

# Zaštita čelične konstrukcije transformatorskog kotla

---

Popović, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:255373>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Luka Popović

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentorica:  
Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:  
Luka Popović

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

U izradi rada svojim stručnim savjetima i uputama pomogla mi je mentorica prof. dr. sc. Vera Rede te joj iskreno zahvaljujem. Također zahvaljujem na korisnim savjetima asistentici Heleni Lukšić mag. ing.

Zahvaljujem kolegama iz tvrtke Končar - Metalne konstrukcije d.o.o na njihovom stručnom znanju i literaturi koja mi je pomogla u izradi diplomskog rada.

Luka Popović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
 Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
 mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Popović**

JMBAG: 0035210386

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zaštita čelične konstrukcije transformatorskog kotla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Protection of the transformer tank steel structure**

Opis zadatka:

Transformatorski kotlovi su složene konstrukcije koje tijekom svog životnog vijeka moraju podnijeti vrlo specifična opterećenja. Osim zadovoljenja zahtjeva koji se odnose na mehaničku otpornost, traži se i odgovarajuća korozivna postojanost, a čelici od kojih se ovi kotlovi najčešće izrađuju trebaju imati i dobru zavarljivost, obradivost odvajanjem čestica te deformabilnost.

U diplomskom radu potrebno je opisati čelike koji se koriste u proizvodnji transformatorskih kotlova te postupak korozivne zaštite nanošenjem premaza i normativne dokumente koji se na to odnose.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je prikazati kako se priprema površina čelika za nanošenje premaza, na temelju čega se bira odgovarajući premaz, kako se nanosi te kako se obavlja nadzor i kontrola premaza u proizvodnji.

Zadatak zadan:

7. ožujka 2024.

Datum predaje rada:

9. svibnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadala: *Rede*  
 Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:  
 Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

1. Općenito o transformatorskim kotlovima.....	1
1.1. Podjela transformatora prema veličini .....	1
1.2. Podjela transformatora prema namjeni .....	4
2. Materijali u proizvodnji transformatorskih kotlova.....	5
2.1. Mehanička naprezanja.....	5
2.2. Okolišni uvjeti.....	5
2.3. Tehnološki uvjeti.....	5
2.4. Ekonomski i društveni uvjeti .....	6
2.5. Sistematizacija materijala za transformatorske kotlove.....	6
2.5.1. Opći konstrukcijski čelici (nelegirani za nosive konstrukcije).....	7
2.5.2. Čelici za tlačne namjene .....	17
2.5.3. Plosnati proizvodi za hladno oblikovanje.....	18
2.5.4. Nehrđajući čelici za transformatorske kotlove.....	21
2.6. Tehničko dobavni uvjeti i atesti materijala .....	23
2.6.1. Tehničko dobavni uvjeti .....	23
2.6.2. Certifikati materijala prema normi HRN EN 10204 [18] .....	25
3. Klasifikacija korozijskih procesa.....	26
3.1. Prema mehanizmu procesa.....	26
3.1.1. Kemijska korozija .....	26
3.1.2. Elektrokemijska korozija .....	26
3.2. Prema obliku razaranja (geometriji) .....	26
3.2.1. Opća korozija .....	27
3.2.2. Lokalna korozija .....	27
3.2.3. Selektivna korozija.....	30
3.2.4. Interkristalna korozija .....	31
3.3. Mehanizmi zaštite od korozije .....	32
3.3.1. Odabir materijala.....	32
3.3.2. Zaštitna prevlakama .....	33

3.3.3.	Zaštita inhibitorima korozije.....	35
3.3.4.	Električne metode zaštite .....	36
4.	Korozijska zaštita nanošenjem premaza.....	38
4.1.	Komponente premaza .....	38
4.1.1.	Veziva .....	38
4.1.2.	Pigmenti .....	40
4.1.3.	Otapala .....	40
4.1.4.	Aditivi i punila .....	41
4.2.	Sustav premaza .....	41
4.2.1.	Temeljni sloj .....	42
4.2.2.	Međusloj .....	42
4.2.3.	Završni sloj.....	42
5.	Postupak korozijske zaštite transformatorskog kotla nanošenjem premaza.....	43
5.1.	Priprema površine proizvoda .....	43
5.1.1.	Stupnjevi pripreme površine proizvoda prema normi HRN EN ISO 8503-1 [33] 43	
5.1.2.	Stupnjevi pripreme površine čelika prema normi HRN EN ISO 8501-3 [35]....	46
5.2.	Nanošenje sustava premaza .....	52
5.2.1.	Predradnje za nanošenje premaza .....	53
5.2.2.	Nanošenje temeljnog premaza .....	54
5.2.3.	Nanošenje međuslojnih premaza .....	54
5.2.4.	Nanošenje završnog premaza.....	55
6.	Odabir sustava premaza u skladu s normom HRN EN ISO 12944.....	58
6.1.	Uvod.....	58
6.2.	Oblikovanje konstrukcije .....	59
6.3.	Vijek trajanja sustava premaza .....	59
6.4.	Okolišni uvjeti.....	60
6.5.	Primjer specifikacije za korozijsku zaštitu transformatorskog kotla .....	62
7.	Nadzor i kontrola korozijske zaštite u proizvodnji transformatorskog kotla .....	64
7.1.	Površina.....	64
7.1.1.	Stupnjevi pripreme prema normi HRN EN ISO 8501-3.....	64

---

7.1.2.	Stupnjevi pripreme površine prema normi HRN EN ISO 8501-1 .....	65
7.1.3.	Hrapavost površine .....	69
7.2.	Debljina suhog filma.....	70
7.3.	Test prijanjanja Pull-off sukladno normi HRN EN ISO 4625:2016 [44] .....	72
7.4.	Test adhezije Cross-cut test HRN EN ISO 2409 [45].....	73
7.5.	Finalni vizualni pregled .....	74
8.	ZAKLJUČAK.....	78



**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Veliki transformatorski kotao (LPT) [1] .....	2
Slika 2.	Srednji transformatorski kotao (MPT) [1].....	3
Slika 3.	Mali transformatorski kotao (SPT) [1].....	3
Slika 4.	Čelik s 0,1 % C [5] .....	8
Slika 5.	Čelik s 0,25 %C [5] .....	9
Slika 6.	Označavanje općih konstrukcijskih čelika prema normi HRN EN 10027-1 [3]...	10
Slika 7.	Ploče od čelika oznake S235JR [8] .....	16
Slika 8.	Označavanje čelika za tlačne namjene prema normi HRN EN 10027-1 [3].....	17
Slika 9.	Cijevi od čelika P235TR1 [9].....	18
Slika 10.	Označavanje čelika za plosnate proizvode za hladno oblikovanje prema normi HRN EN 10027-1 [3] .....	19
Slika 11.	Čelik za plosnate proizvode za hladno oblikovanje DC01 [11] .....	20
Slika 12.	Mikrostruktura čelika X6CrNiMoTi17–12–2 [12].....	22
Slika 13.	Ravnomjerni gubitak debljine stijenke izazvan općom korozijom [21].....	27
Slika 14.	Sheme tipova lokalne korozije: a) pjegasta, b) rupičasta, c) potpovršinska, d) kontaktna [22].....	28
Slika 15.	Rupičasta korozija [23] .....	29
Slika 16.	Poprečni presjek potpovršinske korozije [25] .....	29
Slika 17.	Shematski prikaz kontaktne korozije [20].....	30
Slika 18.	Prikaz selektivne korozije vretena [21] .....	31
Slika 19.	Shematski prikaz interkristalne korozije nehrđajućih čelika [20] .....	32
Slika 20.	Podest zaštićen vrućim uranjanjem .....	34
Slika 21.	Formiranje oksidnog sloja na aluminiju postupkom anodizacije [26] .....	35
Slika 22.	Katodna zaštita žrtvenom anodom (lijevo) i katodna zaštita narintom strujom (desno) [22] .....	36
Slika 23.	Shematski prikaz komponenata premaza [30].....	38
Slika 24.	Sušenje oksidacijom [28] .....	39
Slika 25.	Fizikalno sušenje[28] .....	39
Slika 26.	Kemijsko sušenje [28] .....	39
Slika 27.	Oblici čestica pigmenta [29].....	40
Slika 28.	Shematski prikaz sustava premaza[30] .....	41

Slika 29.	Prikaz razlike laminarnih i klasičnih pigmenata [32].....	42
Slika 30.	Pogreške u zavarima u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36].....	47
Slika 31.	Pogreške na rubovima u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36] .....	48
Slika 32.	Općenite pogreške na površini u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36] .....	49
Slika 33.	Završne dorade transformatorskog kotla prije čišćenja mlazom abraziva .....	50
Slika 34.	Neki alati za metodu ručnog čišćenja [37] .....	51
Slika 35.	Ispuhivanje zaostale sačme komprimiranim zrakom .....	52
Slika 36.	Miješanje temeljnog premaza.....	53
Slika 37.	Nanošenje međusloja na teško dostupna .....	55
Slika 38.	Transformatorski kotao u fazi sušenja premaza .....	56
Slika 39.	Proces odabira sustava premaza sukladno normi HRN EN ISO 12944 [39] .....	59
Slika 40.	Konstruktivna rješenja koja treba izbjegavati [39] .....	59
Slika 41.	Neke greške pronađene vizualnom kontrolom.....	65
Slika 42.	Trake za Dust-test na različitim lokacijama .....	66
Slika 43.	Izvešće Dust testa prema ISO 8502-3 .....	67
Slika 44.	Brestle test .....	68
Slika 45.	Komparator za kontrolu profila hrapavosti .....	69
Slika 46.	Izmjera debljine boje .....	70
Slika 47.	Pull off test .....	72
Slika 48.	Cross-cut test .....	73
Slika 49.	Oštećenja površine .....	75
Slika 50.	Rupice u završnom sloju .....	75
Slika 51.	Nezatvoren film na nepristupačnim mjestima.....	76
Slika 52.	Ostale greške pronađene u finalnoj kontroli.....	76

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Skupine čelika prema namjeni, mehaničkim i fizikalnim svojstvima [3] .....	7
Tablica 2. Podaci o mehaničkim svojstvima S235 iz norme EN 10025-2 [7] .....	12
Tablica 3. Podaci o kemijskom sastavu S235 iz norme EN 10025-2 [7] .....	13
Tablica 4. Podaci o mehaničkim svojstvima S355 iz norme EN 10025-2 [7] .....	14
Tablica 5. Podaci o kemijskom sastavu S355 iz norme EN 10025-2 [7] .....	15
Tablica 6. Rangiranje početnih stanja površine čelika prema normi HRN EN ISO 8503-1 [34] .....	44
Tablica 7. Standardni stupnjevi pripreme površine metodom abrazivnog čišćenja [34] .....	45
Tablica 8. Standardni stupnjevi pripreme površine metodom ručnog čišćenja [34] .....	45
Tablica 9. Korelacija između stupnjeva pripreme i kategorije korozivnosti prema EN ISO 8501-3, Aneks A [36] .....	46
Tablica 10. Najdulje vrijeme čekanja između čišćenja i nanošenja premaza [36] .....	52
Tablica 11. Dijelovi norme HRN EN ISO 12944 [39] .....	58
Tablica 12. Vremenski okviri trajnosti [38] .....	60
Tablica 13. Temeljne kategorije korozivnosti koje se odnose na atmosfersku koroziju [34] ..	61
Tablica 14. Kategorije korozivnosti za konstrukcije uronjene u vodu ili tlo [34] .....	62
Tablica 15. Zahtjevi specifikacije korozijske zaštite [36] .....	63
Tablica 16. Rezultati mjerenja debljine suhog filma [36] .....	71

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$C_e$	%	uglični ekvivalent
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$R_z$	$\mu\text{m}$	Hrapavost površine

## **SAŽETAK**

U diplomskom radu opisani su transformatorski kotlovi, uvjeti njihovog rada te osnovna podjela prema veličini i namjeni. Navedeni su i opisani čelici koji se koriste u proizvodnji transformatorskih kotlova, najvažniji korozijski procesi kojima čelici mogu biti izloženi te mehanizmi zaštite od korozije. Detaljno je opisan postupak korozijske zaštite nanošenjem premaza i prateći normativni dokumenti. Na konkretnom primjeru prikazane su sve faze postupka nanošenja premaza, od odabira prikladnog sustava preko pripreme površine čelika i nanošenja premaza do nadzora i kontrole kvalitete. Naglašena je važnost pridržavanja propisa i pratećih normi kako bi se osigurala unificiranosti i ponovljivost te postigla kvalitetna i dugotrajna zaštita čelične konstrukcije transformatorskog kotla.

Ključne riječi: transformatorski kotao, zaštita od korozije, sustav premaza

## **SUMMARY**

In this thesis, transformer tanks are described, along with their operating conditions and basic classification according to size and purpose. The steels used in the production of transformer tanks are listed and described. Crucial corrosion processes to which steels may be exposed to, and mechanisms of corrosion protection are explained as well. The process of corrosion protection with coatings is described in detail, along with accompanying normative documents. Using a specific example, all steps of the coating application process are presented, from selecting an appropriate system, preparing the steel surface, applying the coating, to quality control and supervision. The importance of compliance with regulations and accompanying standards is emphasized to ensure uniformity, repeatability with the goal to achieve quality and long-lasting protection of the steel structure of the transformer tank.

Keywords: transformer tank, corrosion protection, paint system

## 1. Općenito o transformatorskim kotlovima

Transformatorski kotlovi koriste se u energetske mrežama svuda po svijetu. Koriste se u elektranama, postrojenjima, zgradama, vlakovima, vjetroelektranama i drugdje. Njihova funkcija vrlo je jednostavna. Transformatorski kotlovi povisuju ili snižavaju napon i jakost struje za svrhu transporta energije.

Postoje razni tipovi transformatora koji su konstruirani za brojne specifične primjene, stoga se transformatorski kotlovi mogu kategorizirati na različite načine.

Prema osnovnoj podjeli transformatorski kotlovi mogu se svrstati u tri kategorije:

- distributivni transformatorski kotlovi
- reaktori
- energetske transformatorski kotlovi.

U daljnjem tekstu fokus će biti na energetske transformatorske kotlove. Radi jednostavnijeg razumijevanja za energetske transformatorske kotlove koristit će se naziv transformatorski kotlovi.

Najčešća podjela transformatorskih kotlova je podjela s obzirom na veličinu. Bitno je napomenuti da je ova podjela nastala kada su veličina transformatora i nazivna snaga bili proporcionalni, iako to danas više nije uvijek tako. Osim prema veličini, transformatorski kotlovi dijele se i prema namjeni [1].

### 1.1. Podjela transformatora prema veličini

Podjela prema veličini nije uvijek jednoznačna budući da različiti proizvođači koriste drugačije raspone snage i napona za svrstavanje u neku od kategorija. Svaki proizvođač dijeli svoj portfolio proizvoda prema tržištu koje opskrbljuje tako da kriterij veličine koji bi predstavljao granicu za raspodjelu u određenu kategoriju nije precizno definiran [1].

- **Veliki transformatorski kotlovi (engl. Large Power Transformers, LPT)**

U ovu grupu svrstavaju se transformatorski kotlovi nazivne snage iznad 200 MVA i naponom do iznad 220 kV. Jedan od najvećih transformatorskih kotlova ima snagu od 587 MVA i napon od 1100 kV [1].

Slika 1. prikazuje kotao iz skupine veliki transformatorski kotlovi.



**Slika 1. Veliki transformatorski kotao (LPT) [1]**

- **Srednji transformatorski kotlovi (engl. Medium Power Transformers, MPT)**

U ovu grupu svrstavaju se transformatorski kotlovi s rasponom nazivne snage od 60 do 200 MVA i naponom do 275 kV [1].

Slika 2. prikazuje kotao iz skupine srednji transformatorski kotlovi.





Slika 2. Srednji transformatorski kotao (MPT) [1]

- **Mali transformatorski kotlovi (engl. Small Power Transformers, SPT)**

U ovu grupu svrstavaju se transformatorski kotlovi s rasponom nazivne snage od 10 do 60 MVA i naponom do 170 kV [1].

Slika 3. prikazuje kotao iz skupine mali transformatorski kotao.



Slika 3. Mali transformatorski kotao (SPT) [1]

## 1.2. Podjela transformatora prema namjeni

Prema namjeni transformatorski kotlovi mogu biti podijeljeni u nekoliko grupa:

- **Transformatori za povećanje napona**

Ova skupina transformatora ključan je dio elektrana. Povezuju generator elektrane s mrežom. Oni pretvaraju napon generatora na razinu koja je prikladna za transport u mreži [1].

- **Transformatori za smanjenje napona**

Ova skupina transformatora ključan je dio za distribuciju električne energije. Smanjuju napon mreže na niže vrijednosti prikladne za danju distribuciju [1].

- **Transformatori za promjene faza**

Ova skupina transformatora smatra se najkompleksnijom. Njihova je namjena kontrola protoka između paralelnih dalekovoda ili dva neovisna energetska sustava [1].

- **Transformatori za visokonaponsku pretvorbu (engl. High-Voltage Direct Current, HVDC)**

Ova skupina transformatora su zapravo transformatori izmjenične struje (engl. Alternating Current, AC). Oni pretvaraju izmjeničnu visokonaponsku struju u istosmjernu [1].

## 2. Materijali u proizvodnji transformatorskih kotlova

U proizvodnji metalnih konstrukcija odabir materijala ovisi o zahtjevima koji se postavljaju na proizvod. To mogu biti mehanički zahtjevi, zahtjevi s obzirom na okolinu u kojoj će se konačni proizvod nalaziti (eksploatacijski uvjeti), tržišne, društvene i ekološke karakteristike.

### 2.1. Mehanička naprezanja

Transformatorski kotlovi su stacionarni tijekom cijelog životnog vijeka. Sva mehanička naprezanja kojima su izloženi proizlaze od eklektičnih i toplinskih faktora kojima je transformator izložen. Prema nekim istraživanjima oko 29 % svih kvarova prouzročeno je unutarnjim (električnim) poremećajima. Zbog toga se prilikom konstruiranja nastoje izbjeći ovakvi kvarovi. Osim unutarnjih poremećaja postoje i vanjski poremećaji (curenje ulja, deformacija stranica i sl.) koje također treba uzeti u obzir [2].

Većina električnih poremećaja kao rezultat ima prolazak visokih struja kroz namotaje. Prilikom konstruiranja transformatora bitno je da konstrukcija može izdržati najkritičnija naprezanja koja nastaju kada dođe do kratkog spoja. Prilikom kratkog spoja javljaju se sile koje su od 8 do 10 puta veće nego pri normalnim radnim uvjetima. Kako bi se postigla željena mehanička otpornost transformatora, konstruktor kombiniranjem materijala i konstrukcijskih rješenja dobiva optimalnu izvedbu. Osim sila koje djeluju, prilikom konstruiranja uzima se u obzir i funkcija određenih dijelova te njihov utjecaj na rad samog transformatora. Primjerice, iznosi magnetskih strujanja ovise o primjeni čelika koji pokazuju ili ne pokazuju feromagnetična svojstva [2].

### 2.2. Okolišni uvjeti

Jedan od značajnih čimbenika pri odabiru materijala osim, mehaničkih svojstava je i otpornost na okolišne uvjete. Lokacija i agresivnost okoliša za koji se transformator konstruira utječe na izbor materijala i način njegove zaštite. Korozivni intenzitet okoliša svrstava se u različite razrede koji su definirani normom [2].

### 2.3. Tehnološki uvjeti

Bitni tehnološki zahtjevi pri proizvodnji i izradi transformatorskog kotla su: obradljivost odvajanjem čestica i oblikovljivost kako bi se mogli proizvesti pojedinačni dijelovi te zavarljivost kako bi te iste dijelove mogli spojiti u konačan proizvod [2].

## 2.4. Ekonomski i društveni uvjeti

Pri izboru optimalnog materijala uzimaju se u obzir i ograničenja tržišta, postizanje konkurentnije cijene, mogućnost recikliranja, a u novije vrijeme i zakonska ograničenja [2].

## 2.5. Sistematizacija materijala za transformatorske kotlove

Čelici se upotrebljavaju uglavnom kao polazni materijal u proizvodnji transformatora za izradu pojedinačnih dijelova ili većih metalnih konstrukcija. Koriste se u različitim stanjima kao što su primjerice normalizirano ili hladno preoblikovano. Različite vrste čelika mogu imati različit kemijski sastav i vrlo različite vrijednosti svojstava kao što su: granica razvlačenja, udarni rad loma, ugljični ekvivalent, i dr.

Kada su u pitanju mehanička svojstva konstrukcijskih čelika zahtjeva se prihvatljiva granica razvlačenja, visoka žilavost (s ciljem smanjenja mogućnosti pojave krhkog loma), visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama te otpornost na umor materijala. Također, konstrukcijski čelici moraju biti dovoljno kemijski postojani, otporni na abraziju i trebaju ispunjavati zahtjeve tehnoločnosti (obradivost odvajanjem čestica, zavarljivost, hladna oblikovljivost).

Za transformatorske kotlove koriste se čelici zajamčenih mehaničkih i fizikalnih svojstava bez propisanog kemijskog sastava te čelici propisanog kemijskog sastava, prema normi HRN EN 10027-1 [3].

Od svih 11 skupina konstrukcijskih čelika zajamčenih mehaničkih svojstava i navedenih u normi, za proizvodnju transformatorskih kotlova koriste se sljedeće tri skupine:

- opći konstrukcijski čelici
- čelici za tlačne namjene
- plosnati proizvodi za hladno oblikovanje.

U tablici 1. istaknute su tri skupine čelika koji se koriste za izradu transformatorskih kotlova.

Tablica 1. Skupine čelika prema namjeni, mehaničkim i fizikalnim svojstvima [3]

REDNI BROJ	NAZIV SKUPINE ČELIKA	OZNAKA
1	Opći konstrukcijski čelici	S
2	Čelici za tlačne namjene	P
3	Čelici za cjevovode	L
4	Čelici za strojogradnju	E
5	Čelici za armiranje betona	B
6	Čelici za prednapinjanje betona	Y
7	Čelici za tračnice ili u obliku tračnica	R
8	Hladno valjani plosnati proizvodi od čelika povišene čvrstoće za hladno oblikovanje	H
9	<b>Plosnati proizvodi za hladno oblikovanje</b> (osim onih pod 8)	<b>D</b>
10	Limovi i trake za pakiranje	T
11	Elektrolim i elektrotraka	M

Od čelika zajamčenog kemijskog sastava za izradu transformatorskih kotlova koriste se:

- specijalni nehrđajući konstrukcijski čelici.

### 2.5.1. Opći konstrukcijski čelici (nelegirani za nosive konstrukcije)

Opći konstrukcijski čelici su najveća skupina konstrukcijskih čelika, od 65 do 80 % ukupne proizvodnje čelika. Najčešće se koriste za izradu zavarenih konstrukcija velikih masa. U ovu skupinu ubrajaju se čelici koji se koriste za izradu vlakova, brodova, mostova dizalica, transformatora i sl.

Zahtjevi koje ova skupina čelika mora ispunjavati su dovoljna nosivost i sigurnost koja se ostvaruje dovoljnim iznosima granice razvlačenja ( $R_e$ ), vlačnom čvrstoćom ( $R_m$ ), žilavosti, tlačnom, savojnom i smičnom čvrstoćom. Budući da se ova skupina koristi za izradu zavarenih konstrukcija važno tehnološko svojstvo je zavarljivost.

Dobra zavarljivost uvjetovana je vrijednošću ugljičnog ekvivalenta ( $C_e$ ). Za izračun ugljičnog ekvivalenta postoji više formula, najčešće se koristi sljedeća: [4]

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (1)$$

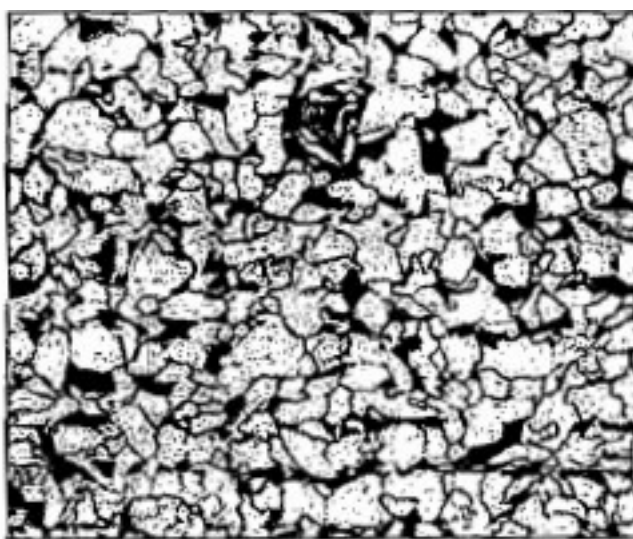
Ovisno o iznosu  $C_e$  procjenjuje se zavarljivost:

- $C_e < 0,25$  – dobra zavarljivost
- $0,25 < C_e \leq 0,35$  – zadovoljavajuća zavarljivost
- $0,35 < C_e \leq 0,45$  – ograničena zavarljivost
- $C_e > 0,45$  – vrlo loša zavarljivost.

Iako kemijski sastav ovih čelika nije propisan, poznato je da maseni udio ugljika ne prelazi vrijednost od oko 0,2 %. Udio nečistoća (P, S, N) treba biti što niži kao i udio uključaka (fosfida, sulfida) kako bi se smanjila opasnost od krhkog loma. Također, čelici trebaju biti smireni ili posebno smireni.

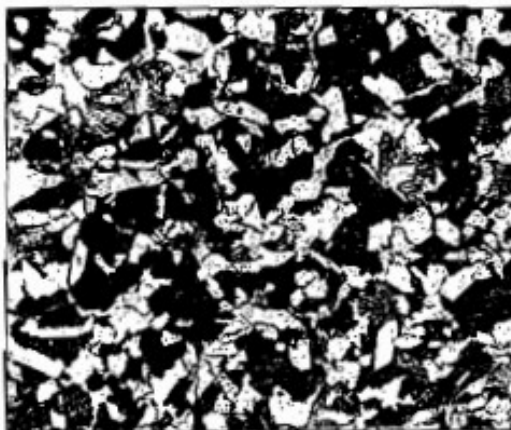
Opći konstrukcijski čelici imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu. Veličina zrna je manja ukoliko je čelik bio normaliziran nakon toplog oblikovanja. Obično se sitnozrnatost povećava posebnim smirivanjem uz dodavanje aluminija koji stvara aluminijev nitrid i sprječava daljnji rast austenitnog zrna [5].

Na slici 4 prikazana je mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika s 0,1 % ugljika. Tamna kristalna zrna su perlit, a svijetla zrna su ferit. S obzirom na vrlo niski maseni udio ugljika, ferita ima puno više nego perlita.



Slika 4. Čelik s 0,1 % C [5]

Na slici 5 prikazan je opći konstrukcijski čelik s 0,25 % ugljika. U odnosu na čelik s 0,1 % ugljika, ima viši volumni udio perlita, ali i dalje puno manji od udjela ferita.



Slika 5. Čelik s 0,25 %C [5]

Temperatura uporabe općih konstrukcijskih čelika je u rasponu od – 40 do 50 °C. S obzirom na veliku sigurnost od krhkog loma koja se traži od ove skupine čelika, u dijelu dodatna oznake za čelik, navode se podaci za zajamčeni udarni rad loma pri radnoj temperaturi, Slika 6.

Čelici označeni prema njihovoj primjeni te mehaničkim i fizikalnim svojstvima						
Opći konstrukcijski čelici						
Glavna oznaka		Dodatne oznake za		Dodatne oznake za		
G	S	n	n	n		
		an .....		+an +an .....		
Glavne oznake		Dodatne oznake				
slovo	mehaničko svojstvo	za čelik		za čelični proizvod		
G = čelični ljev (gdje je potrebno)  S = konstrukcijski čelik	nnn = min granica razvlačenja ( $R_e$ ), N/mm <sup>2</sup> za područje najmanjih debljina	grupa 1 <sup>2)</sup>		grupa 2 <sup>3)</sup>		
		Udarni rad loma, J	Ispit. temp. °C			
		27 J	40 J	60 J	C = posebno hladno obradljivo D = za prevlake vrućim uranjanjem E = za emajliranje F = za kovanje H = šuplji profili L = za snižene temperature M = termomehanički valjano N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano O = Offshore P = za žmurje Q = poboljšano S = za brodogradnju T = za cijevi W = otporan na atmosferilije  an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata, npr. Cu, ako je potrebno zajedno s jednoznačnim brojem koji je 10 × srednja vrijednost (zaokružena na 0,1 %) propisanog područja masenog udjela tog elementa	
		JR	KR	LR		20
		J0	K0	L0		0
		J2	K2	L2		-20
		J3	K3	L3		-30
		J4	K4	L4		-40
		J5	K5	L5		-50
		J6	K6	L6		-60
		A = otvrdnuto izlučivanjem M = termomehanički valjano N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano Q = poboljšano G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojeke				
1) n = brojni znak, a = abecedni znak, an = abecedno brojni (alfanumerički) znak						
2) Oznake A, M, N i Q u grupi 1 vrijede za sitnozrnate čelike						
3) Oznake grupe 2, osim kemijskih znakova, mogu biti upotpunjene s jednom ili dvije brojke u svrhu razlikovanja kvalitete prema pripadajućoj normi za proizvod						

Slika 6. Označavanje općih konstrukcijskih čelika prema normi HRN EN 10027-1 [3]

U proizvodnji transformatorskih kotlova iz ove skupine čelika najčešće se primjenjuju čelici oznake S235JR, S235J0, S235J2, S355JR, S355J0 i S355J2. svi navedeni čelici imaju zajamčen udarni rad loma od 27 J na -20 °C, 0 °C, 20 °C.

### Opći konstrukcijski čelici oznaka S235JR, S235J0, S235J2

Ovi su čelici namijenjeni za zavarene konstrukcije, nosive i dinamički opterećene konstrukcije kao što su platforme, tornjevi, dijelovi strojeva. Slovo S u nazivu, kao što je ranije objašnjeno, znači „Structural“ odnosno prevedeno, konstrukcijski. Minimalna granica razvlačenja ovih čelika, za područje najmanjih debljina, iznosi 235 MPa.

U tablici 2 i 3 nalaze se podaci o mehaničkim svojstvima i kemijskom sastavu izvučeni iz norme HRN EN 10025-2 [6].



***Opći konstrukcijski čelik S355JR, S355J0 i S355J2***

Kao i prethodna skupina, ovi se čelici koriste za iste namjene. Osnovna je razlika ta što ima bolja mehanička svojstva pa je njihova primjena uobičajena u konstrukcijama gdje postoje viša opterećenja.

U tablici 4 i 5 nalaze se podaci o mehaničkim svojstvima kemijskom sastavu izvučeni iz norme HRN EN 10025-2 [6]

Tablica 2. Podaci o mehaničkim svojstvima S235 iz norme EN 10025-2 [7]

	Minimalna granica elastičnosti [Mpa]						Rastezna čvrstoća [Mpa]	Minimalno produljenje = $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ (%)				udarni rad loma		
TIP ČELIKA	Nominalna debljina [mm]						Nominalna debljina [mm]		Nominalna debljina [mm]				Temperatura	Minimalna absorbirana energija
	$\leq 16$	> 16 $\leq 40$	> 40 $\leq 63$	> 63 $\leq 80$	> 80 $\leq 100$	> 100 $\leq 125$	> 3 $\leq 100$	> 100 $\leq 125$	> 3 $\leq 40$	> 40 $\leq 63$	> 63 $\leq 100$	> 100 $\leq 125$	[C°]	[J]
S235J0	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	0	27	
S235J2	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	- 20	27	
S235JR	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	20	27	

**Tablica 3. Podaci o kemijskom sastavu S235 iz norme EN 10025-2 [7]**

Analiza sastava													
	Maksimalni udio ugljika [%]			Mn max [%]	Si max [%]	P max [%]	S max [%]	N max [%]	Cu max [%]	Ostalo max [%]	Ce max [%]		
Vrsta čelika	Nominalna debljina [mm]										Nominalna debljina [mm]		
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40								≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 125
S235J0	0,17	0,17	0,17	1,4	-	0,04	0,04	0,01	0,55	-	0,35	0,35	0,38
S235J2	0,17	0,17	0,17	1,4	-	0,03	0,03	-	0,55	-	0,35	0,35	0,38
S235JR	0,17	0,17	0,2	1,4	-	0,04	0,03	0,01	0,55	-	0,35	0,35	0,38

Tablica 4. Podaci o mehaničkim svojstvima S355 iz norme EN 10025-2 [7]

	Minimalna granica elastičnosti [Mpa]						Rastezna čvrstoća [Mpa]	Minimalno produljenje $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$					udarni rad loma	
TIP ČELIKA	Nominalna debljina [mm]						Nominalna debljina [mm]	Nominalna debljina [mm]					Temperatura	Minimalna absorbirana energija
	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 80$	$> 80$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 125$	$> 3$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 125$	$> 3$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 125$	[C°]	[J]
S355J0	355	345	335	325	315	295	470-630	450-600	22	21	20	18	0	27
S355J2	355	345	335	325	315	295	470-630	450-600	22	21	20	18	-20	2
S355JR	355	345	335	325	315	295	470-630	450-600	22	21	20	18	20	27

Tablica 5. Podaci o kemijskom sastavu S355 iz norme EN 10025-2 [7]

Analiza sastava													
	Maksimalni udio ugljika [%]			Mn max [%]	Si max [%]	P max [%]	S max [%]	N max [%]	Cu max [%]	Ostalo max [%]	Ce max [%]		
Vrsta čelika	Nominalna debljina [mm]										Nominalna debljina [mm]		
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40								≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 125
S355J0	0,2	0,2	0,22	1,6	0,55	0,04	0,035	0,01	0,55	-	0,45	0,47	0,47
S355J2	0,2	0,2	0,22	1,6	0,55	0,03	0,03	-	0,55	-	0,45	0,47	0,47
S355JR	0,24	0,24	0,24	1,6	0,55	0,04	0,04	0,01	0,55	-	0,45	0,47	0,47

Tehničko dobavni uvjeti isporuke za opće konstrukcijske čelike određeni su normom HRN EN 10025-1:2019 [7]

Tipični poluproizvodi za ove vrste čelika su ploče i profili. Na slici 7 prikazane su ploče čelika oznake S235JR.



**Slika 7. Ploče od čelika oznake S235JR [8]**

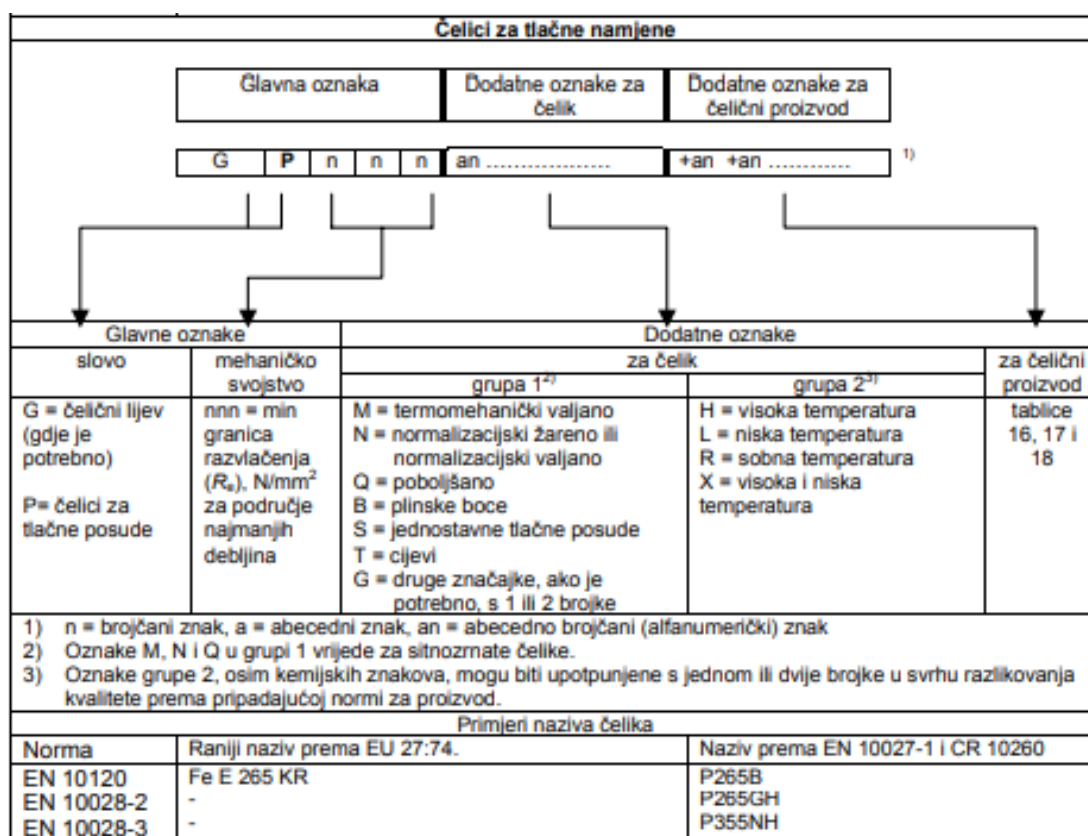
## 2.5.2. Čelici za tlačne namjene

Sva tlačna oprema konstruirana se uzimajući u obzir sljedeće čimbenike:

- mehaničko opterećenje: razlike u tlakovima (atmosferski i tlak kojemu je materijal izložen) i druge vrste opterećenja
- korozijske uvjete
- opasnost od trošenja

Zbog uvjeta rada kojima je ova skupina čelika izložena, postoji velika mogućnost kvarova tijekom eksploatacije pa se trebaju poštovati posebno stroga pravila u proizvodnji. Ovo je osobito izraženo ako se radi o proizvodnji tlačnih spremnika i cijevi.

Na slici 8. prikazan je način označavanja čelika za tlačne namjene [5].



Slika 8. Označavanje čelika za tlačne namjene prema normi HRN EN 10027-1 [3]

Za proizvodnju transformatorskih kotlova koriste se većinom čelici koji u dodatnoj oznaci iz grupe 1 imaju slovo T (cijevi).

Najučestaliji materijal je čelik oznake P235TR1. Slovo R označava sobnu temperaturu kao radnu.

Na slici 9 prikazane su cijevi od čelika oznake P235TR1



Slika 9. Cijevi od čelika P235TR1 [9]

### 2.5.3. Plosnati proizvodi za hladno oblikovanje.

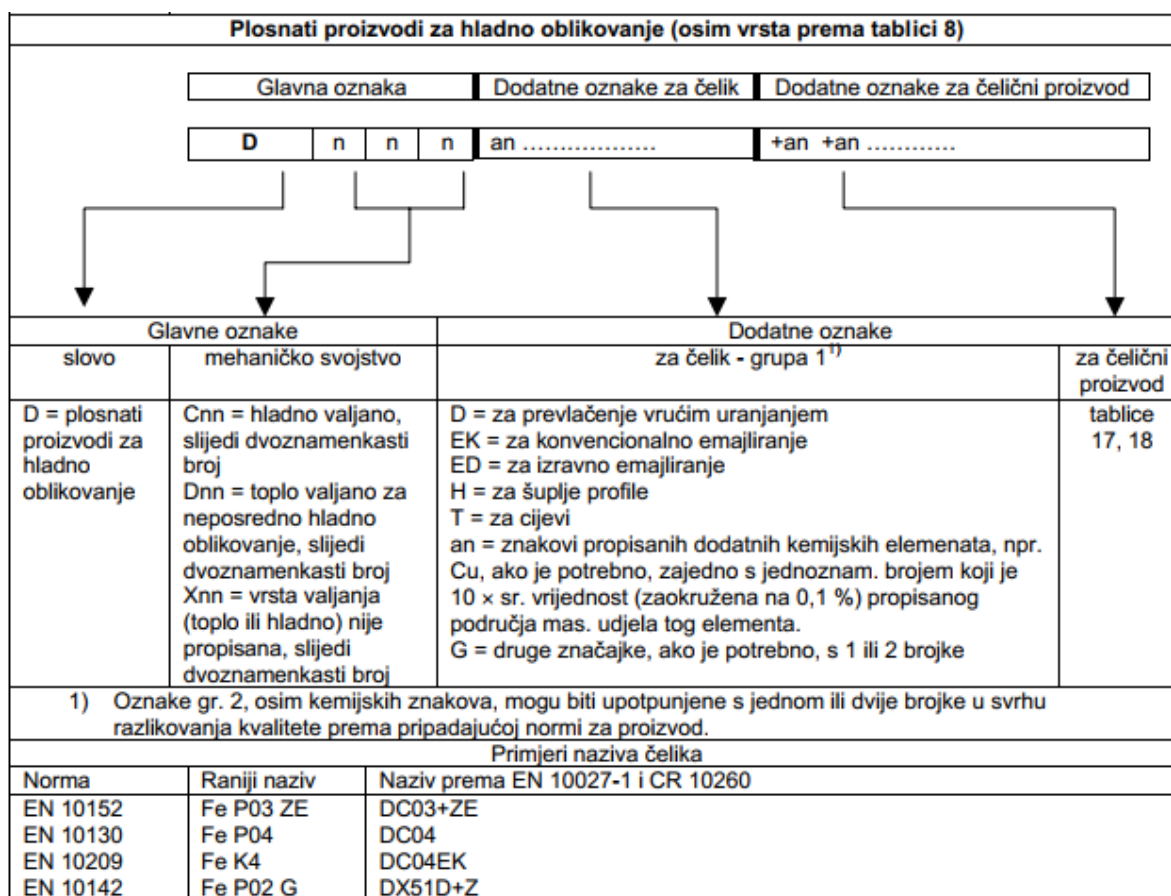
Iz ove skupine bitno je spomenuti čelike od kojih se izrađuju tanki limovi, debljine ispod 3 mm. Ovi limovi imaju vrlo mali udio ugljika, oko 0,1 %. Važno tehnološko svojstvo je mogućnost hladnog oblikovanja pa zato ovi čelici imaju izraženo svojstvo duktilnosti. Također zbog niskog udjela ugljika, ovi čelici su dobro zavarljivi. Ova skupina čelika isporučuje u raznim stanjima površine stoga pa se zato uz svaku vrstu navode i dodatne oznake za stanje. Oznake mogu biti od P1 do P5, a imaju sljedeće značenje :

**P1** – površina dobivena žarenjem u atmosferi bez zaštite od oksidacije; boje popuštanja i labavo prironjena ogorina (oksidi) dopuštena



- P2** – površina lima dobivena žarenjem u metalnim sanducima sa zaštitim poklopcem; vidljive boje popuštanja i čvrsto prironjena ogorina (oksidi) dopuštena
- P3** – površina bez ogorine
- P4** – površina lima bez ogorine ili s neznatnom hrapavušću zbog otpale ogorine
- P5** – bez ogorine i s malom hrapavošću, u pravilu samo s jedne strane, druga strana je P4 [5].

Na slici 10. prikazan je sustav označavanja za ovu skupinu čelika



**Slika 10. Označavanje čelika za plosnate proizvode za hladno oblikovanje prema normi HRN EN 10027-1 [3]**

Čelici iz ove skupine isporučuju se u formi limova ili rola širine 600 mm ili više. Minimalna debljina je 0,35 mm, dok je maksimalna, osim ako nije neki specijalan slučaj, do 3 mm [10].

Najčešće primjenjivani materijali u proizvodnji transformatorskih kotlova iz ove skupine su čelici oznake DC01 i DC03

Na slici 11 prikazan je lim proizveden od čelika DC01



**Slika 11. Čelik za plosnate proizvode za hladno oblikovanje DC01 [11]**

#### 2.5.4. *Nehrđajući čelici za transformatorske kotlove*

Specijalni nehrđajući konstrukcijski čelici iz kojih se izrađuju transformatorski kotlovi zajamčenog su kemijskog sastava. Prema normi HRN EN 10027-1 pripadaju visokolegiranim čelicima kod kojih je maseni udio najmanje jednog legirnog elementa  $> 5 \%$ . Njihova oznaka počinje slovom „X“ iza kojeg slijedi maseni udio ugljika (pomnožen sa 100) te simboli legirnih elemenata i njihovi maseni udjeli.

U proizvodnji transformatorskih kotlova, od svih skupina nehrđajućih čelika, koriste se (gotovo isključivo) austenitni nehrđajući čelici.

Tri najčešće korištena čelika iz ove skupine su:

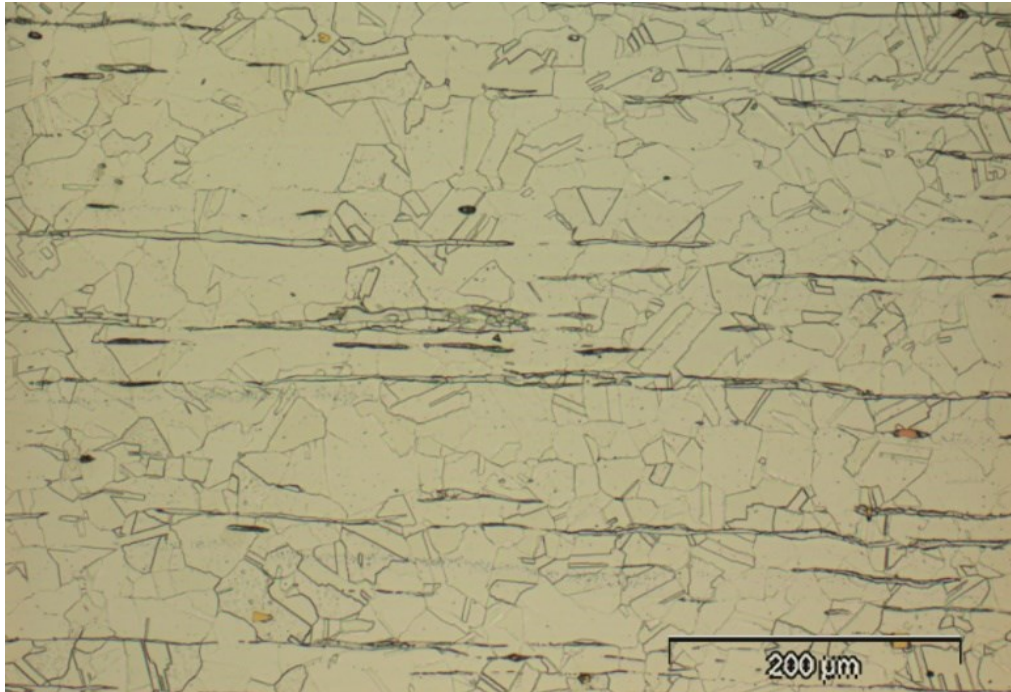
- X5CrNi18–10 (1.4301)
- X6CrNiMoTi17–12–2 (1.4571)
- X2CrNiMo17–12–2 (1.4404)

Svi navedeni čelici sadrže krom (17 do 18 %) čime je zadovoljen prvi uvjet korozijske postojanosti. Također sadrže relativno visoki udio nikla koji je jaki gamageni legirni element i poništava alfabeno djelovanje kroma. Čelik oznake X5CrNi18–10 sadrži oko 0,05 % ugljika i kako ne sadrži ne stabilizirajuće legirne elemente u određenim uvjetima može biti osjetljiv na interkristalnu koroziju. Čelik oznake X6CrNiMoTi17–12–2 također sadrži relativno veliku količinu ugljika od oko 0,06 %, ali sadrži i određenu količinu titanija koji je stabilizirajući legirni element čime se sprječava senzibilizacija. Navedeni čelik legiran je i s 2 % molibdena čime se još više poboljšava korozijska postojanost. Čelik oznake X2CrNiMo17–12–2 sadrži vrlo malu količinu ugljika od oko 0,02 % i samim time je neosjetljiv na senzibilizaciju i interkristalnu koroziju.

Glavna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna
- nemagnetičnost
- kod zavarivanja su veće deformacije i naprezanja nego kod drugih čelika; potrebno je paziti pri tehnološkoj pripremi za zavarivanje
- visoka žilavost
- oksidacijska i korozijska otpornost
- u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja, zrna ostaju jednake veličine [4].

Na slici 12 prikazana je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X6CrNiMoTi17-12-2. Osim austenita u mikrostrukturi je prisutna i mala količina delta ferita.



**Slika 12. Mikrostruktura čelika X6CrNiMoTi17-12-2 [12]**

## 2.6. Tehničko dobavni uvjeti i atesti materijala

### 2.6.1. Tehničko dobavni uvjeti

Materijali koji se koriste u proizvodnji transformatorskih kotlova koriste se i u mnogim drugim granama proizvodnje i s obzirom na svoju široku primjenu imaju precizno definirana i normirana mehanička, fizikalna i tehnološka svojstva. Kako bi se osigurala ujednačenost kvalitete i dimenzija materijala, bez obzira na dobavljača, moraju se zadovoljiti tehničko dobavni uvjeti propisani normama.

Najznačajnije norme koje se odnose na materijale u proizvodnji transformatorskih kotlova su:

- HRN EN 10025-1:2019 - Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika - 1. dio: Opći tehnički uvjeti isporuke [8]
- HRN EN 10088-2: Nehrdajući čelici - 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za limove/ploče i trake od korozijski postojanih čelika za opće namjene [13]
- **Norma HRN EN 10025-1:2019 - Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 1. dio: Opći tehnički uvjeti isporuke**

Norma je podijeljena u šest dijelova. Norma vrijedi za sve vruće valjanje čelike osim šupljih profila i cijevi. U prvom dijelu navedeni su opći dobavni uvjeti, a ostalih pet dijelova donose specifične zahtjeve i reference na druge norme za pojedine skupine konstrukcijskih čelika s obzirom na neku karakteristiku (primjerice nelegiranih, normaliziranih, sitnozrnatih, visokočvrstih).

Normom su propisani osnovni zahtjevi i ograničenje :

- **Kemijski sastav** – propisani su zadani maksimalni udijeli prisutnih elemenata u čeliku te maksimalni iznos ugljičnog ekvivalenta (od 0,35 do 0,49, ovisno o debljini i vrsti čelika).
- **Mehanička svojstva** – propisane su vrijednosti minimalne granice razvlačenja i udarnog rada loma na definiranoj temperaturi.
- **Tehnoloičnost**
  - *zavarljivost* - ova norma ne daje nikakve informacije vezane uz zahtjeve za zavarivanje čelika s dodatnim oznakama JR, J0, J2 već upućuje na normu HRN EN 1011-2 koja donosi preciznije upute za zavarivanje [14]

- *oblikovljivost* – norma donosi upute za toplo oblikovanje, te navodi mogućnosti hladnog oblikovanja
- *obrადivost odvajanjem čestica* – u normi se navodi da površinska kvaliteta može biti loša te da se mogu pojaviti oštećenja površine, što se može izbjeći primjenom čelika koji u svojem sastavu imaju dodan S
- **Kvaliteta površine** – ova norma ne navodi nikakve zahtjeve za trake, dok za ploče, šipke i profile upućuje na norme HRN EN 10163-2 (za ploče i profile) te HRN EN 10221 (za šipke) [15,16]
- **Dimenzije, tolerancije na oblik i masu** – norma propisuje da se bruto masa računa s gustoćom od  $7,850 \text{ kg/m}^3$ , a dimenzijske tolerancije dane su normom HRN EN 10029 [17]
- **Norma HRN EN 10088-2: Nehrđajući čelici -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za limove/ploče i trake od korozivski postojanih čelika za opće namjene**

Norma HRN EN 10088-2:2015 odnosi se na nehrđajuće konstrukcijske čelike. Propisuje zahtjeve i navodi referentne norme za:

- **proizvodni procesi** – osim ako nije drukčije dogovoreno, proizvodni proces odabire proizvođač
- **kemijski sastav** – norma propisuje iznose legirnih elemenata i maksimalna odstupanja
- **korozivska otpornost** – korozivska otpornost je ovisna o puno faktora, norma sugerira da se izbor čelika bazira na iskustvu
- **mehanička svojstva** – normom su propisani referentni iznosi granice razvlačenja koji vrijede samo ako je čelik isporučen bez dodatne toplinske obrade
- **površinske greške** – norma navodi da su sitne greške i nesavršenosti, koje su posljedica valjanja, dozvoljene, osim ako je drugačije dogovoreno, a u tom slučaju vrijede zahtjevi propisani normom HRN EN 10163 [15]
- **oblikovljivost** – normom je propisano da se prema zahtjevu oblikovljivost može provjeriti preko linearnog produljenja pri statičko vlačnom ispitivanju na kidalici

### 2.6.2. **Certifikati materijala prema normi HRN EN 10204 [18]**

Certifikati materijala nezaobilazna su stavka u nabavi materijala. Kako bi se osiguralo da su tehničko dobavni uvjeti poštivani, uz materijal se dostavlja i njegov atest ili certifikat.

Norma HRN EN 10204:2007 definira različite vrste certifikata. Norma se može primijeniti za sve poluproizvode od čelika (ploče, limovi, šipke, odljevci...)

Postoje četiri tipa certifikata: tip 2.1, 2.2, 3.1 i 3.2.

- **Certifikat tip 2.1**

Dokument u kojemu proizvođač izjavljuje da je materijal izrađen prema zahtjevima, bez priloženih rezultata ispitivanja.

- **Certifikat tip 2.2**

Dokument u kojemu proizvođač izjavljuje da je materijal izrađen prema zahtjevima, s priloženim rezultatima ispitivanja koja nisu propisani normom već su dobiveni metodom kojom proizvođač utvrđuje ispravnost proizvoda.

- **Certifikat tip 3.1**

Dokument u kojemu proizvođač izjavljuje da je materijal izrađen prema zahtjevima, s priloženim rezultatima ispitivanja koja su propisana normom. Ispitivanja su odrađena od strane certificiranog osoblja unutar tvrtke.

- **Certifikat tip 3.2**

Dokument u kojemu proizvođač izjavljuje da je materijal izrađen prema zahtjevima, s priloženim rezultatima ispitivanja koja su propisana normom. Ispitivanja su odrađena od strane nezavisne službene ustanove.

### 3. Klasifikacija korozijskih procesa

Koroziju možemo definirati kao fizikalno-kemijsku interakciju metalnog materijala i njegova okoliša što za posljedicu ima promjene upotrebnih svojstava metala. Interakcija može dovesti do oštećenja funkcije metalnog proizvoda i do onečišćenja okoliša [19].

Korozija se najčešće kategorizira prema:

- mehanizmu korozijskog procesa
- prema obliku razaranja (geometrijska klasifikacija).

#### 3.1. Prema mehanizmu procesa

Podjela prema mehanizmu procesa dijeli se na elektrokemijsku i kemijsku koroziju.

##### 3.1.1. *Kemijska korozija*

Kemijska korozija je proces između barem jedne faze ili komponente metala i barem jedne komponente okoline. Kemijska korozija javlja se u neelektrolitima kao što su vrući plinovi i u tekućinama koje ne provode struju. Kao posljedica ove korozije najčešće nastaju spojevi oksida i sulfida [20].

##### 3.1.2. *Elektrokemijska korozija*

Elektrokemijska korozija nastaje zbog djelovanja galvanskog članka na površini metala izloženog elektrolitu. U tom procesu atom metala gubitkom elektrona pretvara se u slobodni ion, a elektron se veže na neki oksidans iz okoline.

Elektrokemijska korozija javlja se u elektrolitima kao što su voda, vodene otopine, atmosfera (koja sadrži kondenzat). U praksi je elektrokemijska korozija češći slučaj i uzrok je značajnih gospodarskih gubitaka [20].

#### 3.2. Prema obliku razaranja (geometriji)

Prema obliku razaranja materijala, korozija može biti opća i lokalna. Neki autori korozijske pojave razvrstavaju u osam pojavnih oblika: opća korozija, galvanska korozija, korozija u

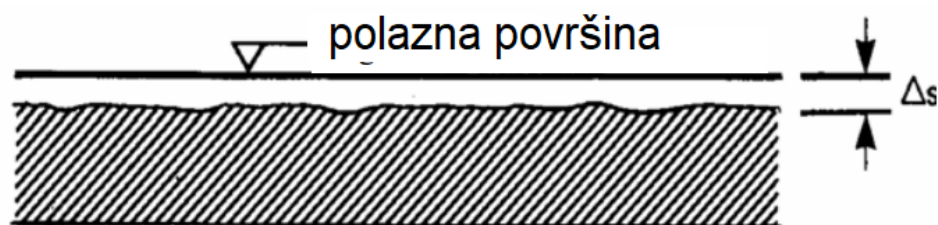


procjepu, pitting (rupičasta korozija), interkristalna korozija, selektivna korozija, erozijska korozija, napetosna korozija [20].

### 3.2.1. Opća korozija

Prema definiciji razaranje u ovom tipu korozije odvija se ravnomjerno na cijeloj površini i posljedično dovodi do ravnomjernog smanjenja debljine [21].

slici 13 prikazuje poprečni presjek materijala i ravnomjeran gubitak debljine stijenke zbog djelovanja opće korozije.

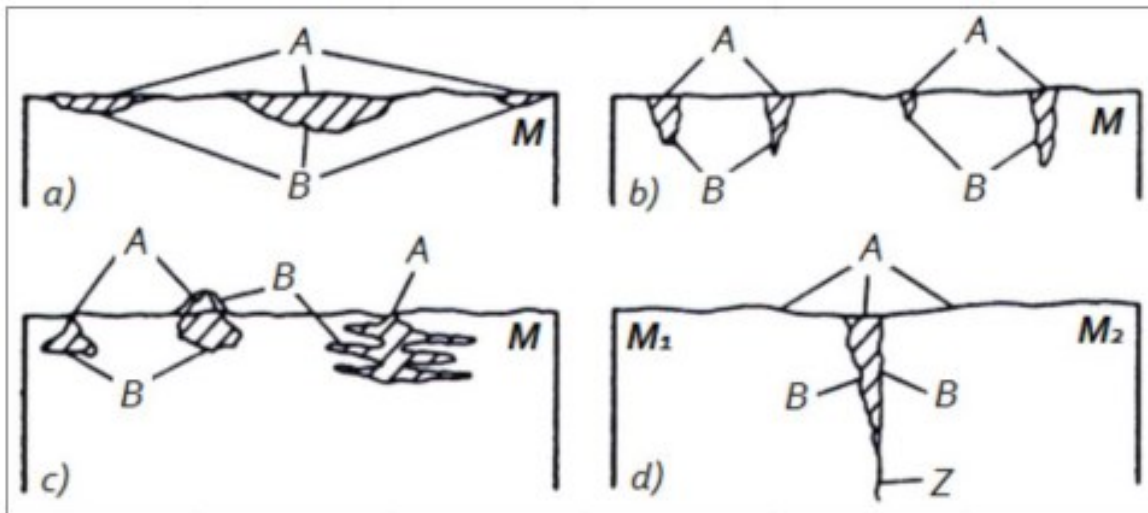


Slika 13. Ravnomjerni gubitak debljine stijenke izazvan općom korozijom [21]

### 3.2.2. Lokalna korozija

Lokalna korozija je najčešći oblik elektrokemijske korozije. Zahvaća samo neke dijelove izložene površine.

Na slici 14 prikazane su sheme tipova lokalne korozije:



Slika 14. Sheme tipova lokalne korozije: a) pjegasta, b) rupičasta, c) potpovršinska, d) kontaktna [22]

- **Pjegasta**

Pjegasta korozija zahvaća materijal plitko. Zahvaća samo anodna mjesta na metalnoj površini.

- **Rupičasta**

Rupičasta korozija (pitting) je okarakterizirana sitnim rupicama s radijusom reda veličine koji je isti ili manji od dubine rupica. To je vrlo neugodan oblik korozije jer može značajno smanjiti nosivi presjek bez vidljivog upozorenja.

Na slici 15 prikazana je površina čelika zahvaćena rupičastom korozijom

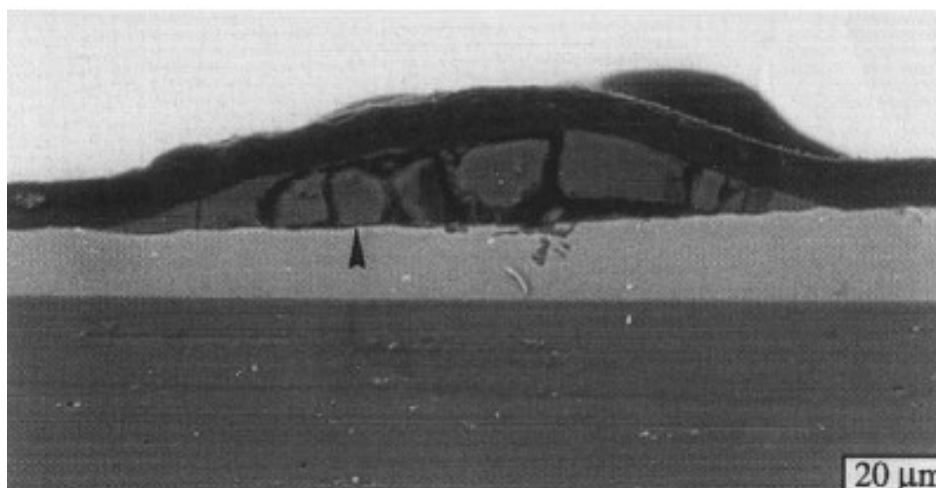


Slika 15. Rupičasta korozija [23]

- **Potpovršinska korozija**

Tip lokalne korozije koja se javlja na metalima koji su obojani. Potpovršinska korozija nastaje na mjestima gdje je došlo do oštećenja premaza. Širi se listanjem u ispod površine [24].

Na slici 16 prikazan je mikroskopski uvećan presjek potpovršinske korozije.

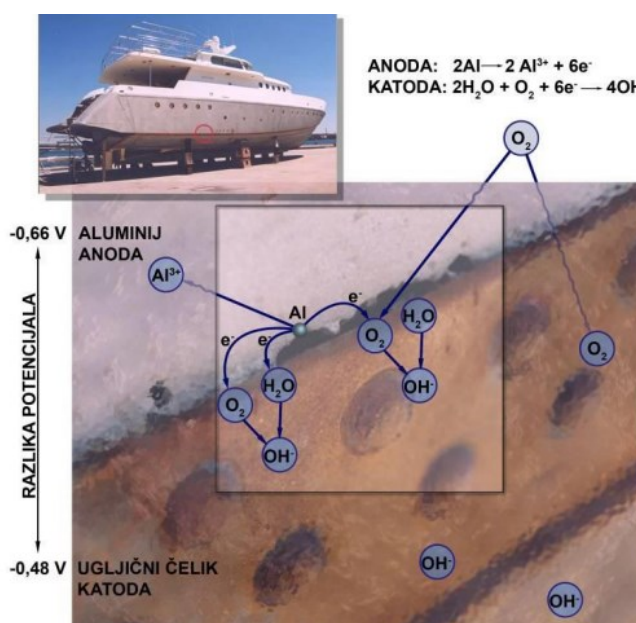


Slika 16. Poprečni presjek potpovršinske korozije [25]

- **Kontaktna korozija**

Kontaktna korozija nastaje kada u nekom elektrolitu u međusobnom kontaktu budu materijali različitih električnih potencijala. Istovremeno se odvija oksidacija i redukcija materijala. Anoda i katoda u reakciji definirane su električnim potencijalom.

Na slici 17 shematski je prikazana kontaktna korozija između aluminija i čelika na trupu broda u morskome okruženju.

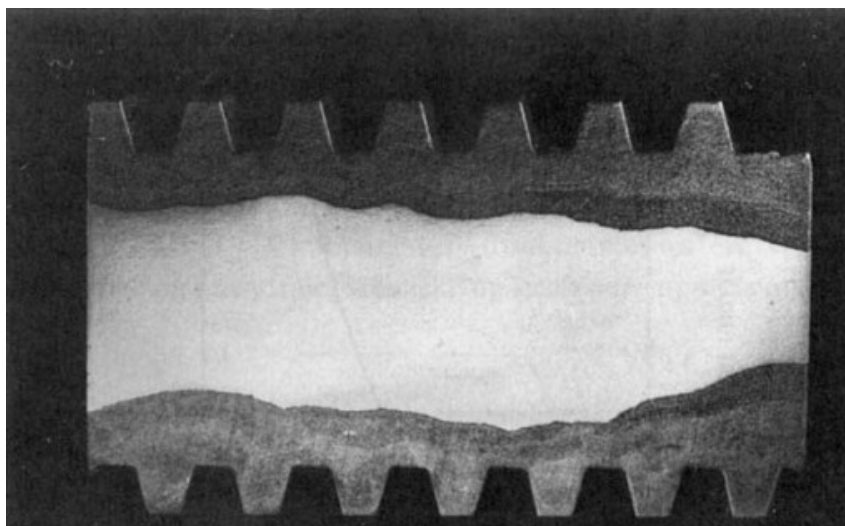


Slika 17. Shematski prikaz kontaktne korozije [20]

### 3.2.3. *Selektivna korozija*

Selektivna korozija javlja se u legurama. Korozija djeluje tako da manje plemenit materijal nestaje i stvaraju se pore. Ovaj tip korozije može biti teško uočljiv ako područja koja su korodirala ostanu prekrivena s produktima korozije ili drugim nečistoćama [21].

Na slici 18 je prikazana je selektivna korozija vretena

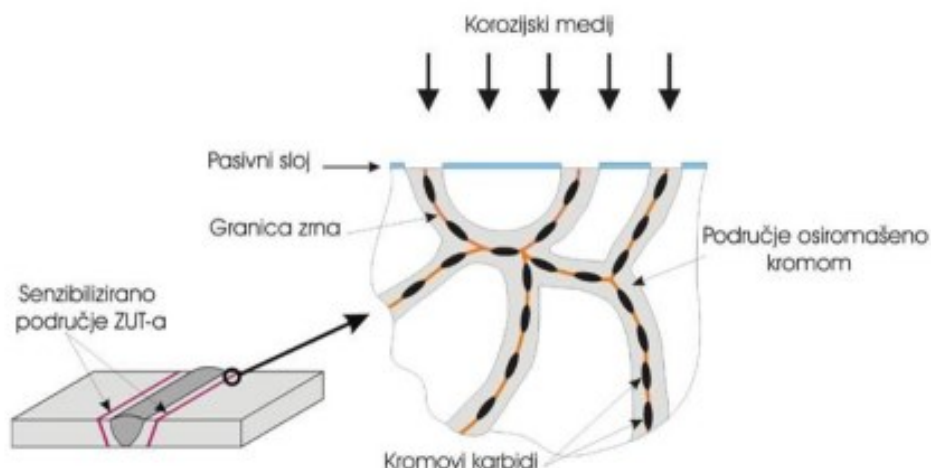


Slika 18. Prikaz selektivne korozije vretena [21]

#### 3.2.4. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija se može okarakterizirati kao jedan od najopasnijih tipova korozije. Njena glavna karakteristika je da se neprimjetno širi po granicama zrna. Takva vrsta razaranja uzrokuje smanjenje čvrstoće i žilavosti. Kod austenitnih nehrđajućih čelika zbog difuzijskih procesa te sklonosti ugljika prema kromu, na temperaturama između 400 °C i 800 °C, na granicama kristalnih zrna formiraju se kromovi karbidi tipa  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Zbog visokog udjela kroma u nastalim karbidima, u području koje okružuje granicu zrna maseni udio kroma može pasti ispod 12 %, koliko je nužno potrebno za korozijsku postojanost. Takva mikrostruktura je senzibilizirana (osjetljiva) na koroziju i ako je čelik u vodljivom mediju doći će do interkristalne korozije. Interkristalna korozija napreduje po granicama zrna koje imaju niži električni potencijal od središta zrna i predstavljaju anodu koja se troši [20].

Na slici 19 shematski je prikaz djelovanja interkristalne korozije.



Slika 19. Shematski prikaz interkristalne korozije nehrđajućih čelika [20]

Pojavu interkristalne korozije može se izbjeći sprječavanjem senzibilizacije. To se postiže snižavanjem udjela ugljika te stabilizacijom (legiranjem s jačim karbidotvorcima kao što su Ti i Nb). Ako je došlo do senzibilizacije strukture, korozija se može spriječiti toplinskom obrabom. Žarenjem na dovoljno visokoj temperaturi „razbiju“ se kromovi karbidi, a krom se vrati u područje u kojem je bio [20].

### 3.3. Mehanizmi zaštite od korozije

Uzročnici nastanka korozije mogu biti: razni agresivni mediji, loš odabir materijala, konstrukcijske greške i stvaranje uvjeta za redoks reakcije.

Mehanizmi zaštite temelje se na uklanjanju jednog ili više uzročnika za nastanak korozije. Prema tome osnovne metode zaštite od korozije su: odabir materijala, zaštita premazima, zaštita inhibitorima, električne metode zaštite [26].

#### 3.3.1. Odabir materijala

Korozija se može javiti kada materijal nije dovoljno otporan na koroziju s obzirom na eksploatacijske uvjete u kojima se koristi. Sa strogo tehničkog gledišta rješenje je vrlo jednostavno – koristiti materijal koji je otporniji na koroziju. Međutim, odabir materijala u praksi je rezultat kompromisa među karakteristikama materijala kako bi zadovoljili sve tražene

zahtjeve. Prilikom odabira materijala bitno je uzeti u obzir koliko će manja otpornost koroziji dugoročno nanijeti štete s obzirom na prednosti koje korištenje takvog materijala donosi [26].

### 3.3.2. *Zaštita prevlakama*

Zaštita prevlakama je najčešće korištena metoda zaštite od korozije. Prevlake se koriste kako bi se postigla dugotrajna zaštita u širokom rasponu uvjeta, od atmosferskih do najzahtjevnijih korozivnih okoliša. Prevlakama se korozija može zakočiti ili potpuno spriječiti. Njihova uloga je da predstavljaju barijeru prema agresivnom mediju. Prevlake mogu biti metalne i nemetalne. Nemetalne se dalje mogu podijeliti na organske i anorganske. Efikasnost prevlaka ovisi o vrsti, debljini, stupnju kompaktnosti i čvrstoći prijanjanja. Kvaliteta prevlake je znatno određena postupkom nanošenja [22,26].

- **Anorganske metalne prevlake**

Metalne prevlake koriste se kada je bitno zadržati metalna svojstva površine, kao što su sjaj, toplinska i električna vodljivost, tvrdoća, otpornost na trošenje.

Metalne prevlake mogu se nanositi uranjanjem osnovnog metala u rastaljeni metal prevlake. Nakon vađenja osnovnog materijala, na njegovoj površini ostaje tanak sloj ili prevlaka. Za prevlačenje koriste se taljevine cinka, kositra, legura olova, aluminijska itd. Osim uranjanjem, prevlake je moguće nanijeti i špricanjem [22,26].

Na slici 20 prikazana je komponenta podesta transformatora zaštićena vrućim uranjanjem.



**Slika 20. Podest zaštićen vrućim uranjanjem**

- **Anorganske nemetalne prevlake**

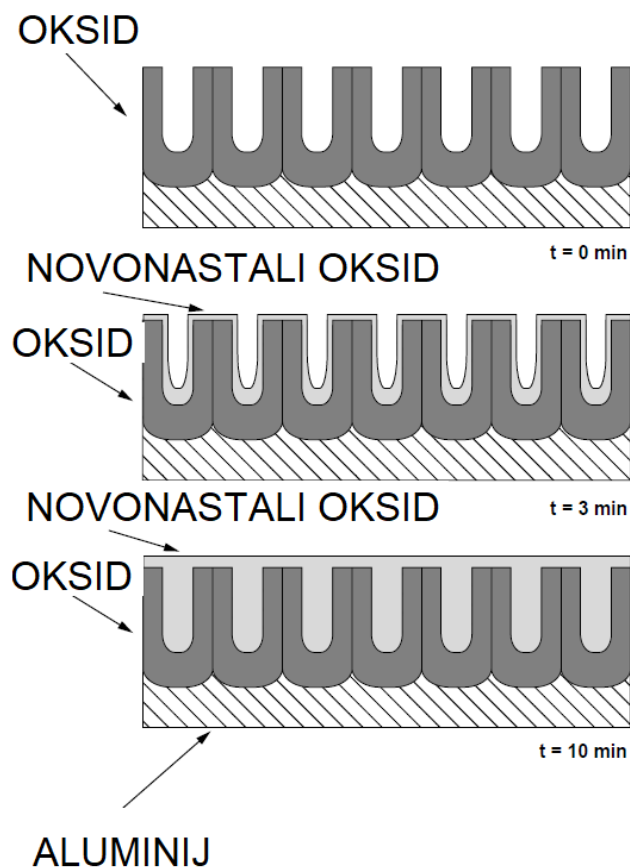
Anorganske nemetalne prevlake nastaju kada se nekim procesom izmjeni površinski sloj metala u sloj oksida ili neki spoj koji ima bolja korozivna svojstva od površinskog sloja koji bi nastao prirodnim putem. U nekim slučajima ovaj je način zaštite dovoljan, a nekada se koristi kao pripremni korak prije nanošenja drugih prevlaka. Anorganske nemetalne prevlake mogu se nanositi i mehanički. Najvažniji postupak mehaničkog nanošenja je emajliranje, stvaranje sloja alkalnog borosilikatnog stakla na površini metala.

Jedna od češćih metoda nanošenja kemijskim putem je anodiziranje. To je elektrokemijski postupak u kojem se podebljava prirodni oksidni sloj s ciljem što bolje pasivizacije površine.

Proces anodiziranja najčešće se radi na aluminiju, titaniju, cinku i nehrđajućim čelicima. Električna struja, prolaskom kroz elektrolit pretvara metalnu površinu u odgovarajući oksid.

Na slici 21 prikazan je proces formiranja oksidnog sloja na površini aluminija [22,26].





Slika 21. Formiranje oksidnog sloja na aluminiju postupkom anodizacije [26]

- **Organske prevlake (premazi)**

Zaštita organskim prevlakama obuhvaća postupke ličenja (bojenje i lakiranje), bitumenizacije, razne postupke nanošenja plastičnih masa te gumiranje [27].

Najzastupljenije organske prevlake su premazi, pretpostavlja se da se čak  $\frac{3}{4}$  svih metalnih površina štiti se premazima. Razlog je relativno niska cijena u odnosu na druge metode zaštite, mogućnost poboljšanja estetičnosti proizvoda korištenjem raznih pigmenata i postizanjem sjajnog ili matiranog finiša [22].

### 3.3.3. Zaštita inhibitorima korozije

Upotreba inhibitora je važna metoda za usporavanje korozije. Prema definiciji inhibitor korozije je tvar organskog ili anorganskog podrijetla, koja dodana u maloj koncentraciji značajno usporava proces korozije [26].

Inhibitori se mogu podijeliti na:

- anodne – sprječavaju ionizaciju metala
- katodne – koče katodnu reakciju ili taloženjem stvaraju netopljive produkte na katodama
- mješovite – usporavaju katodnu i anodnu reakciju, organski spojevi koji se upijaju u metalnu površinu
- hlapive – posebna skupina, isparavanjem stvaraju lokalnu nekorozivnu okolinu [22].

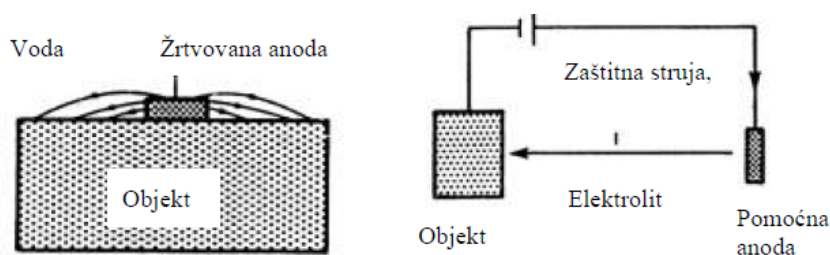
### 3.3.4. Električne metode zaštite

Metode električne zaštite temelje se na usklađivanju električnih potencijala osnovnog materijala. Metal u elektrolitima neće korodirati ako mu je potencijal u ravnoteži s anodom korozijskog članka [26].

- **Katodna zaštita**

Katodna zaštita može se primijeniti polarizacijom sustava istosmjernom strujom (negativan pol) ili uporabom žrtvene anode [22].

Na slici 22 vidi se shematski prikaz katodne zaštite žrtvenom anodom (lijevo) i katodne zaštite narinutom strujom (desno).



Slika 22. Katodna zaštita žrtvenom anodom (lijevo) i katodna zaštita narinutom strujom (desno) [22]

- **Anodna zaštita**

Anodna zaštita postiže se spajanjem metalnog materijala na pozitivan pol istosmjerne struje ili metalom koji je plemenitiji (viši elektrokemijski potencijal).

Tada se metalna konstrukcija ponaša kao anoda sve dok ne dođe do pasivizacije (izjednačavanja potencijala). Trenutno je ova metoda ograničena i koristi se samo za neke specifične slučaje [27].

## 4. Korozijska zaštita nanošenjem premaza

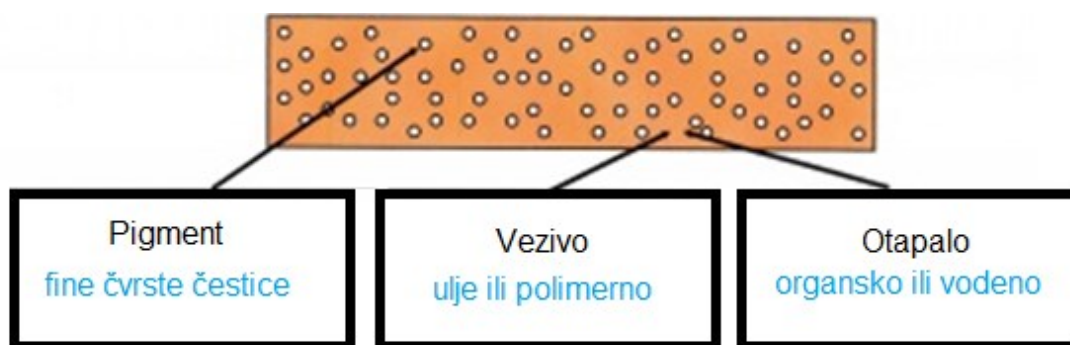
Svrha premaza je odvajanje površine metala od okolišnih uvjeta, a glavni zahtjev na premaz je trajnost u određenom sustavu. Osnovne komponente premaza su: vezivo, pigment, aditivi i punila, otapalo [27].

### 4.1. Komponente premaza

Kada govorimo o premazu bitno je napomenuti da je premaz sustav zaštite koji se sastoji od: temeljnog sloja, jednog ili više međuslojeva te završnog sloja. Zaštita nanošenjem sustava premaza glavna je metoda korozijske zaštite u proizvodnji transformatorskih kotlova.

Premazi se sastoje od tri glavne komponente: veziva, pigmenta i otapala. Osim njih postoje punila i aditivi.

Na slici 23 je shematski prikaz komponenta premaza



Slika 23. Shematski prikaz komponenta premaza [30]

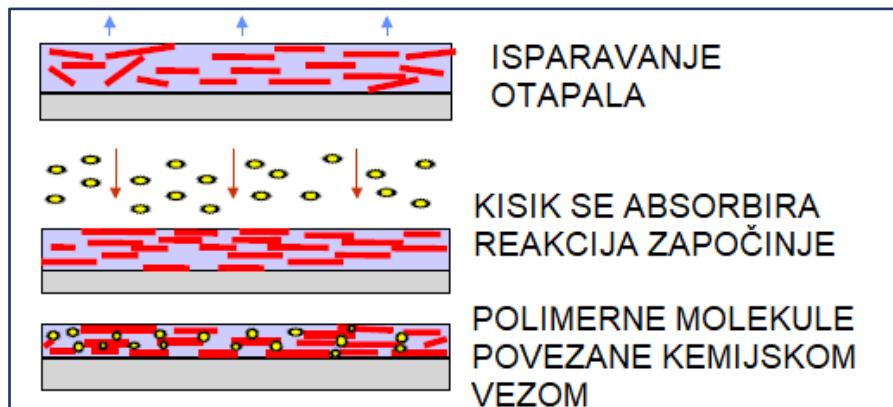
#### 4.1.1. Veziva

Vezivo je važna komponenta premaza, nositelj je brojnih svojstava kao što su: prijanjanje na podlogu, otpornost na vremenske uvijete, otpornost na vodu, kemikalije i drugo.

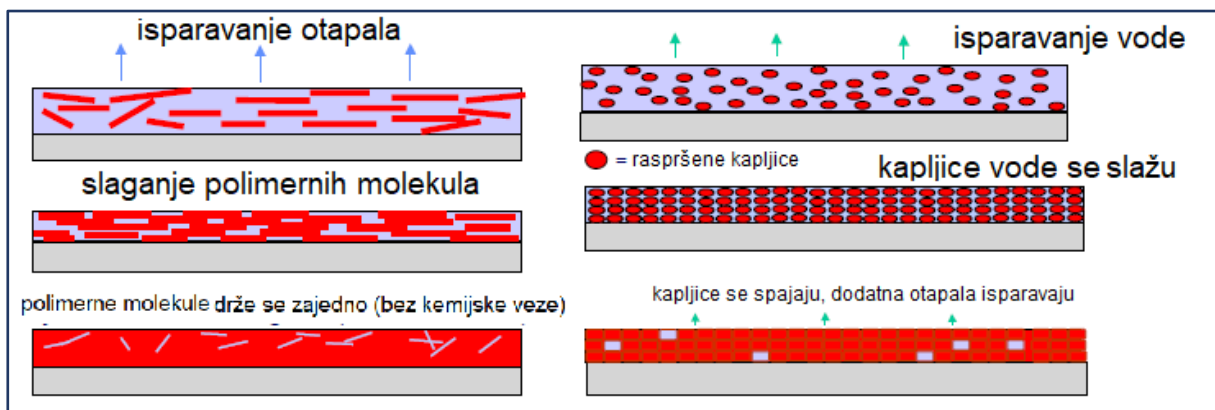
Veziva možemo podijeliti u tri skupine ovisno o procesu sušenja:

- sušenje oksidacijom – premaz se suši djelovanjem okolnog zraka
- fizikalno sušenje – premaz se suši isparavanjem otapala ili vode
- kemijsko sušenje – kemijskom reakcijom komponenta koje se mješaju prije uporabe.

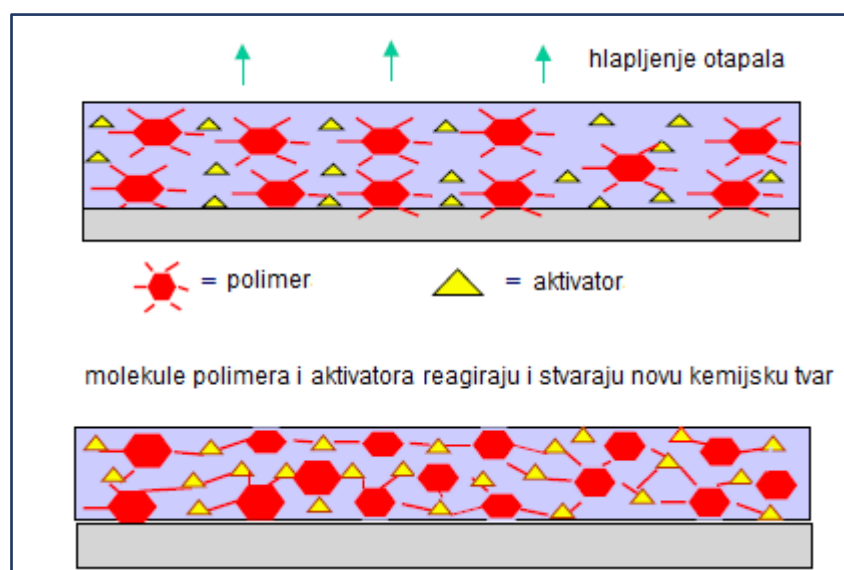
Na slici 24, 25 i 26, prikazana su sve tri skupine veziva.



Slika 24. Sušenje oksidacijom [28]



Slika 25. Fizikalno sušenje[28]



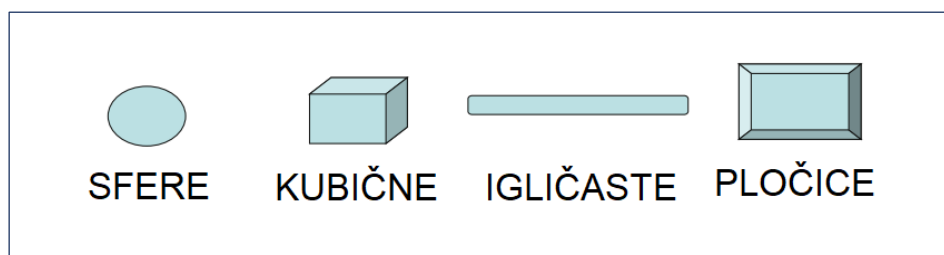
Slika 26. Kemijsko sušenje [28]

#### 4.1.2. Pigmenti

Pigmenti su čvrste čestice čija je glavna uloga davati određenu nijansu i neprozirnost premazu. Neki pigmenti imaju i druge funkcije kao što su: zaštita od korozije, sprečavanje rasta algi, zaštita od ultraljubičastog zračenja, protuklizna svojstva i drugo.

Osnovni pigment je titanijev dioksid, koji zbog iznosa indeksa loma svjetlosti daje bijelu boju, a dodaje se u sve ostale pigmente. Obojeni pigmenti mogu biti prirodni ili sintetički. Boja pigmenta je određena je indeksom loma različitih valnih duljina vidljive svjetlosti. Primjerice, plavi pigment oku je vidljiv kao plavi jer apsorbira sve vidljive valne duljine osim plave. Osnovne čestice pigmenta dolaze u različitim oblicima, a međusobno su spojene kao agregati (čestice spojene plošno) ili aglomerati (čestice spojene na rubovima) [29].

Na slici 27 prikazani su oblici čestica pigmenta.



Slika 27. Oblici čestica pigmenta [29]

#### 4.1.3. Otapala

Otapala se upotrebljavaju u premazima kako bi omogućili izradu boje i njeno nanošenje na površinu. Otapala moraju biti kompatibilna s ostatkom sustava, kako ga ne bi razgradila. Otapalo nakon nanošenja premaza ishlapljuje. Vrstom otapala određeno je trajanje sušenja i stvaranje mokrog filma tj. nastajanje glatke i sjajne površine. Osnovna dva tipa otapala su:

- ugljikovodici – alifatski, aromatski, terpeni
- derivati ugljikovodika s kisikom – alkoholi, ketoni, glikoli, esteri.

Iako su premazi proizvedeni s viskoznošću koja je optimalna za njihovu namjenu, zbog temperature, vlage i ostalih okolišnih uvjeta, otvoreno pakiranje premaza može izgubiti svoju viskoznost. Kao rješenje koriste se razrjeđivači. Razrjeđivači su mješavine otapala koje modificiraju viskoznost premaza, utječu na vrijeme sušenja i stvaranja filma te konačnu kvalitetu premaza [29].

#### 4.1.4. Aditivi i punila

U literaturi punila se još nazivaju i sekundarni pigmenti. Relativno su jeftini i koriste se zajedno uz primarne pigmente.

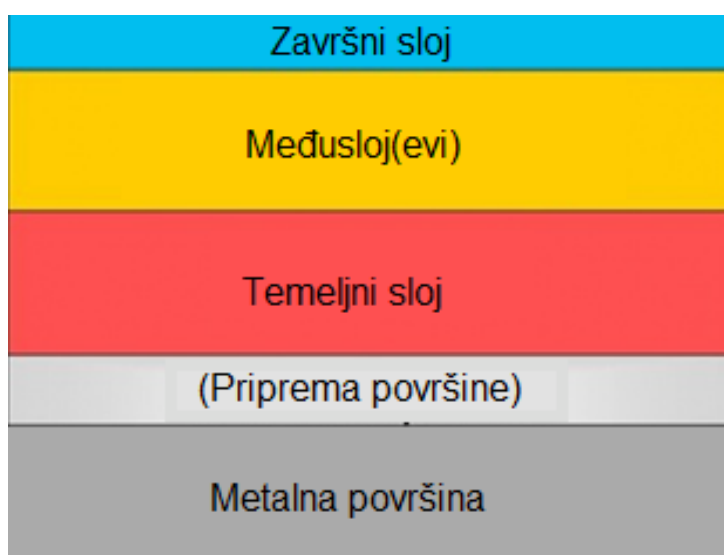
Koriste se iz brojnih razloga kao što su: snižavanje troškova, poboljšanje prijanjanja, poboljšanje otpornosti na koroziju i dobivanje mat finiša.

Aditivi se koriste u iznimno malim količinama za poboljšanje nekog specifičnog svojstva [29].

#### 4.2. Sustav premaza

U većini slučajeva sustav premaza sastoji se od dva do četiri sloja. Na temeljni sloj polaže se jedan ili više međuslojeva, a na kraju se polaže završni sloj. Svaki sloj ima svoju ulogu i razlikuje se po svojstvima. U nekim primjenama, za temeljni sloj i međusloj koristit se isti tip premaza [29].

Na slici 28 je shematski prikaz sustava premaza.



Slika 28. Shematski prikaz sustava premaza[30]

#### 4.2.1. *Temeljni sloj*

Temeljni sloj se aplicira direktno na očišćenu metalnu površinu. Njegova uloga je osigurati dobru adheziju slojeva koji slijede i osigurati zaštitu od korozije.

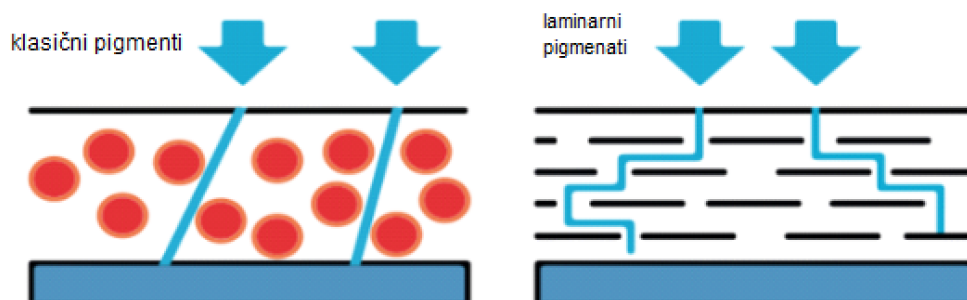
Postoje dva osnovna tipa temeljnoga sloja:

- temeljni sloj s metalnim elementima – aktivna zaštita i sprječavanje ionizacije
- temeljni sloj s visokom adhezijom i kemijskom otpornošću – pasivna zaštita, dobrom adhezijom sprječavaju pucanje temelja i pojavu hrđe [31].

#### 4.2.2. *Međusloj*

Međusloj se nanosi kako bi se postigla dovoljna debljina premaza. Može biti nanesen samo jedan ili više međuslojeva. Međuslojevi su prilagođeni tako da poboljšavaju ukupna svojstva sustava. Što je debljina veća to je trajanje premaza dulje. Većom debljinom premaza produljuje se put koji vlaga i zrak moraju proći da dođu do osnovnog materijala. Zaštita od vlage postiže se korištenjem laminarnih pigmenata koji otežavaju prolazak vode [31].

Na slici 29 prikazana je razlika klasičnih i laminarnih pigmenata



Slika 29. Prikaz razlike laminarnih i klasičnih pigmenata [32]

#### 4.2.3. *Završni sloj*

Završni sloj osigurava tražene estetske karakteristike i otpornost na mehanička oštećenja površine. Ovisno o okolišnim uvjetima završni sloj može imati različita svojstva: otpornost na ultraljubičasto zračenje, kondenzaciju, niske temperature, plamen i slično [31].



## 5. Postupak korozijske zaštite transformatorskog kotla nanošenjem premaza

Korozijska zaštita nanošenjem premaza složen je proces koji se sastoji od:

- pripreme
- čišćenja površine proizvoda
- nanošenja premaza
- kontrole kvalitete.

### 5.1. Priprema površine proizvoda

#### 5.1.1. *Stupnjevi pripreme površine proizvoda prema normi HRN EN ISO 8503-1 [33]*

Norma HRN EN ISO 8503-1 odnosi se na pripremu čeličnih podloga prije nanošenja premaza (boja i srodnih proizvoda) i svojstva hrapavosti površina čeličnih podloga čišćenih mlazom abraziva. Također sadrži specifikacije i definicije ISO komparatora profila površine za procjenu površina čišćenih mlazom abraziva.

Kako bi se osiguralo da sustav premaza pruža traženu dugotrajnost zaštite površine bitno je znati prepoznati početna stanja površine i stupnjeve pripreme površine.

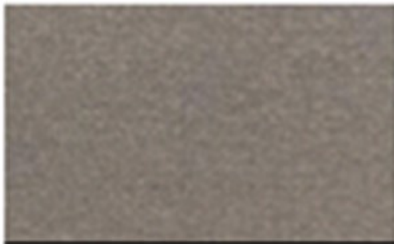

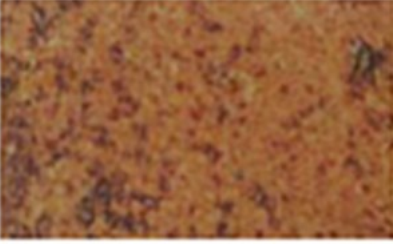
S obzirom na količinu i oblik hrđe norma HRN EN ISO 8503-1 razlikuje četiri početna stanja površine čelika (A, B, C, D).

U tablici 6 prikazana su četiri početna stanja površine čelika.

Čišćenje površine čelika u svrhu pripreme za nanošenje premaza također je propisano normom HRN EN ISO 8503-1. Stupnjevi pripreme površine podijeljeni su u šest grupa, četiri za metode abrazivnog i dvije za metode ručnog čišćenja.

U tablici 7 i 8 prikazani su prikladni standardni stupnjevi pripreme površine prije bojenja prema normi HRN EN ISO 8503-1

Tablica 6. Rangiranje početnih stanja površine čelika prema normi HRN EN ISO 8503-1 [34]

A	Čelična površina znatno pokrivena s prijanjajućom okujinom, ali s malo ili ništa hrđe	
B	Čelična površina koja je započela hrđati i s koje se okujina počela ljuskati.	
C	Čelična površina na kojoj je okujina zahrđala i otpala ili se može odstraniti struganjem, a koja pokazuje laganu dubinsku koroziju koja je vidljiva golim okom.	
D	Čelična površina na kojoj je okujina zahrđala i otpala i na kojoj je golim okom moguće vidjeti dubinsku koroziju rasprostranjenu po cijeloj površini	

Tablica 7. Standardni stupnjevi pripreme površine metodom abrazivnog čišćenja [34]

Sa 3	<p><b>Čišćenje mlazom abraziva do vizualno čistog čelika</b></p> <p>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe, premaza i stranih tijela.</p> <p>Površina mora imati ujednačenu metalnu boju.</p>
Sa 2 <sup>1/2</sup>	<p><b>Vrlo temeljito čišćenje mlazom abraziva</b></p> <p>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe, premaza i stranih tijela.</p> <p>Bilo koji ostaci onečišćenja smiju biti prisutni samo u vidu laganih mrlja nalik na točkice ili pruge.</p>
Sa 2	<p><b>Temeljito čišćenje mlazom abraziva</b></p> <p>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe premaza i stranih tijela. Bilo koji ostaci onečišćenja moraju dobro prijanjati.</p>
Sa 1	<p><b>Lagano čišćenje mlazom abraziva</b></p> <p>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, i slabo prijanjajući okujine, hrđe premaza i stranih tijela</p>

Tablica 8. Standardni stupnjevi pripreme površine metodom ručnog čišćenja [34]

St 3	<p><b>Vrlo temeljito ručno i strojno čišćenje</b></p> <p>Kao kod St 2, ali površinu treba obraditi daleko temeljitije kako bi se postigao metalni sjaj koji dolazi od metalne podloge.</p>
St 2	<p><b>Temeljito ručno i strojno čišćenje</b></p> <p>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, i slabo prijanjajući okujine hrđe, premaza i stranih tijela</p>

### 5.1.2. Stupnjevi pripreme površine čelika prema normi HRN EN ISO 8501-3 [35]

Osim pripreme abrazivnim čišćenjem prema normi HRN EN ISO 8503-1, površinu čelika prije nanošenja premaza bitno je pripremiti i sukladno normi HRN EN ISO 8501-3. Ova norma odnosi se na stupnjeve pripreme zavarenih spojeva, rubova i drugih površina s površinskim nepravilnostima.

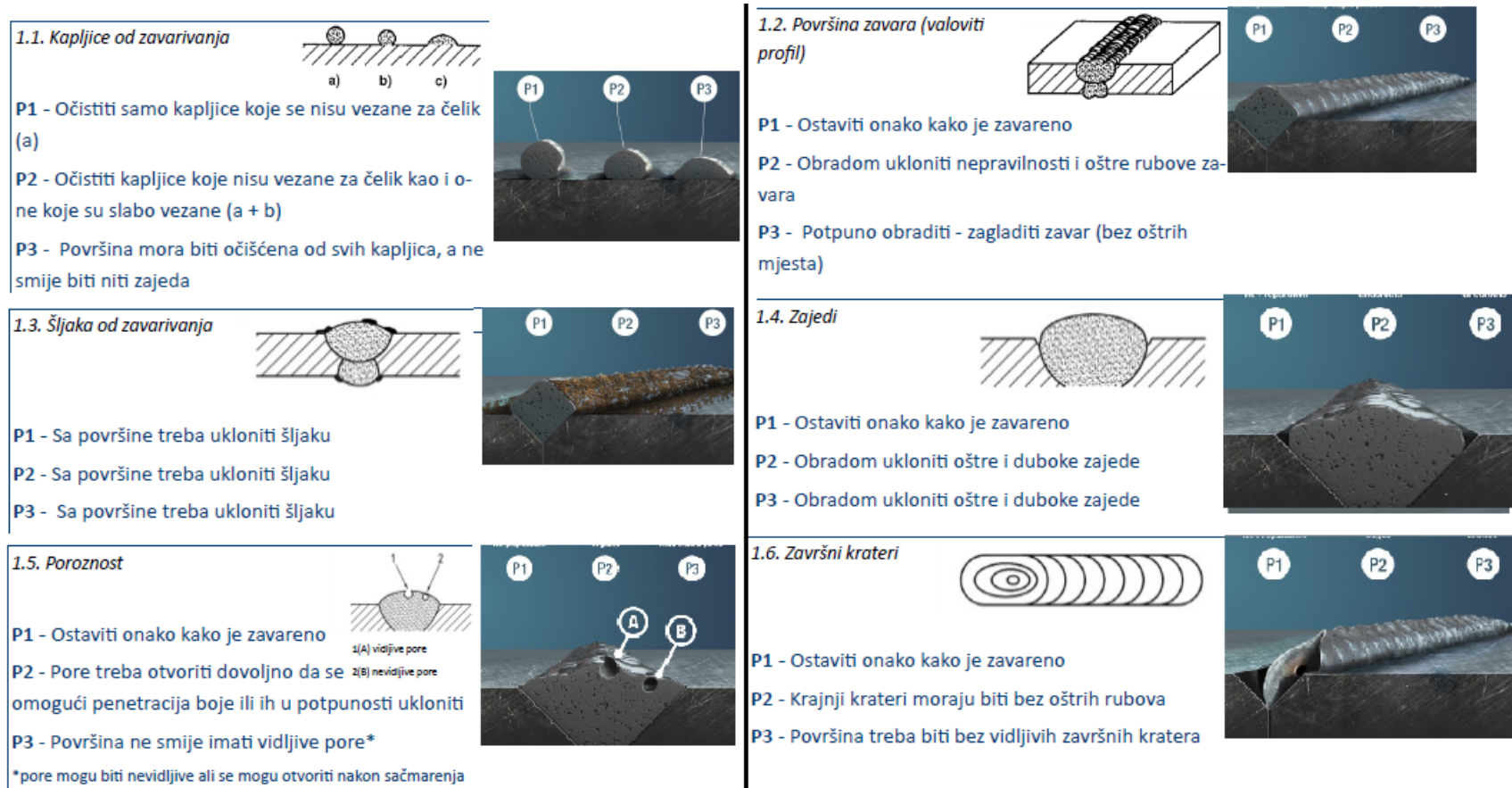
Prema normi postoje tri stupnja pripreme, kako je prikazano u tablici 9.

U istoj tablici prikazana je i korelacija s kategorijama korozivnosti za atmosferske uvjete okoliša iz norme EN ISO 12944-2 [36] (Tablica 14.):

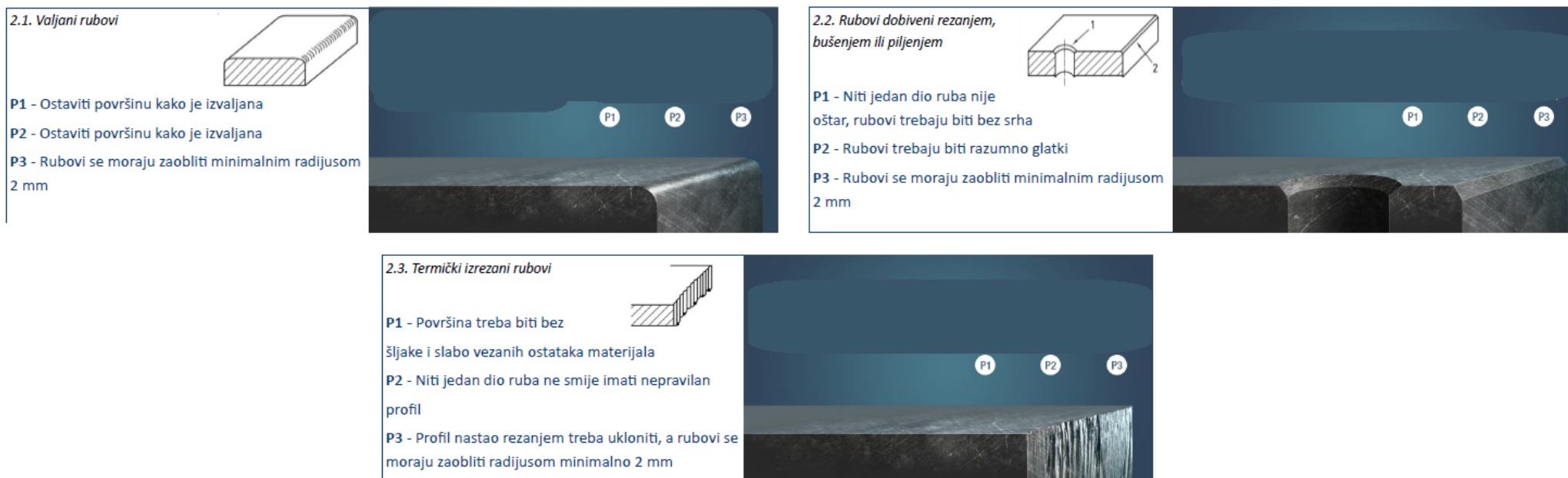
**Tablica 9. Korelacija između stupnjeva pripreme i kategorije korozivnosti prema EN ISO 8501-3, Aneks A [36]**

Stupanj pripreme		Kategorije korozivnosti
<b>P1</b>	<b>slaba priprema</b> - minimalna priprema prije aplikacije boje	C1 i C2
<b>P2</b>	<b>temeljita priprema</b> - većina nepravilnosti je uklonjena	C3 i C4
<b>P3</b>	<b>vrlo temeljita priprema</b> - površina je bez vidljivih nedostataka	C5-I i C5-M Im 1 do Im3

Na slici 30, 31 i 32 opisane su pogreške u zavarima, bridovima i površinske greške s obzirom na stupanj pripreme.

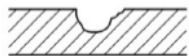


Slika 30. Pogreške u zavarima u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36]



Slika 31. Pogreške na rubovima u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36]

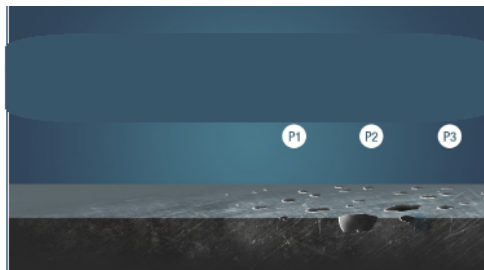
## 3.1. Jamice i krateri



**P1** - Jamice i krateri treba dostatno otvoriti da se omogući penetracija boje

**P2** - Jamice i krateri treba dostatno otvoriti da se omogući penetracija boje

**P3** - Površina treba biti bez jamica i kratera



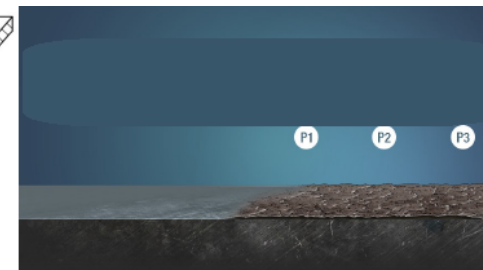
## 3.2. Ljuskanje



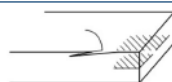
**P1** - Površina treba biti bez podignutog materijala

**P2** - Površina treba biti bez vidljivih ljuski

**P3** - Površina treba biti bez vidljivih ljuski



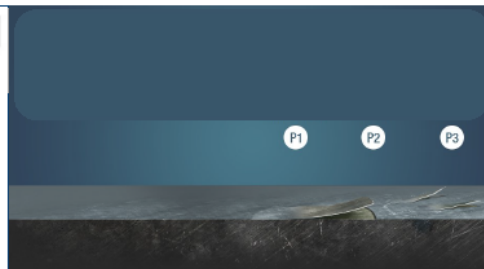
## 3.3. Raslojavanje (valjanjem, rezanjem)



**P1** - Površina treba biti bez podignutog materijala

**P2** - Površina treba biti bez vidljivog raslojavanja

**P3** - Površina treba biti bez vidljivog raslojavanja



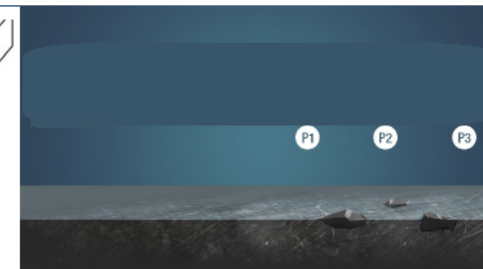
## 3.4. Uvaljane strane stvari



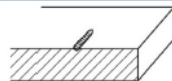
**P1** - Površina treba biti bez stranih materijala

**P2** - Površina treba biti bez stranih materijala

**P3** - Površina treba biti bez stranih materijala



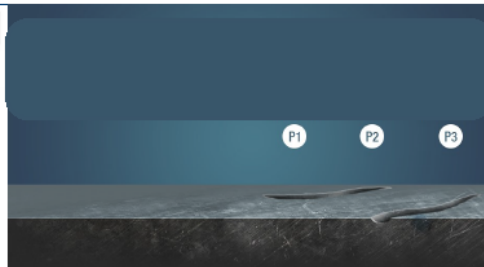
## 3.5. Utori i brazde uslijed mehaničkih aktivnosti



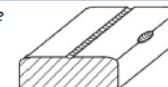
**P1** - Površina ostaje kakva je

**P2** - Radijus utora treba biti minimalno 2 mm

**P3** - Površina treba biti bez utora i brazdi, radijus treba biti veći od 4 mm



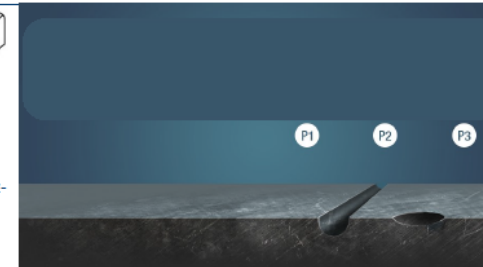
## 3.6. Udubljenja i uvaljane oznake



**P1** - Površina ostaje kakva je

**P2** - Udubljenja i uvaljane oznake trebaju biti glatke

**P3** - Površina treba biti bez udubljenja i uvaljanih oznaka (otisci hvataljki, ostaci prihvatnih zavora,...)



Slika 32. Općenite pogreške na površini u skladu s normom HRN EN ISO 8501-3 [35,36]

- **Bravarska priprema**

Bravarska priprema je skup bravarskih postupaka kojim se osigurava da zavarena konstrukcije zadovoljava određenu klasu propisanu normom i ima zadovoljavajući stupanj pripreme površine prema normi HRN EN ISO 8501-3 (P1, P2, P3).

Kvaliteta površine u području zavarenih spojeva prije nanošenja premaza provjerava se nerazornim metodama kontrole kao što su vizualna metoda, ispitivanje penetrantima, ispitivanje magnetnim česticama i ispitivanje ultrazvukom.

Bravarska priprema obavlja se u radionici, a obuhvaća sljedeće aktivnosti:

- skidanje svih oštih bridova i srhova na proizvodu
- doradu zavara: zajeda, poroznosti, zavarnih kaplji i ostalih grešaka
- utiskivanje brojeva i drugih oznaka na proizvod
- odmašćivanje te zaštitu navoja i obrađenih površina za operaciju abrazivnog čišćenja površine.

Na slici 33 prikazana je završna dorada transformatorskog kotla prije čišćenja mlazom abrazivnih čestica [36].



**Slika 33. Završne dorade transformatorskog kotla prije čišćenja mlazom abraziva**



- **Ručno čišćenje površina**

Metode ručnog čišćenja uglavnom se koriste za površine na kojima nije moguće primjeniti metodu čišćenja mlazom abraziva. Za čišćenje se koriste strugalice, četke i električni alati kao što je brusilica.

Na slici 34 prikazani su postupci ručnog čišćenja s nekim alatima.



Slika 34. Neki alati za metodu ručnog čišćenja [37]

- **Čišćenje površina metodom abrazivnog čišćenja**

Postupak čišćenja obavlja se u zatvorenoj komori uporabom oštrobriđne sačme granulacije od 0,4 do 0,75 mm.

Čišćenje površine metodom abrazivnog čišćenja obuhvaća sljedeće aktivnosti:

- Čišćenje oštrobriđnom sačmom u zahtijevanoj kvaliteti. Čistoća površine se utvrđuje sukladno normi EN ISO 8501-1 usporedbom tretirane površine s fotoetalonima. Profil hrapavosti određuje se prema normi EN ISO 8503-1, a ostvarena hrapavost provjerava se vizualnim komparatorom hrapavosti. Za premazivanje bojama uobičajena kvaliteta čistoće površine je Sa 2.5 (ako zahtjev nije drugačiji).
- Čišćenje proizvoda od zaostale sačme, ispuhivanje komprimiranim zrakom ili usisavanjem.
- Kontrola kvalitete očišćenosti i estetike proizvoda – ako se pronađu greške slijedi ponovno sačmarenje.

- Odmašćivanje površine kemijskim otapalima. Nakon odmašćivanja nisu dozvoljene nikakve aktivnosti i potrebno je započeti temeljni sloj u određenom vremenskom periodu [36].

Na slici 35 prikazano je čišćenje od zaostale sačme ispuhivanjem komprimiranim zrakom



Slika 35. Ispuhivanje zaostale sačme komprimiranim zrakom

## 5.2. Nanošenje sustava premaza

Najdulje dozvoljeno razdoblje čekanja za nanošenje premaza ovisno je o klimatskim uvjetima. U tablici 10 prikazan je propisani period unutar kojeg se mora nanijeti prvi sloj premaza za klimatske uvjeta središnje Hrvatske [36].

Tablica 10. Najdulje vrijeme čekanja između čišćenja i nanošenja premaza [36]

Vanjska temperatura, °C	Vlažnost zraka, %	Najdulje vrijeme između čišćenja abrazivom i nanošenja premaza
normalna (18 do 20)	70 do 80	8 do 12 sati
različita od normalne	90 do 100	4 do 6 sati

Nanošenje svih premaza izvodi se isključivo u prostoru lakirnice.

### 5.2.1. Predradnje za nanošenje premaza

Nakon odmašćivanja počinje se s predradnjama za nanošenje premaza. Pripremne operacije izvode se u predprostoru lakirnice, a obuhvaćaju sljedeće korake:

- Postavljanje transformatorskog kotla u poziciju pogodnu za lakiranje.
- Maskiranje površina koje se ne lakiraju (navojne rupe, strojno obrađene površine i slično).
- Ujednačavanje temperature transformatorskog kotla i okoliša. Temperatura pri kojoj se nanose premazi mora biti barem 3 °C viša od točke rosišta.
- Pripremu pribora i alata.
- Miješanje i priprema premaznih sredstava. Dvokomponentne premaze zamiješati u pravilnom omjeru prema uputi proizvođača. Prema potrebi vrši se razrjeđivanje.

Na slici 36 prikazano je miješanje i priprema premaza [36].



Slika 36. Miješanje temeljnog premaza

### 5.2.2. *Nanošenje temeljnog premaza*

Obavlja se nakon čišćenja mlazom abraziva i izvršenih svih predradnji. Nanošenje temeljnog premaza najvažniji je korak u površinskoj zaštiti metala. Korektnost izvođenja ovog koraka osigurava kvalitetu i trajnost površinske zaštite.

Proces nanošenja prvog temeljnog premaza obavlja se korištenjem suvremenih tehnologija nanošenja koje uključuju zračno i bezzračno špricanje. Bez obzira na vrstu temeljnog premaza, nanošenje se odvija u tri koraka:

- **korak 1:** Valjkom i/ili kistom premažu se sva udubljenja, razni izdanci, odnosno teško pristupačne površine te sve površine koje su u nadglavnom položaju kod prskanja.
- **korak 2:** Nanošenje premaza bezzračnim uređajem do debljine prvog temeljnog premaza, koja je zadana prema specifikaciji u tehnološkoj dokumentaciji.
- **korak 3:** Ovisno o mikroklimatskim uvjetima, temperaturi boje, tipu i debljini premaza te načinu nanošenja, međuslojni interval sušenja određen je uputama proizvođača boje [36].

### 5.2.3. *Nanošenje međuslojnih premaza*

Međuslojnim premazom postiže se veza između završnog, pokrivnog i temeljnog premaza. Njime se postiže ukupna debljina filma premaza. Kao međusloj, ponekad, koristi se isti premaz kao prvi temeljni premaz, a ponekad premaz različite nijanse od temeljnog i pokrivnog. Nanošenje se odvija u sljedećim koracima uz uvažavanje vremena međusušenja [36].

- **korak 1:** Valjkom i/ili kistom premažu se sva udubljenja, razni izdanci, odnosno teško pristupačne površine te sve površine koje su u nadglavnom položaju kod prskanja.
- **korak 2:** Nanošenje prvog međusloja.
- **korak 3:** Nanošenje drugih međuslojeva, ako postoji zahtjev.

Na slici 37 prikazano je nanošenje međusloja valjkom i kistom na teško dostupna mjesta



**Slika 37. Nanošenje međusloja na teško dostupna**

Nakon sušenja međusloja (ili međuslojeva) potrebno je:

- ukloniti sve curke i slijevanja
- izvršiti kontrolu debljine premaza na cijelom transformatorskom kotlu, označiti površine gdje je debljina premala, kao i površine gdje je debljina premaza prevelika
- po potrebi popraviti debljine premaza; na mjestima gdje je debljina pretanka ponovo premazati, a predebele slojeve pobrusiti brusnim papirom [36].

#### **5.2.4. Nanošenje završnog premaza**

Nanošenje završnog premaza posebno je važno iz dva razloga:

- estetskog izgleda proizvoda
- trajnosti površinske zaštite u uvjetima eksploatacije.

Nanošenju završnog sloja može se pristupiti tek nakon obavljenih prethodno opisanih aktivnosti i potrebnog minimalnog propisanog vremena sušenja. Nanošenje završnog premaza odvija se u sljedećim koracima:



- **korak 1:** Uklanjanje nepravilnosti (curci, ugrađene nečistoće i slično)
- **korak 2:** Valjkom i/ili kistom premažu se sva udubljenja, razni izdanci, odnosno teško pristupačne površine te sve površine koje su u nadglavnom položaju kod prskanja. Nanošenje završnog premaza potrebno je nanjeti što jednoličnije, debljine filma ovisno o tipu premaza i zadanoj specifikaciji.
- **korak 3:** Sušenje premaza uključuje fizikalni i kemijski proces sušenja. Premazani predmeti mogu se izvesti izvan prostora lakirnice kada je fizikalni proces sušenja završen. Predmet se prebacuje u prostor ispred lakirnice ili u otpremni-transportni prostor. Prema podatku iz tehničke specifikacije premaza fizikalni proces sušenja je gotov kada je premaz suh na dodir. Kemijski proces sušenja traje dulje od fizikalnog. Na slici 38 prikazan je transformatorski kotao u fazi sušenja premaza.



**Slika 38. Transformatorski kotao u fazi sušenja premaza**

- **korak 4:** Okretanje proizvoda u položaj za transport te dorada oštećenih mjesta i brtvenih površina.
- **korak 5:** Sušenje eventualnih popravaka i konačno sušenje. Vrijeme sušenja, fizikalnog i kemijskog, određeno je uputama proizvođača premaza ili prema posebnim zahtjevima kupca. Boja mora biti u potpunosti suha prije sljedećeg koraka.
- **korak 6:** Kontrola i izmjere debljine filma premaza te kontrola estetskog izgleda. Nakon završetka kontrole, ukoliko je premaz zadovoljavajuće kvalitete, odgovorni kontrolor daje odobrenje za proces pakiranja i otpreme [36].

## 6. Odabir sustava premaza u skladu s normom HRN EN ISO 12944

### 6.1. Uvod

Sustavi premaza imaju široku namjenu za korozijsku zaštitu raznovrsnih čeličnih konstrukcija. Kako bi se smanjili problemi i nesporazumi važno je da postoji skup smjernica i pravila kojim se može odrediti prikladan sustav premaza za određenu namjenu. Norma HRN EN ISO 12944 bavi se zaštitom premazima i podijeljena je na devet dijelova [38].

Tablica 11 prikazuje dijelove norme HRN EN ISO 12944.

**Tablica 11. Dijelovi norme HRN EN ISO 12944 [39]**

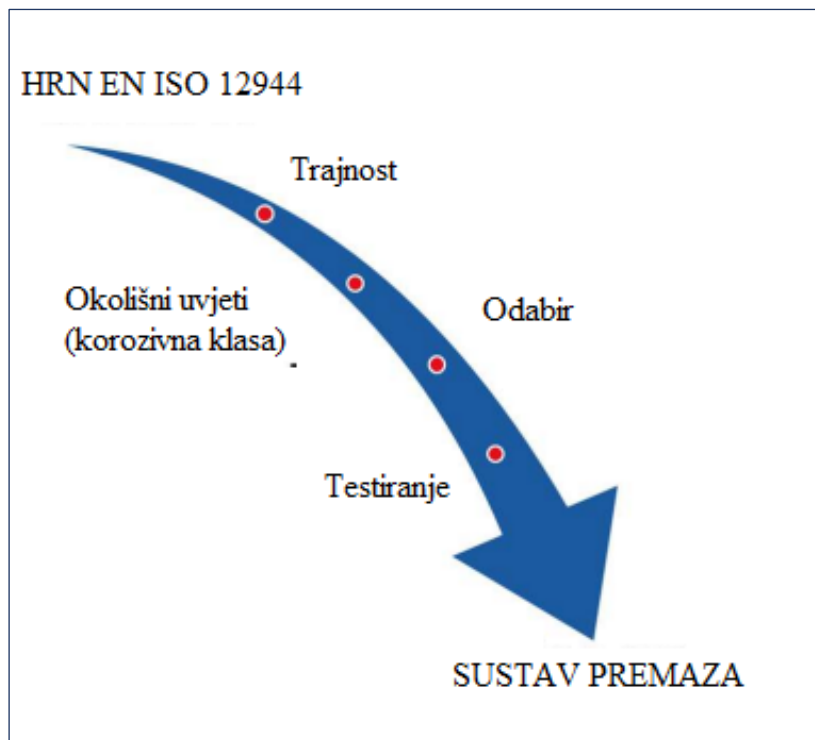
<b>ISO 12944-1</b>	Generalna uputstva
<b>ISO 12944-2</b>	Klasifikacija medija
<b>ISO 12944-3</b>	Oblikovanje konstrukcija
<b>ISO 12944-4</b>	Tipovi površina i priprema površine
<b>ISO 12944-5</b>	Zaštitni premazni sistemi za čelične konstrukcije
<b>ISO 12944-6</b>	Laboratorijsko ispitivanje svojstava
<b>ISO 12944-7</b>	Izvršavanje i inspekcija postupka premazivanja
<b>ISO 12944-8</b>	Razvoj i specificiranje projekata te održavanje
<b>ISO 12944-9</b>	Laboratorijsko ispitivanje svojstava za odobalne i povezane objekte i slične konstrukcije

Za uspješan odabir ispravnog sustava premaza bitno je znati osnovne zahtjeve za sustav premaza. Kad je sustav premaza odabran sukladno parametrima, bitno ga je testirati, kako bi se potvrdilo da je odabrano tehnički i ekonomski prihvatljivo rješenje.

Glavni parametri kojima se odabire sustav su okolišni uvjeti i željeni vijek trajanja sustava.

Na slici 39 shematski je prikazan proces odabira sustava premaza sukladno normi HRN EN ISO 12944.





Slika 39. Proces odabira sustava premaza sukladno normi HRN EN ISO 12944 [39]

## 6.2. Oblikovanje konstrukcije

Prije odabira sustava premaza bitno je uzeti u obzir utjecaj konstrukcijskih rješenja na korozivnu otpornost. Na slici 40 dani su primjeri konstrukcija koje treba izbjegavati.



Slika 40. Konstrukcijska rješenja koja treba izbjegavati [39]

## 6.3. Vijek trajanja sustava premaza

Vijek trajanja sustava nije jasno definiran. Određuje se s obzirom na zahtjeve korisnika. Definiran je kao period u kojem zadana gornja granica postotaka površine ne smije imati stupanj

hrđanja veći od dogovorenog. Stupanj hrđanja površine zaštićene premazom definiran je normom HRN EN ISO 4628-3 [40]

Za odabir sustava premaza norma HRN EN ISO 12944-1 definira raspone vijeka trajanja.

U tablici 12 prikazane su vremenski okviri trajnosti.

**Tablica 12. Vremenski okviri trajnosti [38]**

NIZAK – L	$\leq 7$ godina
SREDNJI – M	7 do 15 godina
VISOK – H	15 do 25 godina
VRLO VISOK – H	više od 25 godina

#### 6.4. Okolišni uvjeti

Neki su okolišni uvjeti više agresivni od drugih, primjerice obalna područja. Konstrukcije koje su u zatvorenom manje su sklone koroziji od onih koje su na otvorenom.

Drugi dio norme HRN EN ISO 12944 opisuje šest vanjskih i pet unutarnjih okoliša. Prilikom odabira korozivne klase bitno je uzeti u obzir sljedeće:

- vlažnost i temperaturu (temperatura u eksploataciji i temperaturni gradijente)
- prisutnost ultraljubičastog zračenja
- kemijsku izloženost
- mehanička oštećenja
- ako se radi o konstrukcijama ukopanim u tlo ili o konstrukcijama uronjenim u vodu, potrebno je uzeti u obzir korozivnost medija u kojem se konstrukcija nalazi. U normi postoje 4 kategorije [38].

U tablici 13 navedene su kategorije korozivnosti s obzirom na atmosfersku koroziju, a u tablici 14 prikazane su kategorije korozivnosti za konstrukcije ukopane u tlo ili uronjene u vodu [29].

Tablica 13. Temeljne kategorije korozivnosti koje se odnose na atmosfersku koroziju [34]

Kategorija korozivnosti	Primjeri okoliša	
	vanjski	unutarnji
<b>C1</b> jako niska		Grijane zgrade sa čistom atmosferom, poput ureda, dućana, škola, hotela
<b>C2</b> niska	Lagano onečišćena atmosfera, uglavnom ruralna područja	Negrijane zgrade u kojima može doći do pojave kondenzacije, npr. spremišta, sportske dvorane
<b>C3</b> srednja	Urbana i industrijska atmosfera s prosječnom razinom onečišćenja sumpornim oksidom (IV); priobalna područja niske razine saliniteta	Proizvodni objekti s visokom vlažnošću i određenim stupnjem onečišćenja zraka, npr. tvornice hrane, praonice, pivovare, mljekare
<b>C4</b> visoka	Industrijska i priobalna područja srednjeg saliniteta	Kemijske tvornice, bazeni, remontna brodogradilišta
<b>C5</b> Vrlo visoka	Industrijska područja s vrlo visokom vlažnošću i agresivnom atmosferom te priobalna područja visoke razine saliniteta	Zgrade i površine sa gotovo konstantnom kondenzacijom i visokom razinom onečišćenja
<b>CX</b> ekstremna	Odobalni i povezani objekti u području s visokom razinom saliniteta ili industrijska područja ekstremne vlažnosti i agresivne atmosfere ili subtropska i tropska područja	Zgrade i površine sa gotovo konstantnom kondenzacijom i agresivnim onečišćenjem

Tablica 14. Kategorije korozivnosti za konstrukcije uronjene u vodu ili tlo [34]

Kategorija korozivnosti	Okoliš	Primjeri okoliša i konstrukcija
<b>Im1</b>	slatka voda	Instalacije na rijekama, hidroelektrane
<b>Im2</b>	morska ili boćata voda	Uronjene konstrukcije bez katodne zaštite (npr. luke s opremom kao što su vrata ustava, brane, podesti iznad vode, odobalni i povezani objekti)
<b>Im3</b>	tlo	Podzemni spremnici, čelični podesti, cjevovodi
<b>Im4</b>	morska ili boćata voda	Uronjene konstrukcije s katodnom zaštitom (npr. luke s opremom kao što su vrata ustave, brane, podesti iznad vode, odobalni i povezani objekti)

Kombinacija različitih okolišnih uvjeta, ukupna agresivnost okoliša, utjecat će na konačnu odluku o:

- vrsti boje koja će se koristiti
- ukupnoj debljini premaza
- potrebnoj pripremi površine
- minimalnim i maksimalnim intervalima između premaza.

### 6.5. Primjer specifikacije za korozivnu zaštitu transformatorskog kotla

Specifikacija za korozivnu zaštitu je dokument koji je specijalno pripremljen za točno odrađenu namjenu nekog transformatorskog kotla. To je dokument koji daje osnovne informacije za sustav premaza koji je potrebno koristiti. Iz njega se može iščitati broj slojeva premaza, zasebne debljine svakog sloja i vrstu premaza koju treba koristiti. Osim informacija o premazu, u specifikaciji su zadani opseg i zahtjevi ispitivanja kvalitete pripreme površine i nanosa sustava premaza. U tablici 15 prepisani su zahtjevi iz specifikacije za korozivnu zaštitu.

Tablica 15. Zahtjevi specifikacije korozijske zaštite [36]

Priprema površina						
Kontrolna točka	Metoda ispitivanja	Kriterij prihvatljivosti				
Vizualna kontrola	ISO 8501-3	P3				
Dust test	ISO 8502-3	ne više od klase 2				
Brestle test	ISO 8502-8	maksimalna električna provodnost ekvivalentna 50mg/m <sup>2</sup> NaCl				
Čistoća površine	ISO 8501-1	SA2,5				
Hrapavost	ISO 8503-1	komparator "G" M (Rz od 50 do 100 μm)				
Kontrola nanosa sustava premaza						
Kontrolna točka	Metoda ispitivanja	Kriterij prihvatljivosti				
Vizualna inspekcija boje	rupice, curenje, površinske greške, kapljice boje	sve vidljive greške popraviti				
Pull off test	ISO 4624 (debljina > 250um)	minimum 5,0 MPa				
Debljina boje	Mjerenje debljine boje	<b>C5-M</b>	nominalna	min. lokalna	maks. lokalna	∑ maks
		temelj	60	90	120	120
		međusloj	140	350	500	620
		završni sloj	80	200	300	920

## 7. Nadzor i kontrola korozijske zaštite u proizvodnji transformatorskog kotla

U svakom proizvodnom postupku potrebna je kontrola. U ovome poglavlju bit će prikazani postupci kontrole korozijske zaštite premaza na primjeru transformatorskog kotla sa specifikacijama zadanim u poglavlju 6.5.

### 7.1. Površina

Kontrola kvalitete površine transformatorskog kotla provodi se prije i nakon sačmarenja. Površina je zadovoljavajuće kvalitete ako su ispunjeni traženi zahtjevi pripreme i ako ima zadovoljavajuću čistoću te profil hrapavosti.

#### 7.1.1. Stupnjevi pripreme prema normi HRN EN ISO 8501-3

##### Zadani su zahtjevi:

- Sve površine na koje se nanosi sustav premaza moraju ispuniti zahtjeve norme HRN EN ISO 8501-3 sa stupnjem pripreme zavara P3 – posebnu pozornost obratiti na kapljice od zavarivanja, zajede i završne kratere, prema tablici 15.

##### Metoda kontrole:

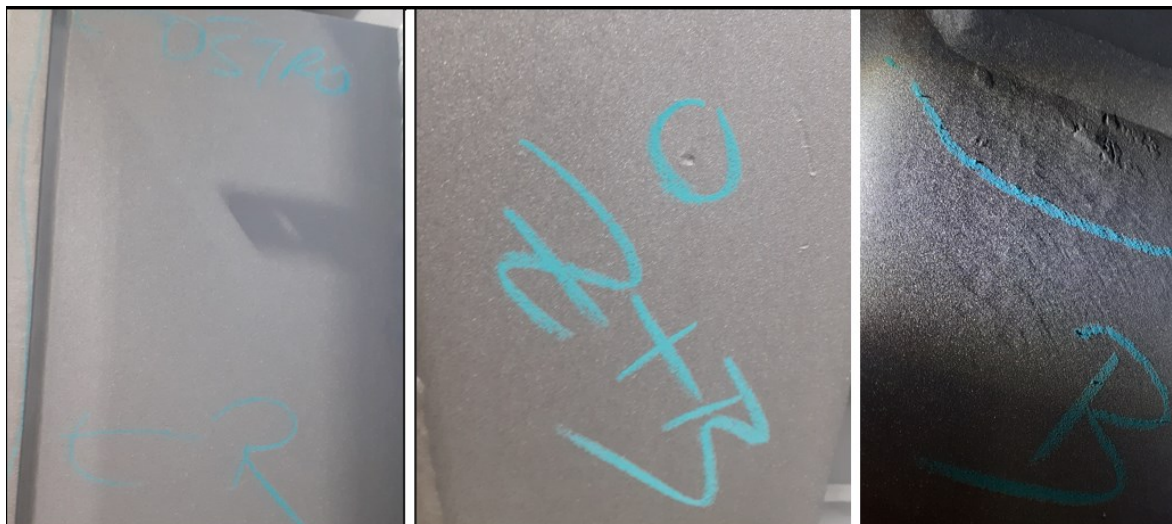
- Vizualna kontrola

##### Provođenje kontrole:

- Kontrola se provodi prije ulaska u sačmaru. Svi zavari, rubovi i površine se pregledavaju i uočene pogreške se označavaju. Ova kontrola se odvija u sklopu bravarske pripreme.

Na slici 41 prikazane su neke od pronađenih grešaka. Slovima B, Z i R označeno je kako treba popraviti greške (Z – doraditi zavar, B – obrusiti površinu, R – napraviti radijus).

Sve uočene greške potrebno je popraviti prije odlaska u sljedeći korak proizvodnje. Nakon popravka i pregleda, prema potrebi, slijedi ponovno sačmarenje.



Slika 41. Neke greške pronađene vizualnom kontrolom

### 7.1.2. *Stupnjevi pripreme površine prema normi HRN EN ISO 8501-1*

#### Zadani su zahtjevi:

Sve površine na koje se nanosi sustav premaza moraju biti pripremljene metodom abrazivnog čišćenja i ispuniti zahtjeve norme HRN EN ISO 8501-1 za stupanj čistoće Sa 2,5 i početno stanje površine A ili B, prema tablici 15.

#### Metode kontrole

- Dust test ISO 8502-3 – veličina čestica ne smije biti veća od klase 2
- Brestle test (ISO 8502-6) – maksimalana električna provodnost ne smije biti veća od 50 mg/m<sup>2</sup> (ekvivalent NaCl).

#### Provođenje kontrole :

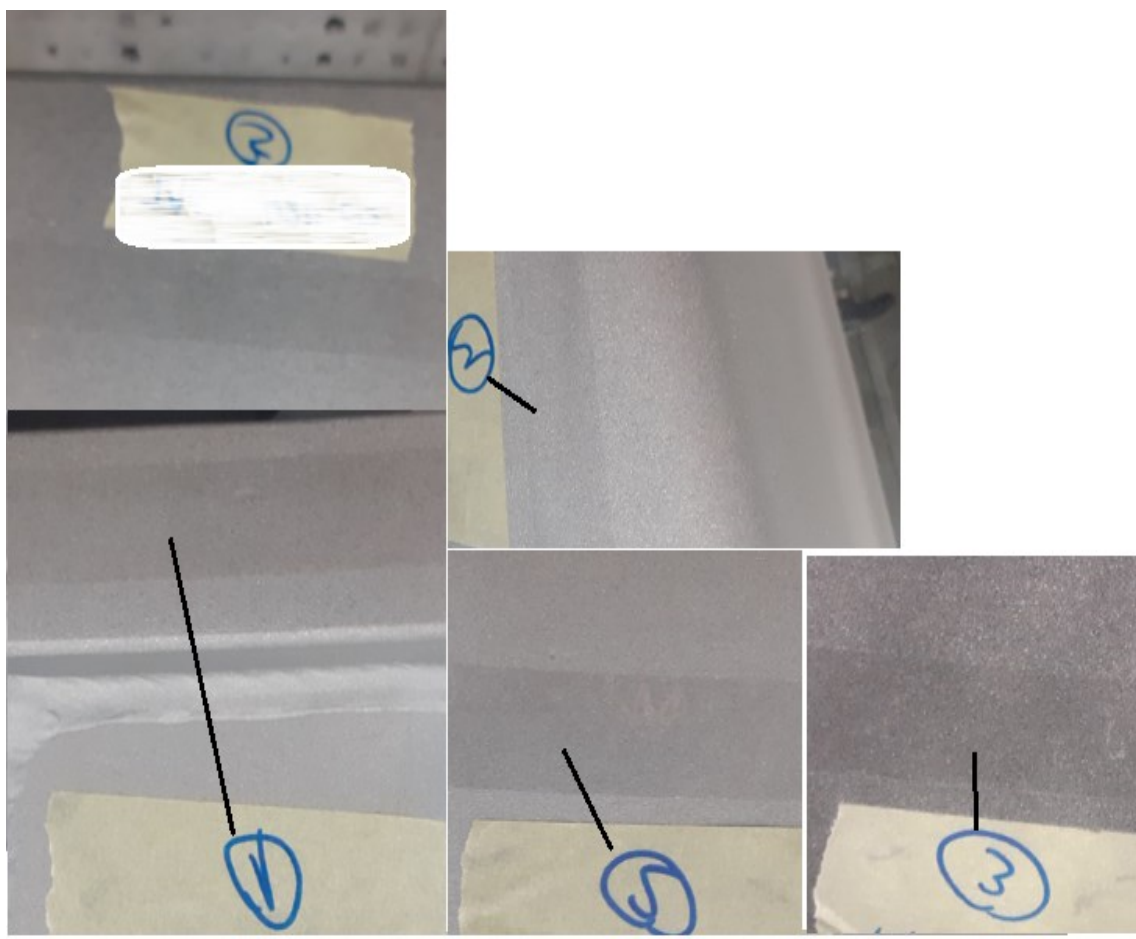
##### ***Dust test prema normi ISO 8502-3 [41]***

Dust test se koristi za utvrđivanje da su ostaci sačme i prašine uklonjeni sa sačmarene površine. Posebna traka širine 25 mm i prijanjanja od minimalno 190 N/m zalijepljena je na pet različitih mjesta. Traka se lijepi nakon što je maknuto prvih 200 mm trake. Traka se naslanja na površinu koja se ispituje i čvrstim pritiskom palca lijepi na nju. Norma propisuje da se palcem preko trake prijeđe ukupno tri puta kako bi se osigurala što bolja prionjivost trake uz sačmarenu površinu. Nakon odljepljivanja, količina i veličina čestica zalijepljenih na traku, vizualno se

uspoređuje uz pomoć povećala s referentnim kategorijama iz norme. Čestice prašine klase 2 nisu vidljive golim okom već uz povećanje od 10×. Za provođenje testa korišten je ELCOMETER 142 set za Dust-test.

Na slici 42 prikazane su zalijepljene trake na nekoliko različitih lokacija, a na slici 43 prikazano je izvješće provedenog Dust-testa na prikazanim lokacijama.

Analiza rezultata pokazala je da veličina i količina čestica zadovoljava uvjete za svrstavanje u čestice klase 2.



**Slika 42. Trake za Dust-test na različitim lokacijama**



**Eicometer 142 Dust Assessment  
In Accordance With ISO 8502-3**

*Evaluation de la quantité de poussière selon ISO 8502-3 - Staubschätzung in Übereinstimmung mit ISO 8502-3*

[Redacted]

Dust quantity rating (Mean): 2      Dust particle size: (See table) 2

*Quantité de poussière (moyenne) - Staubschätzung (Durchschnitt)*      *Taille des particules de poussière (voir tableau) - Staubschätzung (Vgl. Tabelle)*

Test 1	
Test 2	
Test 3	
Test 4	
Test 5	

**Dust Quantity Rating** *Quantité de poussière - Staubschätzung*

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

[Redacted]

Surface identification: \_\_\_\_\_  
*Identification surface - Identifizierung der Oberfläche*

Substrate backing used:  Eicometer 142 (714219454)       Other \_\_\_\_\_  
*Support utilisé: Eicometer 142 (714219454) / Autre - Anders*

Nature of surface tested: \_\_\_\_\_  
*Nature de la surface testée - Beschaffenheit der getesteten Oberfläche*

Eicometer 142       Other

Slika 43. Izvješće Dust testa prema ISO 8502-3

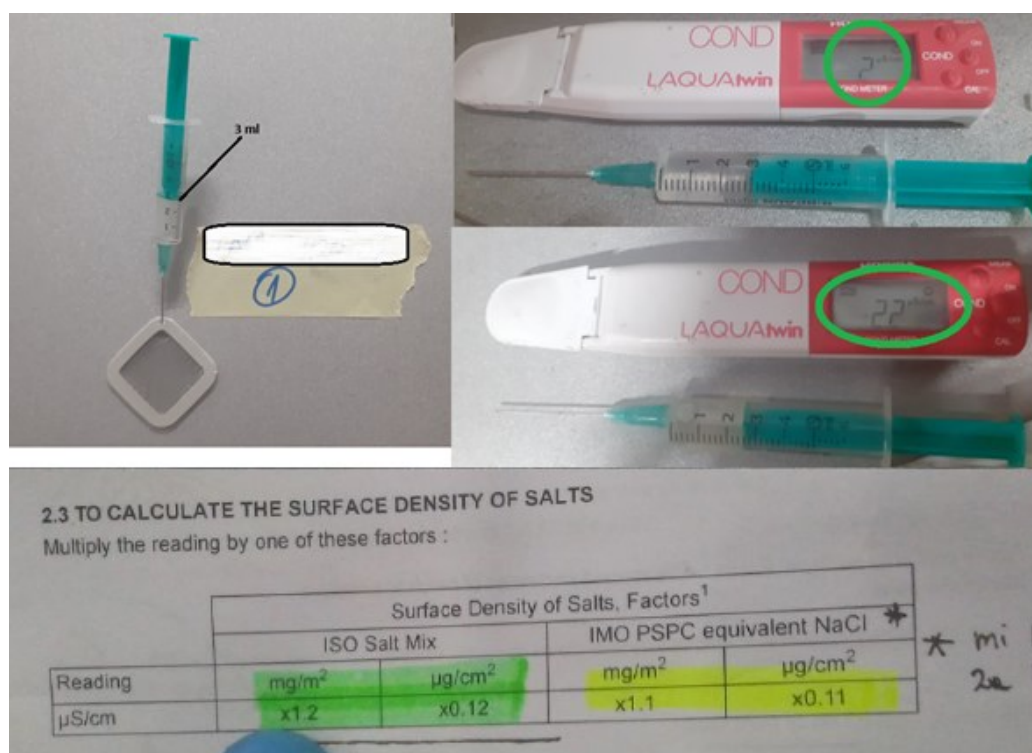
### Brestle test prema normi HRN EN ISO 8502-6 [42]

Brestle test se koristi za utvrđivanje koncentracije topivih soli na površini očišćenog metala. Provodi se mjerenjem električne provodnosti destilirane vode, kojom je očišćena mala zona površine.

U jastučić zalijepljen na površinu kroz spužvasti okvir se pomoću šprice ubrizga 3ml destilirane vode. Destilirana voda ostavi se 10 min s povremenim miješanjem koje se izvodi izvlačenjem i uvlačenjem špricom. Nakon 10 minuta voda iz jastučića stavlja se na uređaj Elcometer 138 Horiba gdje se mjeri električna provodnost. Uređaj pokazuje vrijednost električne provodnosti u  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Dobivena vrijednost preračunava se u koncentraciju topivih soli množenjem s odgovarajućim faktorom i izražava u  $\text{mg}/\text{m}^2$ .

U konkretnom mjerenju faktor je imao vrijednost 1,1. Prema zahtjevu naručitelja ispitivanja koncentracija u  $\text{mg}/\text{m}^2$  nije smijela biti veća od  $50 \text{ mg}/\text{m}^2$ . Prije početka mjerenja izmjerena je inicijalna koncentracija ( $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) koja je oduzeta od konačne izmjere.

Izmjerena električna provodnost je  $22 \mu\text{S}/\text{cm}$ , a nakon provedenog izračuna koncentracija NaCl iznosila je  $20 \text{ mg}/\text{m}^2$ , što znači da je koncentracija ispod zadane granične vrijednosti od  $50 \text{ mg}/\text{m}^2$ . Na slici 44 prikazan je jastučić s destiliranom vodom i izmjerene vrijednosti električne provodnosti.



Slika 44. Brestle test

## Stupanj čistoće površine prema normi ISO 8501-1

Stupanj čistoće površine nakon sačmarenja određuje se vizualno, bez optičkih pomagala. Nakon vizualne usporedbe površine s opisom iz norme ustanovljeno je da je stupanj abrazivnog čišćenja Sa 2,5.

### 7.1.3. Hrapavost površine

#### Zadani su zahtjevi

- Hrapavost površine  $R_z$  treba biti u granicama između 50  $\mu\text{m}$  i 100  $\mu\text{m}$ , klasa M.

#### Metoda kontrole:

- Prema normi ISO 8503-1 - usporedba s vizualnim komparatorom hrapavosti, tip G. Profil hrapavosti sačmarene površine treba se podudarati s profilom odgovarajućeg sektora na komparatoru.

#### Provođenje kontrole :

Komparator se prislanja na sačmarenu metalnu površinu koja se uspoređuje s referentnom površinom komparatora. prema zadanim zahtjevima profil hrapavosti mora odgovarati sektoru 2.

Usporebom referentne površine komparatora i sačmarene površine utvrđeno je da su traženi zahtjevi ispunjeni . Na slici 45 prikazana je kontrola profila hrapavosti.



Slika 45. Komparator za kontrolu profila hrapavosti

## 7.2. Debljina suhog filma

### Zadani su zahtjevi

- Područja mjerenja debljine suhog filma moraju se odrediti sukladno normi HRN EN ISO 19840 [43]. Normom je propisan i broj potrebnih mjerenja s obzirom na površinu. U konkretnom ispitivanju obavljeno je 60 mjerenja.
- Aritmetička sredina svih mjerenja debljine boje mora biti jednaka ili veća od nominalne debljine suhog filma.
- Svako pojedinačno mjerenje mora imati debljinu barem 80 % od nominalne, ukoliko je takvih mjerenja manje od 20 % ukupno mjerenih.
- Mjerenja se rade na svakom sloju. Ukupni zbroj srednjih vrijednosti svih slojeva smije biti maksimalno duplo veći od zbroja nominalnih debljina.

### Provođenje kontrole :

Kontrola mjerenja debljine suhog filma radi se nakon svakog nanesenog sloja. Napravljeno je 60 različitih mjerenja, od kojih je 50 % mjereno na teže dostupnim mjestima.

Na slici 46 prikazana je izmjera debljine boje u prvom međusloju. Za mjerenje debljine boje korišten je uređaj ELCOMETER 456.



Slika 46. Izmjera debljine boje

U tablici 16 prikazani su rezultati mjerenja debljine suhog filma.

Tablica 16. Rezultati mjerenja debljine suhog filma [36]

	Debljina, $\mu\text{m}$			srednja vrijednost	Udio mjerenja s debljinom < nominalne	Kontrolni uređaj
	nominalna	lokalna min	maks			
<b>Kriterij</b>	/	$> 0,8 \times (\text{nominalne})$	$< \text{maks}$	$\geq \text{nominalne}$	$< 20 \%$	
<b>Temelj</b>	60	65	122	90	0,00 %	ELCOMETAR 456
<b>Međusloj</b>	140	258	515	336	0,00 %	ELCOMETAR 456
<b>Završni sloj</b>	80	306	662	462	0,00 %	ELCOMETAR 456

### 7.3. Test prijanjanja Pull-off sukladno normi HRN EN ISO 4625:2016 [44]

Kvaliteta premaza određuje se normom HRN EN ISO 4624:2016 metodom povlačenja premaza (pull-off test). Koristi se uređaj Elcometer 108. Ovim se testom određuje prijanjanje nanosene boje na podlogu. Na slici 47 je prikazan postupak pull-off testa.



Slika 47. Pull off test

#### Zadan je zahtjev:

Minimalni iznos potreban za povlačenje premaza je 5 MPa.

#### Provođenje kontrole:

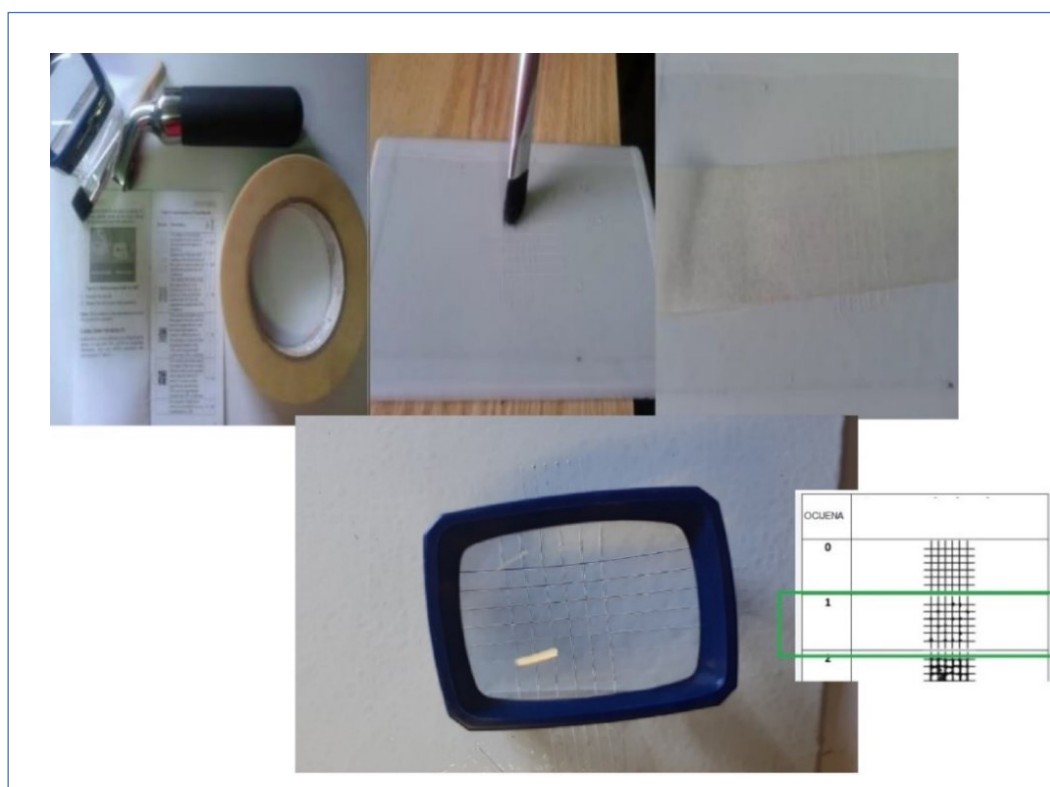
- Na čunjiće se ravnomjerno nanosi ljepilo nakon čega se raspoređuju na testnu ploču.
- Nakon sušenja, višak ljepila se uklanja kako ispitna igla ne bi zapela.

- Uređajem se prihvaća čunjić, poluga se okreće u smjeru kazaljke na satu i postupno se povećava sila kojom se čunjić pokušava odvojiti od podloge.
- Uređaj bilježi naprezanje potrebno za odvajanje premaza od površine testne ploče.

Izmjereni iznosi su 6,47 MPa, 6,21 MPa i 6,15 MPa. Sve izmjerene vrijednosti su veće od tražene minimalne vrijednosti od 5 MPa.

#### 7.4. Test adhezije Cross-cut test HRN EN ISO 2409 [45]

Prianjanje premaza provjerava se i Cross-cut testom suklano normi HRN EN ISO 2409. Na slici 48 prikazan je Cross-cut test.



Slika 48. Cross-cut test

Korišten je uređaj Elcometer 107, a test se provodi na sljedeći način:

- Koristeći uređaj na testnoj pločici naprave se rezovi odgovarajućim nožem. S obzirom na upute iz norme. Rezovi se rade u dva međusobno okomita smjera.
- Laganim pokretima kistom očisti se površina od čestica rezanja.



- Preko mreže rezova postavlja se traka koja se nakon nekoliko minuta skida. Pri skidanju trake treba paziti pod kojim se kutom odljepljuje s testne ploče.
- Povećalom se promatra testirana površina i procjenjuje nastalo oštećenje.
- Za donošenje ocjene koristi se referentni katalog koji prikazuje različite stupnjeve oštećenja mreže. Ocjene mogu biti od 0 do 5, ovisno o postotku uklonjene boje.

U provedenom ispitivanju tražena ocjena Cross-cut testa je jedan, što znači da ne smije biti oštećeno više od 5 % površine. Vizualnom usporedbom s referentnim katalogom, površini testne ploče dodijeljena je ocjena jedan. Ocjena jedan zadovoljava tražene zahtjeve.

### **7.5. Finalni vizualni pregled**

Zadnji korak kontrole korozijske zaštite je finalni vizualni pregled. Cilj vizualne kontrole je provjeriti jesu li sva nedostupna mjesta zaštićena sustavom premaza, pronaći greške poput rupica, curenja boje, narančine kore, kapljica boje i sličnih površinskih grešaka.

Cilj konačne vizualne kontrole jest uklanjanje svih eventualnih prijašnjih propusta, vizualno ujednačen i estetski zadovoljavajući završni sloj.

#### Provođenje kontrole:

Kontrola se provodi detaljnim pregledom svih površina. Provjeravaju se sve potencijalne greške završnog sloja, eventualne nečistoće i svi ostali traženi zahtjev za proizvod. U daljnjem dijelu su navedene slike s opisom pronađenih grešaka.

Na slici 49 prikazane su greške oštećenja površine.





**Slika 49. Oštećenja površine**

Na slici 50 prikazane su rupice u boji



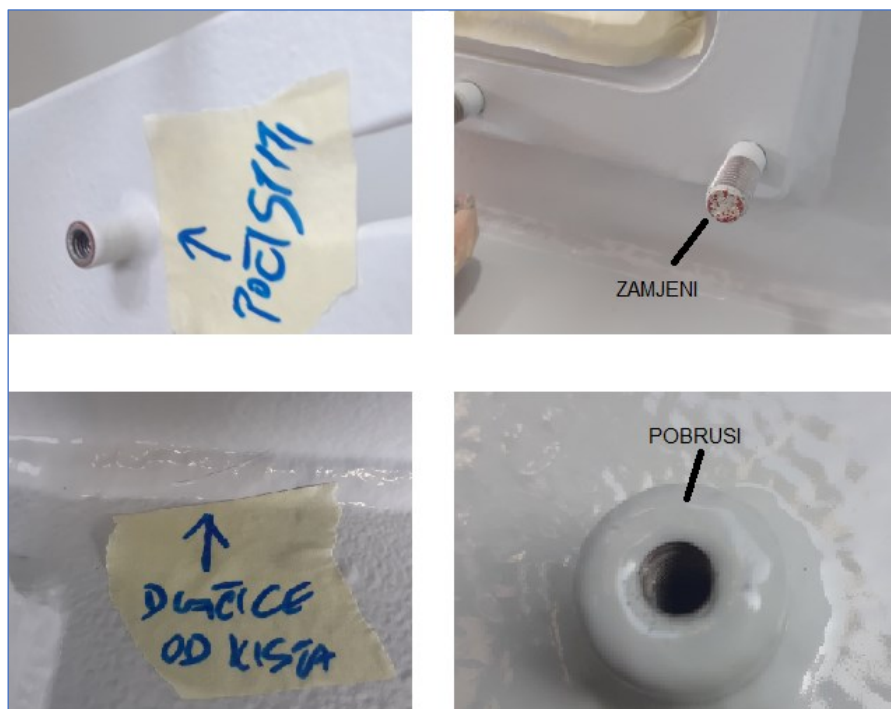
**Slika 50. Rupice u završnom sloju**

Na slici 51 prikazana su nedostupna mjesta na kojima film nije u potpunosti zatvoren.



Slika 51. Nezatvoren film na nepristupačnim mjestima

Na slici 52 prikazane su neke od ostalih grešaka



Slika 52. Ostale greške pronađene u finalnoj kontroli

Rezultati:

Na premazu transformatorskog kotla pronađeno je ukupno 40 pogrešaka. Sve greške su dokumentirane, a popravci su odrađeni prije otpreme.

## 8. ZAKLJUČAK

Transformatorski kotlovi su složene metalne konstrukcije koje, s obzirom na vrlo različite i kompleksne uvjete rada moraju ispuniti niz složenih zahtjeva. Osim što podnose različita mehanička opterećenja, transformatorski kotlovi su izloženi koroziji, ultraljubičastom zračenju i širokom rasponu radnih temperatura. Glavni materijali koji se koriste za proizvodnju transformatorskih kotlova su opći konstrukcijski čelici, čelici za tlačne namjene, čelici za plosnate proizvode za hladno oblikovanje i nehrđajući čelici. Osim nehrđajućih, navedeni čelici ne posjeduju dobru korozivnu postojanost pa je bitno znati prepoznati moguće uzročnike korozije i korozivnost određenog okoliša te kako se za određeni slučaj zaštititi. Općenito postoji nekoliko načina zaštite čelika od korozije, a jedan od češćih je zaštita nanošenjem premaza. Ključne faze u ovom postupku su:

- odabir prikladnog sustava premaza
- priprema površine čelika
- nanošenje sustava premaza
- nadzor i kontrola kvalitete.

Kako bi se osigurala unificiranosti i ponovljivost svih faza u postupku nanošenja sustava premaza, nužno ih je raditi sukladno propisanim normama. Praćenje ispunjenja zahtjeva normi i drugih zahtjeva klijenata osigurava se postupcima kontrole.

Ispravnu i dugotrajnu zaštitu čelične konstrukcije transformatorskog kotla moguće je postići samo uporabom normi, propisanih pravila i postupaka kontrole.

## LITERATURA

- [1] Banović M, Transformers Magazine | Volume 1, Issue 1 - Classification of Transformers Family
- [2] Sathya A, Savadamuthu U. Electromagnetic Force and Deformation in Transformer Winding. International Journal of Applied Engineering Research, Volume 14, Number 3 (2019) pp. 790-796
- [3] HRN EN 10027-2:2015 Sustavi označivanja čelika - 2. dio: Brojčani sustav
- [4] Kožuh S. Specijalni čelici Sisak: Metalurški fakultet; 2010.
- [5] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2002.
- [6] Major M, Nawrot J, Major I. Structural S235 and S355 Steels - Numerical Analysis of Selected Rods Connection. U: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2019.
- [7] HRN EN ISO 10025-1:2004 Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 1. dio: Opći tehnički uvjeti isporuke
- [8] EN 10025-2 S235JR Steel Sheet Plate Suppliers, <https://steelplates.in/suppliers/low-alloy-high-strength-steel/en-10025-2/en-10025-2-s235jr-steel-plates/#> , pristupljeno 9. 9. 2024.
- [9] EN 10216-1 P235TR1 Seamless Carbon Steel Tube Manufacturer, Suppliers, Factories and Company, <https://www.shew-esteelpipe.com/carbon-steel-pipe/en-10216-1-seamless-carbon-steel-tube/en-10216-1-p235tr1-seamless-carbon-steel-tube.html>, pristupljeno 02. 05. 2024.
- [10] HRN EN 10130:2008 Hladno valjani plosnati proizvodi od niskougličnog čelika za hladnu preradbu - Tehnički uvjeti isporuke
- [11] DIN EN 10130 DC01 Dobavljači i proizvođači čelika, <https://ba.coldrolledsteels.com/stainless-steel/stainless-steel-plate/din-en-10130-dc01-steel.html>, pristupljeno 02 .05. 2024.
- [12] 1.4571\_X6CrNiMoTi17-12-2 laser-welding – Schmitz Metallographie GmbH, <https://www.schmitz-metallographie.de/en/gefuge/1-4571-x6crnimoti17-12-2-laser-welding/>, pristupljeno 02. 05. 2024.
- [13] HRN EN 10088-1:2014 Nehrđajući čelici -- 1. dio: Popis nehrđajućih čelika

- [14] HRN EN 1011-2:2002 Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika (EN 1011-2:2001)
- [15] HRN EN 10163-1 - Uvjeti isporuke za stanje površine toplo valjanih čeličnih ploča, širokih traka i profila - 1. dio: Opći uvjeti
- [16] HRN EN 10221:2008 - Razredi kvalitete površine toplo valjanih šipki i valjanih žica - Tehnički uvjeti isporuke
- [17] HRN EN 10029:2010 - Toplo valjani čelični limovi debljine 3 mm ili više - Dopuštena odstupanja dimenzija i oblika
- [18] HRN EN 10204:2007 Metalni proizvodi -- Vrste dokumenata o ispitivanju
- [19] HRN EN ISO 8044:2020: Korozija metala i legura – Rječnik
- [20] Alar V. Kemijska postojanost metala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2015.
- [21] Bardal E. Corrosion and Protection, London, Springer London, 2007.
- [22] Alar, A., Šimunović, V., Juraga, I: Teorijske osnove korozijskih procesa i metode zaštite. Autorizirana predavanja, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2011.
- [23] Juraga I, Šimunović V, Šipaniček Đ. Contribution to the Study of Effects of Surface State of Welded Joints in Stainless Steel Upon Resistance Towards Pitting Corrosion. Metalurgija [Internet], 2007.
- [24] A. Bautista Filiform corrosion in polymer-coated metals, Progress in Organic Coatings, Volume 28, Issue 1, 1996.
- [25] Vargel, C. Filiform corrosion. Corrosion of Aluminium, 2020.
- [26] Pierre R. Roberge, Ph.D. Handbook of Corrosion Engineering, Second Edition McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2012.
- [27] Jurga I., Šimunović V, Stojanović I., Alar V. Mehanizmi zaštite od korozije (skripta). Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [28] Jotun: Coating manual, Jotun Protective Coatings, Jotun Paints, Sandefjord, Norway, 2001.
- [29] Tadros T. Paints and coatings. Encyclopedia of Colloid and Interface Science, 2013.

- [30] Paint coatings - SteelConstruction.info,  
[https://www.steelconstruction.info/Paint\\_coatings](https://www.steelconstruction.info/Paint_coatings), pristupljeno 07.4.2024.
- [31] Hendy C.R., Iles D.C. Steel Bridge Group: Guidance Notes on best practice in steel bridge construction (6th Issue) (2015)
- [32] GIROSIL® Steel Cladding Protection - Cladding Refurbishment,  
<https://tritecbuildingcontractors.co.uk/girosil> pristupljeno 08.4.2024.
- [33] HRN EN ISO 8503-1:2012 - Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda - Svojstva hrapavosti površina čeličnih podloga čišćenih mlazom abraziva
- [34] HEMPEL katalog: Odabir odgovarajućeg sustava premaza: Smjernice za zaštitu u skladu sa ISO 12944
- [35] HRN EN ISO 8501 :2007 Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda
- [36] Končar Metalne konstrukcije d.d., Zagreb : Končar Metalne konstrukcije dokumentacija, 2024. (interna dokumentacija)
- [37] Surface preparation - SteelConstruction.info,  
[https://www.steelconstruction.info/Surface\\_preparation#cite\\_note-No2-2](https://www.steelconstruction.info/Surface_preparation#cite_note-No2-2) , pristupljeno 25.04.2024.
- [38] HRN EN ISO 12944 :2018 Boje i lakovi - Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije zaštitnim sustavom boja
- [39] Transocean Coatings Deciding on the right protective coating system, Guide to using ISO 12944 for the decision making process, 2023.
- [40] HRN EN ISO 4628-3:2016 - Boje i lakovi - Procjena propadanja prevlaka - Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda - 3. dio: Ocjena stupnja hrđanja
- [41] HRN EN ISO 8502-3:2017 - Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda - Ispitivanja za procjenu čistoće površine - 3. dio
- [42] HRN EN ISO 8502-6:2020 - Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda - Ispitivanja za procjenu čistoće površine - 6. dio
- [43] HRN ISO 19840:2013 - Boje i lakovi - Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije sustavima zaštitne boje

[44] HRN EN ISO 4625-1:2008 - Veziva za boje i lakove - Određivanje točke razmekšanja --  
1. dio

[45] HRN EN ISO 2409:2020 - Boje i lakovi - Ispitivanje zarezivanjem mrežice (ISO  
2409:2020; EN ISO 2409:2020)