale pukotine i uklonili smetajući signali iz izvora buke, senzori se postavljaju u geometrijskim nizovima. Za provođenje ove metode potrebna je posebna oprema i obuka inspektora [28].



Slika 20. Primjena metode akustične emisije kod inspekcije čeličnih mostova [28]



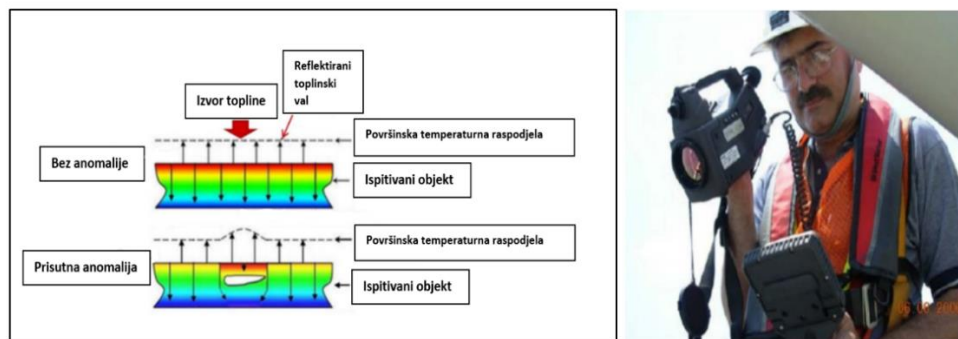
Slika 21. Princip rada metode akustične emisije pri inspekciji čeličnih mostova [28]

5.1.2.3. Infracrvena termografija

Infracrvena termografija je beskontaktna metoda određivanja raspodjele temperature na površini ispitivanog objekta mjerenjem nevidljivog infracrvenog zračenja koje taj objekt emitira. Ova metoda koristi infracrvene termalne kamere koje detektiraju IC zračenje te ga interpretiraju u obliku toplinske slike ili termograma. Dakle, korištenjem različitih oblika aktivne termalne pobude, moguće je detektirati anomaliju u elementima čeličnog mosta [28, 37].

Postupak se provodi tako da se primjenjuje izvor grijanja na elemente čeličnog mosta, najčešće sunčeva svjetlost. Ako je materijal jednoličan, odnosno ako u ispitivanom dijelu mosta nema nikakvih anomalija, toplinski signal će se glatko širiti kroz njega.

Međutim, ako je na ispitivanom dijelu mosta prisutna anomalija, toplinski signal će rezultirati naglim promjenama u površinskim raspodjelama temperature što će biti vidljivo na snimljenom termogramu (*Slika 22.*) [28].



Slika 22. Princip djelovanja infracrvene termografije te primjena infracrvene termalne kamere pri inspekciji čeličnih mostova [28]

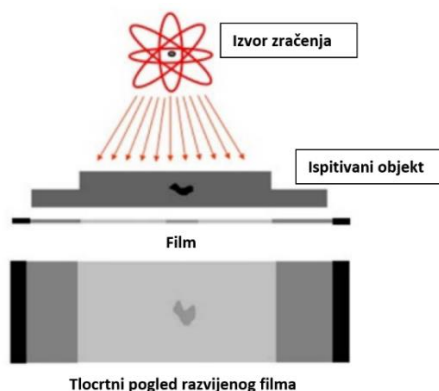
Prednost infracrvene termografije je to što pokriva više područja za inspekciju pa je vrlo učinkovita za preglede površinski velikih čeličnih mostova. Također, ovom metodom je moguće odrediti postotak oštećenog područja. Međutim, ispitna oprema korištena ovom metodom je izuzetno skupa i zahtijeva posebnu obuku inspektora, a sama metoda dosta ovisi o odgovarajućoj temperaturi okoline [28].

5.1.2.4. Radiografsko ispitivanje

Kod radiografskog ispitivanja se ispitivani objekt izlaže X ili γ -zrakama. Količina zračenja koju će ispitivani objekt apsorbirati ovisi o apsorpcijskim karakteristikama materijala od kojeg je objekt napravljen, kao i o gustoći i debljini samog objekta. Zračenje koje ispitivani objekt ne uspije apsorbirati stvara sliku na filmu ili fotosenzitivnom papiru tako što aktivira emulziju papira po kojem su raspoređeni sitni kristali srebrovog bromida. Ti kristali u kontaktu sa zračenjem mijenjaju fizikalna strukturu, a promjena nije vidljiva golim okom i poznata je kao latentna slika. Međutim, kada se izloženi film tretira kemijskom otopinom, tzv. razvijanjem, dolazi do kemijske reakcije pri čemu se formiraju sitne granule srebra crne boje, odnosno latentna slika postaje vidljiva.

Bilo kakve promjene u gustoći, debljini ili sastavu ispitivanog objekta uzrokuju variranje intenziteta apsorbiranog zračenja što se na filmu očitava kao razlika u fotografskoj gustoći tj. zacrnjenju (*Slika 23*) [38].

Uglavnom se koristi pri inspekciji zavarenih dijelova čeličnog mosta. Metoda je vrlo spora i skupa te vrlo opasna po zdravlje pa zahtijeva posebnu opremu i obuku za inspektore [28].



Slika 23. Princip rada radiografskog ispitivanja [28]

5.1.3. Metode primjenjive na kabele, tetive i užad od konstrukcijskog čelika

Strukturni vlačni elementi predstavljaju izazov prilikom njihove inspekcije i evaluacije. Većina ovih elemenata, kao što su kabele, tetive i užad od konstrukcijskog čelika, obavijeni su zaštitnim omotačem te su ispunjeni nekom vrstom materijala koja sprječava njihovu koroziju. Kao takvi, zahtijevaju primjenu inspekcijskih metoda koje imaju sposobnost prodiranja tih zaštita. U takve metode se ubrajaju curenje magnetskog polja, magnetostrikcija te vibracijsko ispitivanje. U ove metode se ubrajaju i već spomenute metode poput akustične emisije, radiografskog ispitivanja, ultrazvučnog ispitivanja te infracrvene termografije [28].

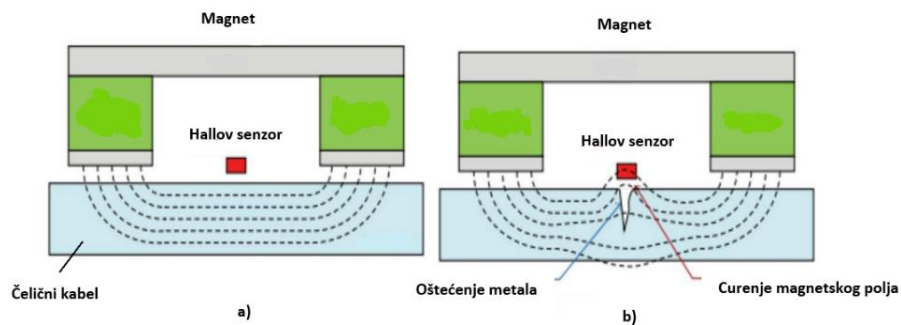
5.1.3.1. Curenje magnetskog polja

Metoda curenja magnetskog polja se provodi magnetiziranjem ispitivanog dijela čeličnog mosta jakim vanjskim magnetom koji može biti ili trajan ili električno aktiviran.

Između sonde magneta je prisutno magnetsko polje, a ukoliko silnice polja naiđu na bilo kakav defekt na ispitivanom elementu kao što su korozija ili puknuća materijala, one će nastojati zaobići oštećenje i pri tom će doći do curenja magnetskog polja.

Magnetski senzori, poput Hallovog senzora koji se postavljaju između polova magneta, registriraju pojavu curenja magnetskog polja.

Kod ispitivanja kabela čeličnih mostova koristi se modulirana magnetizirajuća i senzorska jedinica koja se pričvrsti za kabel duž kojeg dalje putuje detektirajući oštećenja. Metoda bi oduzimala 10 do 20 minuta po kabelu, ali zbog opsežne pripreme površine kabela jer se radi o intenzivnom elektromagnetskom polju, provođenje se produljuje na 1 dan po kabelu [28].



Slika 24. Metodologija curenja magnetskog polja kod: a) neoštećenog, b) oštećenog kabela čeličnog mosta [28]

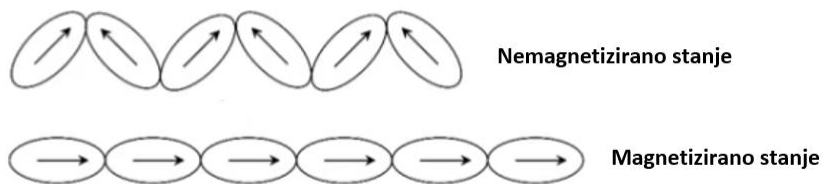


Slika 25. Primjena metode curenja magnetskog polja na kabel čeličnog mosta [28]

5.1.3.2. Magnetostrikcija

Magnetostrikcija je pojava pri kojoj se mijenjaju dimenzije tijela načinjenih od feromagnetičnih materijala pod utjecajem magnetskog polja. Struktura feromagnetičnih materijala je podijeljena u domene koje su nasumično orijentirane kada nema utjecaja magnetskog polja.

Međutim, kada se primijeni magnetsko polje, domene se rotiraju u smjeru magnetskog polja što dovodi do naprezanja i izduživanja materijala (*Slika 26.*) [39].



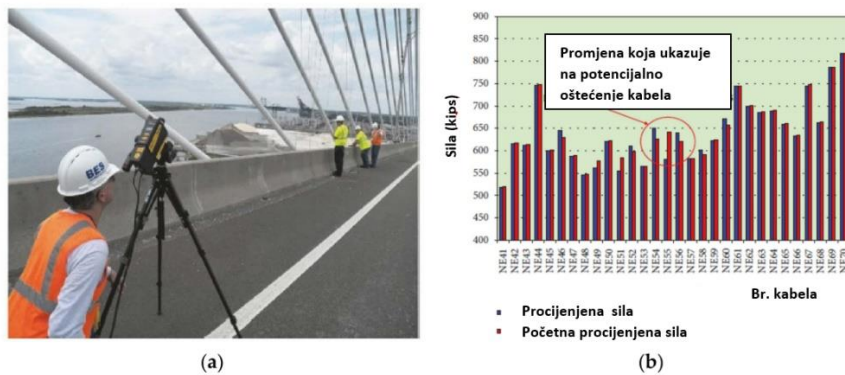
Slika 26. Orijentacija domena feromagnetičnih materijala u magnetiziranom i nemagnetiziranom stanju [39]

Temeljem toga, kod ispitivanja dijelova čeličnog mosta dolazi do malih promjena u fizičkim dimenzijama materijala kao posljedica djelovanja magnetskog polja, a naprezanja materijala stvaraju promjene u magnetizaciji. Kada se magnetsko polje oko ispitivanog čeličnog elementa mijenja, proizvodi se elastični val koji putuje duž kabela u oba smjera pritom modificirajući magnetsku indukciju materijala tako da proizvodi napon u primajućoj zavojnici. To stvaranje napona se može pratiti i tako koristiti pri otkrivanju defekata na elementima čeličnog mosta [28].

5.1.3.3. Vibracijsko ispitivanje

Vibracijska ispitivanja se temelje na snimanju vibracija kabela čeličnih mostova, nastalih djelovanjem okoline, pomoću laserskih zraka što omogućava snimanje iz daljine. Vibracijske karakteristike kabela, koje uključuju frekvenciju te omjer prigušenja, izračunavaju se analizom snimljenih vibracijskih zapisa te se pomoću njih određuje sila kabela. Procijenjena sila kabela se zatim uspoređuje s prethodno izmjerenim ili očekivanim silama kako bi se uspostavio obrazac promjena koji označava vrstu, intenzitet i mjesto mogućih oštećenja kabela čeličnog mosta. Prigušenje izmjereno ovom tehnikom se koristi pri određivanju osjetljivosti na različite efekte izazvane vjetrom kao i na druge oscilacije.

Najveća prednost ove metode je njezina mogućnost beskontaktnog očitavanja laserskim vibrometrom što olakšava periodične preglede teško pristupačnih elemenata čeličnog mosta (*Slika 27.*) [28].



Slika 27. a) Primjena laserskog vibrometra kod vibracijskog ispitivanja čeličnog kabela; b) graf usporedbe procijenjenih sila s očekivanim vrijednostima te detekcija oštećenja (1 kip, eng. kilo pound = 4448,2216 N) [28]

5.1.4. Nove metode u inspekciji čeličnih mostova

U ovom dijelu će biti riječi o novim NDT metodama koje se mogu implementirati pri inspekciji čeličnih mostova. Primjer je metoda digitalne obrade slika.

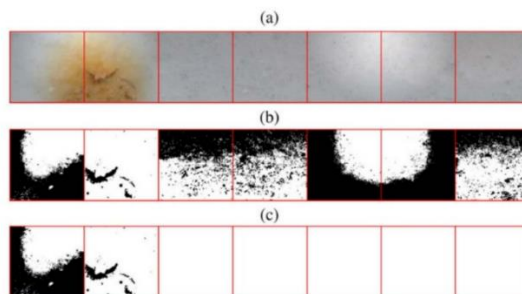
5.1.4.1. Metoda digitalne obrade slika

Metoda digitalne obrade slika uključuje inteligentni sustav sa sposobnošću da automatski detektira područja čeličnog mosta zahvaćena korozijom i to kroz obradu snimljenih fotografija mosta. U počecima su bile predstavljene dvije metode prepoznavanja različitih korozijskih oštećenja, NFRA metoda (eng. Neuro-Fuzzy Recognition Approach) te SKMA metoda (eng. Simplified K-Means Approach).

Prvi korak kod obiju metoda je pretvaranje izvorno snimljene fotografije u sliku sivih tonova gdje je siva nijansa izražena pomoću intenzitet svjetlosti od 0 do 255 (0 je crno, a 255 je bijelo) nakon čega se primijeni jedna od spomenutih metoda prepoznavanja. NFRA metoda koristi tehnike umjetne inteligencije pri odvajanju korozijskih piksela od pozadinskih piksela. SKMA metoda odvaja piksele ispitivanog objekta od pozadinskih piksela u digitaliziranoj slici koristeći statističku metodu, tzv. algoritam k-sredina (eng. k-means algorithm).

Međutim, NFRA i SKMA metoda nisu uspjele dati pouzdane rezultate u određenim uvjetima okoline. Naime, pretvaranje slika u slike sivih tonova je dovelo do lažnih indikacija zbog nedostatka razlike između korozivskih piksela i pozadine.

Kasnije se pokazalo da je implementacija slika u boji puno učinkovitija kod detekcije korozije jer je upravo boja njena najistaknutija karakteristika. Tako su nastale nove metode prepoznavanja korozije poput FT-DEDA metode (eng. Fourier Transform-based Defect Detection Approach) koja je primjenjiva za različite uvjete okoline. Ova metoda ima mogućnost obrađivanja slika premaza čeličnih mostova s različitim bojama pozadine, uključujući smeđe i crvene boje koje nisu bile primjenjive kod drugih metoda. Kako bi se riješila ograničenja FT-DEDA metoda pri razlikovanju korozije od drugih defekata, razvijena je još jedna, RUDERM metoda (eng. Rust Defect Recognition Methode). Ona koristi 3D prostor boja za razvoj spektra boja hrđe koji se koristi pri njenom razlikovanju od ostalih defekata. *Slika 28.* prikazuje usporedbu između SKMA metode te kombinacije RUDERM i SKMA metode. Jasno se može vidjeti da kombinacija obiju metoda pokazuje puno bolju točnost od samostalnog korištenja SKMA metode [28].



Slika 28. a) Originalna slika uz dodatak umjetnog svjetla; b) rezultati procesuirani za 1,75 s korištenjem SKMA metode uz postotak korozije od 43,67%; c) rezultati procesuirani za 1,18 s kombinacijom RUDERM i SKMA metode uz postotak korozije od 8,63% [28]

5.2. Primjena tehnologije robota u inspekciji čeličnih mostova

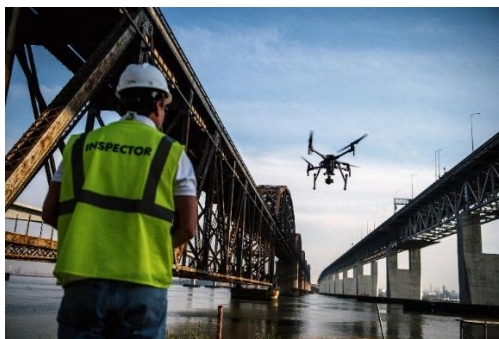
Provođenje inspekcija čeličnih mostova koji se nalaze na teško dostupnim lokacijama mogu predstavljati sigurnosni rizik za inspektore, ali i za širu javnost.

Također, mnoge inspekcijske metode zahtijevaju posebnu obuku inspektora što iziskuje vrijeme i resurse. Zato je sve popularnija postala primjena robota pri provođenju inspekcijskih metoda na čeličnim mostovima.

Automatizirana robotska oprema mora biti određene veličine i težine implementirajući pritom specifičan način prikupljanja podataka. Trenutno sve NDT metode inspekcije nemaju mogućnost robotiziranog provođenja. Ovisno o području ili komponenti čeličnog mosta koju je potrebno pregledati, koriste se zračni (dronovi) i roboti za čvrste podloge [28].

5.2.1. Zračni roboti (dronovi)

Dronovi imaju sposobnost doseći dijelove mosta koji su inspektorima inače nedostižni. Inspektor ih tako može kontrolirati pomoću daljinskog upravljača sa sigurne lokacije ne izlažući se riziku (Slika 29.). Također, vrijeme trajanja inspekcija se znatno smanjuje, manji su i troškovi zbog manjeg broja osoblja te nije potrebno zaustavljati promet na mostu. Međutim, postoje i neka ograničenja njihovog korištenja. Primjerice, nije moguće uklanjanje prepreka koje im se nađu na putu, kod velikih naleta vjetrova i oborina se javljaju poteškoće u letenju, imaju ograničeno trajanje baterije, a nedostatak signala otežava inspektoru povezivanje s dronom. Njihova primjena je još u fazi razvoja te se nastoji povećati broj NDT metoda koje bi ih mogle implementirati [28].

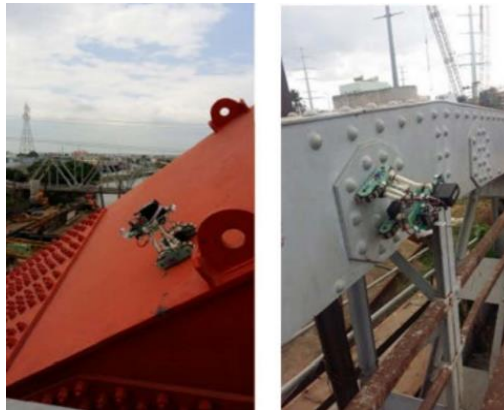


Slika 29. Primjena dronova u inspekciji čeličnih mostova [28]

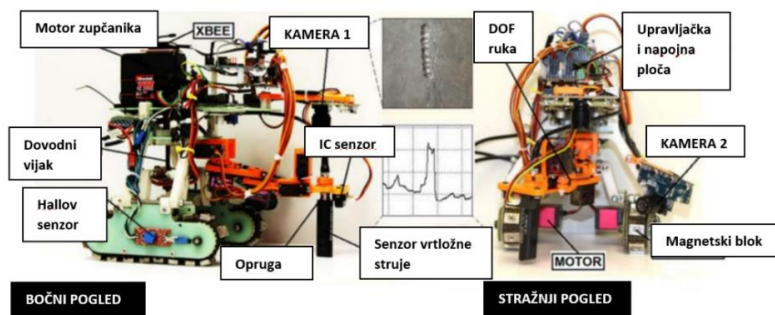
5.2.2. Roboti za čvrste podloge

Roboti za čvrste podloge čine većinu robotičke opreme korištene u inspekciji čeličnih mostova. Ovakvi roboti imaju sposobnost penjanja duž dijelova mosta dosežući tako teško pristupačna mjesta (*Slika 29.*). Osim toga, imaju sposobnost prelaženja prepreka koje im se nađu na putu kao što su unutarnji i vanjski kutovi, zidovi, vijci itd.

Različiti senzori se mogu implementirati u robotske sustave poput radara, vizualnih senzora (senzori s različitim vrstama kamera), akustički senzori (senzori za zvuk s mikrofonom ili ultrazvučni senzori) te električni senzori (senzori za varijacije napona i struje, npr. senzor vrtložnih struja). Podaci prikupljeni inspekcijom se direktno šalju inspektorima na obradu [28]. Prikaz opreme robota za čvrste podloge prikazan je na *Slici 31.*



Slika 30. Prikaz robota za čvrste podloge sa sposobnošću za penjanje duž dijelova čeličnog mosta prilikom inspekcije [28]



Slika 31. Prikaz opreme robota za čvrste podloge koji se primjenjuje u inspekciji čeličnih mostova [28]

6. ZAKLJUČAK

Korozija je štetno i nepoželjno raspadanje konstrukcijskog materijala uslijed atmosferskog djelovanja, pogotovo kada se javlja na čeličnim mostovima koji su važan faktor prometne infrastrukture. Osim što svojom pojavom može donijeti velike ekonomske gubitke, veći je problem to što predstavlja potencijalni sigurnosni rizik za širu javnost. Nažalost, ne postoji univerzalno rješenje kojim bi se proces korozije potpuno iskorijenio, ali ga je zato moguće usporiti. Zato se koriste različite metode zaštite čeličnih mostova kao što su premazi bogati cinkom, metalizacija toplinskim nastrcavanjem, vruće pocinčavnje, dupleksni premazi te primjena čelika otpornog na koroziju i vremenske uvjete kao što su nehrđajući čelik te COR-TEN čelik, kako bi se maksimalno očuvao integritet i funkcionalnost konstrukcije. Odabir najbolje metode zaštite uvelike ovisi o djelovanju okoline na lokaciji izgradnje mosta, zato je zadatak projektanta mosta da na temelju definiranih klasifikacija korozivnosti atmosfere odabere onu najučinkovitiju. Međutim, zaštite neće trajati vječno, stoga se provode periodične inspekcije, najčešće jednom u dvije godine, kako bi se pravovremeno mogla uočiti bilo kakva oštećenja i pritom spriječilo njihovo daljnje širenje. S obzirom da su inspeksijske metode podijeljene ovisno o mjestu pojave oštećenja na mostu, nerijetka je praksa da se primjenjuje više njih odjednom radi što kvalitetnijeg prikupljanja podataka. U novije vrijeme se inspektori sve više služe robotikom čime ostvaruju pristup inače nedostupnim dijelovima mosta, ali i ubrzavaju sam proces inspekcije.

7. LITERATURA

- [1] Stupnišek-Lisac, E., Otmačić Ćurković, H., Korozija i okoliš, FKIT, Zagreb, 2015.
- [2] Davis, J.R., Corrosion: Understanding the basics, ASM International, Ohio, 2000., str. 3
- [3] <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx> (pristup 13.08.2022.)
- [4] https://www.engineeringx.pitt.edu/uploadedFiles/Content/Sub_Sites/Consortiums/IRISE/Library/IRISE_Corrosion_Report_FINAL.pdf (pristup 13.08.2022.)
- [5] Horvat, M., Samardžić, I., Kondić, V., Napetosa korozija, *Teh. glas.*, **2** (2011.) 103-109
- [6] <https://www.corrosionpedia.com/7-things-to-know-and-understand-about-steel-corrosion/2/6892> (pristup 13.08.2022.)
- [7] https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/crevice_corrosion.htm (pristup 13.08.2022.)
- [8] <https://steelfabservices.com.au/crevice-corrosion/> (pristup 13.08.2022.)
- [9] https://bib.irb.hr/datoteka/843434.KEMIJSKA_POSTOJANOST.pdf (pristup 13.08.2022.)
- [10] Pratinco, H., Aging Treatment to Increase Erosion-Corrosion Resistance of AA6063 Alloys for Marine Application, *Procedia Earth Planet. Sci.*, **14** (2015.) 41-46
- [11] Kogler, R., Steel Bridge Design Handbook: Corrosion Protection of Steel Bridges, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 2015., str. 2-22
- [12] Kusmierek, E., Chrzescijanska, E., Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment, *Dat. of*, **3** (2015) 149-154
- [13] Otmačić Ćurković, H., Podjela korozije prema korozivnim sredinama, u: Predavanje iz kolegija Elektrokemijsko i korozijsko inženjerstvo-nastavni materijali
- [14] <https://www.abitl.com/abrasive-blasting-metal-finishing/> (pristup 15.08.2022.)
- [15] <https://galvanizeit.org/corrosion/corrosion-protection/zinc-coatings/zinc-rich-paint> (pristup 07.06.20222)
- [16] <https://kta.com/kta-university/inorganic-organic-zinc-rich-primers/> (pristup 07.06.2022.)
- [17] Gonzalez, R., Ashrafizdadeh, H., Lopera, A., Mertiny, P., McDonald, A., A Review of Thermal Spray Metallization of Polymer-Based Structures, *J. of Therm. Sp. Tech.*, **25** (2016.) 897-919
- [18] <http://www.cincaonahelena.hr/hot-dip-galvanizing-process/> (pristup 15.08.2022.)
- [19] <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/the-hdg-coating> (pristup 15.08.2022.)

- [20] https://www.steelconstruction.info/Weathering_steel (pristup 11.06.2022.)
- [21] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12974> (pristup 11.06.2022.)
- [22] <https://usbridge.com/what-is-weathering-steel/> (pristup 11.06.2022.)
- [23] <https://www.corten.com/what-is-corten-steel.html> (pristup 10.06.2022.)
- [24] <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/ssab-weathering/articles/a-weathering-steel-bridge-built-to-last-in-the-forests-of-finland> (pristup 15.08.2022.)
- [25] http://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html (pristup 11.06.2022.)
- [26] <https://www.tfgusa.com/types-of-stainless-steel/> (pristup 15.08.2022.)
- [27] <https://www.britannica.com/technology/stainless-steel> (pristup 15.08.2022.)
- [28] Khedmatgozar Dolati, S.S., Caluk, N., Mehrabi, A., Khedmatgozar Dolati, S.S., Non-Destructive Testing Applications for Steel Bridges, *Appl. Sci.*, **11**(2021.) 9757
- [29] <https://whatispiping.com/dye-penetration-test/> (pristup 16.08.2022.)
- [30] <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Magnetic-particle-inspection-MPI/> (pristup 16.08.2022.)
- [31] <https://www.kontrolltechnik.com/methods/eddy-current-principle> (pristup 16.08.2022.)
- [32] <https://www.rosengroup.com/global/company/explore/wecan/technologies/measurement/eddy-current.html> (pristup 16.08.2022.)
- [33] <https://www.flyability.com/ultrasonic-testing> (pristup 16.08.2022.)
- [34] <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/index.xhtml> (pristup 16.08.2022.)
- [35] Florence, S.E., Samsingh, R.V., Babureddy, V., Artificial intelligence based defect classification for weld joints, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **402** (2018.) 012159
- [36] <https://www.flyability.com/acoustic-emission-testing> (pristup 16.08.2022.)
- [37] Glavaš, H., Barić, T., Stojkov, M., Primjena infracrvene termografije u tehničkim sustavima, 8. međunarodni skup o prirodnom plinu, toplini i vodi, Osijek, Hrvatska, 2017., str. 401.
- [38] International Atomic Energy Agency, Non-destructive Testing, IAEA, Beč, 1999., str. 86-91
- [39] <https://www.slideshare.net/PreethiSureshkumar1/magnetostriction-and-application-of-ultrasonic-waves> (pristup 18.08.2022.)