

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

METALS ALLOYS TECHNOLOGIES

LETO 1997 / R1

Glavni urednik / Editor: F. Vodopivec, IMT Ljubljana, Slovenija



Izdajatelji / Publishers: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije Ljubljana, ACRONI Jesenice, Institut Jožef Stefan, IMPOL Slovenska Bistrica, Kemijski inštitut Ljubljana, Koncern Slovenske železarne, Metal Ravne, Talum Kidričevo, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Slovensko društvo za tribologijo Ljubljana

KOVINE
ZLITINE
TEHNOLOGIJE

LETNIK
VOLUME 31

ŠTEV.
NO. R1

STR.
P. I-XI

LJUBLJANA
SLOVENIJA

JUNIJ
1997

ISSN 1318-0010

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

METALS ALLOYS TECHNOLOGIES

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

Izdajatelj (Published for):

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije Ljubljana

Soizdajatelji (Associated Publishers):

SZ ŽJ ACRONI Jesenice, IMPOL Slovenska Bistrica, Institut Jožef Stefan Ljubljana, Kemijski inštitut Ljubljana, Koncem Slovenske Železarne, Metal Ravne, Talum Kidričevo, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Slovensko društvo za tribologijo Ljubljana

Izdajanje KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE sofinancira: Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije

(Journal METALS ALLOYS TECHNOLOGIES is financially supported by Ministrstvo za znanost in tehnologijo, Republika Slovenija)

Glavni in odgovorni urednik (Editor-in-chief):

prof. Franc Vodopivec, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije Ljubljana, 1000 Ljubljana, Lepi pot 11, Slovenija

Urednik (Editor):

mag. Aleš Lagoja

Tehnični urednik (Technical Editor):

Jana Jamar

Lektorji (Linguistic Advisers):

dr. Jože Gasperič in Jana Jamar (slovenski jezik), prof. dr. Andrej Paulin (angleški jezik)

Uredniški odbor (Editorial Board):

doc. dr. Monika Jenko, prof. Jakob Lamut, prof. Vasilij Prešeren, prof. Drago Kolar, prof. Stane Pejovnik, prof. Jože Vižintin, dipl. ing. Sudradjat Dai, Jana Jamar

Mednarodni pridruženi člani uredniškega odbora (International Advisory Board):

prof. Hans Jürgen Grabke, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Deutschland

prof. Thomas Bell, Faculty of Engineering School of Metallurgy and Materials, The University of Birmingham, Birmingham, UK

prof. Jozef Zrník, Technická Univerzita, Hutnícka fakulteta, Košice, Slovakia

prof. Ilija Mamuzić, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska

prof. V. Lupinc, Istituto per la Tecnologia dei Materiali Metallici non Tradizionali, Milano, Italia

prof. Günther Petzov, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, Deutschland

prof. Hans-Eckart Oechsner, Universität Darmstadt, Deutschland

Izdajateljski svet (Editorial Advisory Board):

prof. Marjan Gabrovšek, prof. Blaženko Koroušič, prof. Ladislav Kosec, prof. Alojz Krizman, prof. Tatjana Malavašič, dr. Tomaž Kosmač,

prof. Leopold Vehovar, prof. Anton Smolej, doc. dr. Boris Ule, prof. Tomaž Kolenko, doc. dr. Jelena Vojvodič-Gvardjančič

Članki objavljeni v periodični publikaciji KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE so indeksirani v mednarodnih sekundarnih virih:

(Articles published in journal are indexed in international secondary periodicals and databases):

- METALS ABSTRACTS
- ENGINEERED MATERIALS ABSTRACTS
- BUSINESS ALERT ABSTRACTS (STEELS, NONFERROUS, POLYMERS, CERAMICS, COMPOSITES)
- CHEMICAL ABSTRACTS
- ALUMINIUM INDUSTRY ABSTRACTS
- REFERATIVNYJ ŽURNAL: METALLURGIJA

Naslov uredništva (Editorial Address):

KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE

IMT Ljubljana

Lepi pot 11

1000 Ljubljana, Slovenija

Telefon: +386 61 125 11 61

Telefax: +386 61 213 780

Žiro račun: 50101-603-50316 IMT pri Agenciji Ljubljana

Na INTERNET-u je revija KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE dosegljiva na naslovu: [http : // www. ctk. si / kovine/](http://www.ctk.si/kovine/)

(INTERNET LINK: <http://www.ctk.si/kovine/>)

Elektronska pošta (E-mail):

cobissimlj @ ctkj.ctk.si

Oblikovanje ovitka: Ignac Kofol

Fotografija na naslovnici: Vroče pocinkanje v Pocinkovalnici d.o.o. Celje

Tisk (Print): Tiskarna PLANPRINT, Ljubljana

Po rnenju Ministrstva za znanost in tehnologijo Republike Slovenije št. 23-335-02 z dne 09. 06. 1992 šteje KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE med proizvode, za katere se plačuje 5-odstotni davek od prometa proizvedenih.



UVODNA BESEDA

Pred bralci je prva izredna številka KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE. Uredniški odbor je optimističen in upa, da ne bo zadnja.

Po zgledu tujih uveljavljenih znanstvenih periodičnih publikacij (npr. STEEL RESEARCH) uvajamo objavljane obsežnejših preglednih člankov v določeni tematiki, ki je zanimiva za širšo strokovno javnost.

Vabimo vse zainteresirane raziskovalce in inženirje iz inštitutov, univerz in industrije, da objavijo pregledne članke s področja raziskav, tehnologije in uporabe kovinskih, polimernih, keramičnih in kompozitnih materialov ter materialov za vakuumsko tehniko.

1997

Uredništvo
Kovine zlitine tehnologije

Prvi, dopolnjeni ponatis, 1999

ZAHVALA

Zahvaljujemo se POCINKOVALNICI d.o.o. Celje, ki je financirala tiskanje prve izredne številke KOVINE ZLITINE TEHNOLOGIJE in prvega dopolnjenega ponatisa.

Uredništvo

VROČE POCINKANJE JEKLA

L. Vehovar¹, F. Strašek², M. Tandler³

1. Uvod

Korozija je eden največjih uničevalcev človeških dobrin in energije. Škoda, ki jo povzroča, dosega približno 4.2 % narodnega dohodka. Neposredna letna škoda zaradi korozije je v ZDA okoli 126 milijard USD, v državah EU pa je njeno destruktivno delovanje ocenjeno med 80 do 160 milijardami DEM. Zavedati se moramo, da korozije ne moremo preprečiti, lahko pa jo v veliki meri upočasnimo ali omejimo z domiselnimi konstrukcijskimi in tehnološkimi rešitvami ter z uporabo optimalnih materialov oz. s protikorozijsko zaščito. Med izjemno uspešno protikorozijsko zaščito sodi vroče pocinkanje jekla.

Vročje pocinkanje je proces, pri katerem jeklene dele omakamo v raztaljeni cinkovi kopeli pri 430 do 470 °C. Čeprav je vroče pocinkanje možno uporabiti za številne kovine, pa je vendar te vrste protikorozijska zaščita najbolj pomembna za jeklene konstrukcije in druge izdelke iz jekla.

Vročje pocinkanje ima številne prednosti, med katerimi še posebej izstopajo:

- sposobnost prekriti težko dostopne površine, robove in zware
- odpornost proti mehanskim poškodbam, ker je pocinkana plast preko intermetalne faze metalurško vezana na jekleno osnovo
- dobra korozijska odpornost v različnih okoljih
- ekonomičen proces protikorozijske zaščite, ker je možna istočasna zaščita večjih količin
- zaradi visoke duktilnosti cinka je možno preoblikovanje pocinkanih delov.

Obstaja šest metod zaščite jekla s cinkom:

- vroče pocinkanje z omakanjem v kadeh
- kontinuirano vroče pocinkanje npr. žice, ki se pomika skozi cinkovo kopel
- elektrokemično pocinkanje (galvanizacija)
- mehansko platiranje
- plamensko naprševanje z žico (metalizacija)
- s cinkom bogat organski premaz (cinkov prah kot pigment povezan s sintetično smolo).

Predmet tega članka je vroče pocinkanje z omakanjem v kadeh, torej na način, kot to že desetletja izvajajo v podjetju EMO - Celje.

2. Vročje pocinkanje jekla z omakanjem

2.1 Priprava površine

Čiščenje jeklene površine je pomembna faza vročega pocinkanja. Pri tem je potrebno odstraniti umazanijo, olja, maščobe, maziva in oksidacijske produkte v obliki škajev ali rje. Proces čiščenja obsega naslednje delovne postopke:

- razmaščevanje v alkalni raztopini
- luženje jekla v inhibirani vodni raztopini mineralne kisline (HCl ali H₂SO₄)
- težko topne in debele oksidne sloje je pogosto potrebno odstranjevati z abrazivnim čiščenjem
- končna faza priprave površine vključuje raztapljanje katerega koli oksidnega filma, ki bi se lahko tvoril po luženju in na ta način preprečeval nastajanje dobrega spoja med cinkom in jekleno osnovo (kot talilo se uporablja ZnCl₂ · 2NH₄Cl).

2.2 Proces omakanja in lastnosti pocinkane plasti

Omakanje jeklenih površin v raztaljenem cinku pri temperaturi taline med 445 in 465 °C omogoča nanašanje debelejših prevlek kot je to z galvanskim postopkom. Prevleka cinka je posledica metalurških difuzijskih reakcij, pri katerih se z difuzijo cinka navznoter in železa navzven, tvorijo železo-cink faze (**slika 1**). Končni produkt vsebuje v zunanji plasti čisti cink in štiri notranje plasti, ki predstavljajo intermetalne Fe-Zn faze z različnim deležem železa. Med železo-cink intermetalnimi plastmi, ki omogočajo medsebojno vezavo (zelo pomembna je Γ -faza, ki pravilno izoblikovana in tanka, omogoča dober oprijem pocinkanja na jekleno osnovo - torej preprečuje njegovo luščenje), ni ostrih meja, vsekakor pa je zaželen čim manjši delež železa v cinkovi plasti. Velik delež železa, ki difundira v cinkovo plast z raztapljanjem jeklene osnove, močno poslabša korozijsko odpornost takšne prevleke.

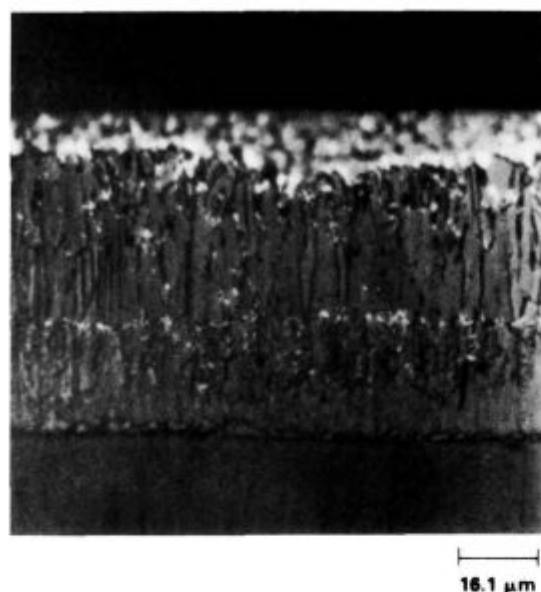
2.3 Faktorji, ki vplivajo na debelino pocinkane plasti in njeno mikrostrukturo

Kemična sestava jekla. Čeprav lahko vroče pocinkamo skoraj vsa jekla, pa vendar njihova kemična sestava izrazito kreira debelino, mikrostrukturo in izgled pocinkane plasti. Silicij, fosfor, ogljik in mangan v jeklu najbolj izrazito vplivajo na reakcijo cink-železo, večji ali

¹Prof. dr. Leopold Vehovar, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana

²Mag. Franc Strašek, Pocinkovalnica d.o.o. Celje

³Dipl. ing. Marko Tandler, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana



Faza	% Fe	Gostota, g/cm ³
η	0.03	7.14
ζ	5 – 6	7.18
δ ₁₂	7 – 12	7.25
δ ₁₄	21 – 28	7.36
Fe	100	7.87

Slika 1. Različne kovinske faze v cinkovi plasti po vročem pocinkanju

manjši vpliv teh elementov pa je odvisen od njihove koncentracije.

Najbolj vpliven je silicij, ki ga dodajamo železu v obliki ferosilicija, da bi odstranili kisik iz raztaljenega jekla pred njegovim litjem. Na **sliki 2** je prikazan vpliv tega elementa pri dveh različnih temperaturah pocinkanja in dveh časih omakanja. Z naraščanjem temperature cinkove kopeli in časa omakanja raste debelina pocinkane plasti, s tem pa tudi delež škodljivih intermetalnih faz, ki so bogate z železom. Nastajanje grobih kristalov omogoča penetracijo cinka iz kopeli do površine jekla, s tem pa je omogočena nadaljna reakcija cink-železo. Na splošno lahko trdimo, naj bo za dobro vroče pocinkanje največji delež elementov v jeklu naslednji: 0.05 % Si, 0.05 % P, 0.25 % C in 1.3 % Mn.

Kemična sestava jekla lahko torej močno vpliva na kvaliteto vročega pocinkanja in še posebej na delež

železa v pocinkani plasti. S prisotnostjo železa pa se izrazito poslabša zaščitna sposobnost pocinkane plasti. Že v običajni podeželski atmosferi je pocinkanje izpostavljeno delovanju korozije, še posebej pa faze bogate z železom. Rjavi korozijski produkti kvarijo estetski izgled, pocinkana plast pa postaja vse bolj porozna, kar omogoča še boljši dostop atmosferilij do jeklene osnove. Na **sliki 3** je prikazan izgled konstrukcije električnega daljnovoda z elementi, ki intenzivno korodirajo zaradi njihove neustrezne kemične sestave, katere posledica je nastajanje Fe-Zn intermetalne faze z različnim deležem železa.

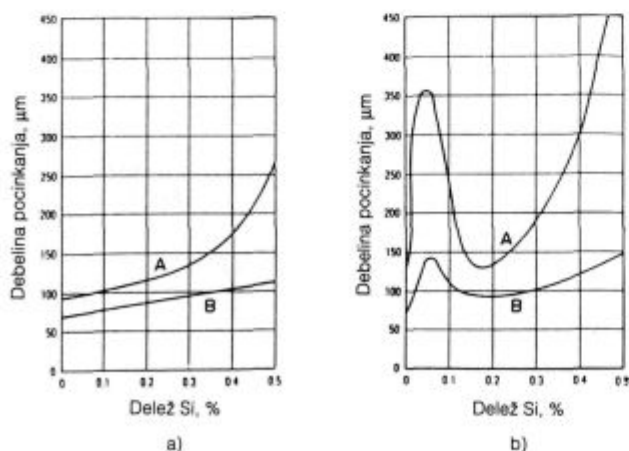
Na jeklu s previsokim deležem silicija, pri ohlajanju pocinkane plasti še potekajo reakcije, dokler ni dosežena temperatura okoli 300 °C. Posledica tega je, da zunanja plast ni sestavljena iz povsem čistega cinka. Tako nastaja temno siva površina prevleke. Življenjska doba takšne plasti pa ni vedno kratka, kajti možna je tvorba debelejših cinkovih plasti.

Temperatura cinkove kopeli. Z naraščanjem temperature kopeli preko tiste, ki je normalna za določeno jeklo, se povečuje sposobnost penetracije raztaljenega cinka do jeklene osnove, kar povečuje nastajanje faz, ki so bogate z železom.

Čas omakanja. Debelina pocinkanja bistveno ne raste z daljšim časom omakanja. Predolgi časi povečujejo delež faz, ki so bogate z železom.

Kemična sestava cinka. Različni elementi v sledovih, v obliki nečistoče ali namerno dodani v cinkovo kopel, da bi dosegli določeno izboljšanje, lahko bistveno spremenijo izgled pocinkanja. Za vroče pocinkanje se običajno uporablja cink, v katerem je 1.4 % Pb, 0.2 % Cd, 0.05 % Fe in minimalno 98 % Zn.

Čeprav je dovoljeno do 1.4 % Pb, pa je v kopeli običajno le okoli 1 % Pb ali celo manj. Svinec nima nobenega vpliva na viskoznost raztopljenega cinka, pač pa vpliva na površinsko napetost (dodatek 1 % Pb zmanjša površinsko napetost cinkove kopeli za več kot



Slika 2. Vpliv deleža silicija v jeklu, čas omakanja in temperature kopeli na debelino pocinkane plasti. Krivulja A pomeni 9 min., B pa 3 min. omakanje

a) pocinkano pri 430 °C
b) pocinkano pri 460 °C

40 % v primerjavi s čisto cinkovo talino); rezultat tega je boljša omočljivost in raztekavost raztopljenega cinka na jeklenih površinah.

Aluminij se dodaja v cinkovo kopel posebej z namenom, da se izboljša končni izgled pocinkanja. Že dodatek 0.005 % Al močno poveča sijaj pocinkane plasti. Z dodatkom 0.1 do 0.3 % Al pa dosežemo zaviranje rasti intermetalne faze bogate z železom, hkrati pa se povečuje duktilnost cinkove prevleke.

Tudi dodatek kositra in antimona v cinkovi kopeli povečuje sijaj vročega pocinkanja.

2.4 Mehanske lastnosti pocinkane plasti

Trdota in abrazijska odpornost. Pocinkana plast z različnimi fazami (slika 1) ima po profilu različno



Slika 3. Korozija posameznih delov električnega daljnovoda zaradi neustrezne kemične sestave jekla

trdoto, odvisno od deleža železa v intermetalni Fe-Zn fazi. V površinski η fazi, kjer je prisoten čisti cink, je trdota nizka, saj je cink razmeroma mehek material. Toda pod površinskim slojem cinka nastajajo faze, ki imajo znatno višjo trdoto, ki presega tudi trdoto jeklene osnove. Tipične vrednosti za mikrotrdoto so prikazane v tabeli 1.

Različne intermetalne faze v pocinkani plasti so štiri do šestkrat bolj odporne na abrazijo kot čisti cink. Pocinkane plasti kažejo boljšo odpornost kot organski premazi z isto debelino filma. Zaradi tega se vroče pocinkani elementi pogosto uporabljajo kot pohodna tla, mreže, stopnice, za transportne trakove, skladiščne zaboje itd.

Adhezija, udarna odpornost in preoblikovalnost. Različna prekritja so mehansko ali kemično vezana na jeklo, vroče pocinkanje pa metalurško preko Γ -faze, bogate z železom ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$). To predstavlja močan spoj med jekleno osnovo in cinkom, kar pomeni, da je adhezijska sposobnost zelo velika.

Na strukturo vroče pocinkane plasti in še posebej na debelino δ in ξ sloja, vpliva pretežno kemična sestava jekla in le v manjši meri temperatura pocinkanja in čas omakanja. Struktura pocinkane plasti pa ima močan vpliv na udarno odpornost oz. na preoblikovalnost. Razmeroma velik delež ξ -faze v zlitini Fe-Zn lahko povzroči lokalno kosmičenje, če je prekritje izpostavljeno močnim udarcem ali krivljenju. Posledica tega je krhkost prevleke in njen slabši oprijem, to pa se v največji meri manifestira pri polpomirjenih jeklih z deležem silicija od 0.05 do 0.12 %.

Trdnost in duktilnost jekla. Izdelanih je bilo veliko raziskav o vplivu vročega pocinkanja na mehanske lastnosti jekel. Raziskave so pokazale, da postopek vročega pocinkanja bistveno ne vpliva na njihov upogib, trdnost ali žilavost.

Varilne napetosti. Varjene konstrukcije imajo večjo trdnost po vročem pocinkanju. Pocinkanje znižuje varilne napetosti od 50 do 60 %.

2.5 Korozijska odpornost vroče pocinkanega jekla

Mehanizem zaščite. Protikorozijska zaščita jekla z vročim pocinkanjem temelji na dveh principih:

- pocinkana plast deluje kot bariera
- pocinkanje deluje kot katodna zaščita.

V prvem primeru naj bo ta bariera formirana tako, da je delež čistega cinka čim večji, delež različnih Fe-Zn faz

Tabela 1. Lastnosti posameznih faz v pocinkani plasti vroče pocinkanega jekla

Vrsta plasti	Zlitina	Delež Fe (%)	Tališče (°C)	Kristalna struktura	Mikrotrdota (HV)	Lastnosti zlitine
Eta (η)	cink	0.03	419	Heksagonalna	70-72	Mehka in duktilna
Ceta (ξ)	FeZn_{13}	5.7-6.3	530	Monoklinska	175-188	Trda in krhka
Delta (δ)	FeZn_7	7.0-11.0	530-670	Heksagonalna	240-300	Duktilna
Gama (Γ)	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	20.0-27.0	670-780	Kubična	-	Tanka, trda in krhka
Jeklena osnova	železo	-	1510	Kubična	150-175	-

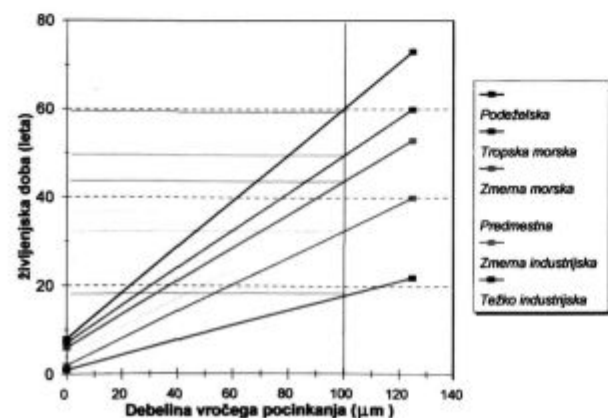
pa čim manjši. Zaščitna sposobnost takšne bariere pa se poveča zaradi nastajanja tankega filma korozijskih produktov na njeni površini. Na svežem vročem pocinkanju se na zraku hitro tvori ZnO , v prisotnosti atmosferske vlage pa $Zn(OH)_2$. Toda z nadaljno reakcijo CO_2 iz zraka, se končno tvori na površini tanek film dobro oprijemljivega in le malo topnega $ZnCO_3$, ki nudi zelo dobro protikorozijsko zaščito.

V medijih, ki ne omogočajo nastajanje $ZnCO_3$, se vzpostavi drugi mehanizem, pri katerem deluje cink v odnosu do jekla kot anoda - se torej raztaplja, pri anodni reakciji sproščeni elektroni ($Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e$) pa omogočajo katodno zaščito jekla v neposredni bližini korozijske poškodbe. Cink deluje torej kot žrtvena anoda, s katero je možno uspešno preprečevati korozijo tudi na mestih, kjer so v pocinkanju globoke mehanske raze in druge poškodbe, ki so nastale zaradi manipulacije s pocinkanimi izdelki.

Atmosferska korozija. Cink, jeklo in vroče pocinkanje so že stoletje predmet razširjenih korozijskih raziskav. V tako dolgem času je bilo možno dovolj natančno in zanesljivo definirati številne vplivne faktorje: pogostost in trajanje izpostavljanja dežju, snegu, kondenzu, vrsto in koncentracijo onesnaževalcev, prevladujočo smer vetrov, delovanje morskega aerosola, abrazijo v kombinaciji s korozijo itd.

Na **sliki 4** so prikazani rezultati zunanje izpostave vroče pocinkanih elementov, v različnih atmosferah.

Industrijska in mestna atmosfera. To je agresivna atmosfera, v kateri lahko prevladujejo SO_2 plini in druge korozivne pare ter megla. Zaščitni $ZnCO_3$ film se pod vplivom onesnažene atmosfere spreminja npr. v $ZnSO_4$ in druge topne korozijske produkte, ki ne ščitijo, temveč jih atmosferilije spirajo do čistega cinka. V ugodnih atmosferskih razmerah se cink ponovno zaščiti z $ZnCO_3$, v neugodnih pa nastopi njegova destrukcija. Tako se cikli ponavljajo, vse dokler se cinkova plast ne izrabi. Iz tega povsem jasno sledi, da je za življenjsko dobo pocinkanih elementov še posebej pomembna debelina pocinkane plasti in ne nazadnje tudi njena mikrostruktura.



Slika 4. Življenjska doba vroče pocinkanih elementov v odvisnosti od debeline prevleke in različnih atmosferskih razmer

Morska atmosfera. V takšnih atmosferskih razmerah nastaja topni $ZnCl_2$ kot korozijski produkt, ki nima nobene zaščitne sposobnosti. Korozijska hitrost pa je pogojena s količino kloridov v zraku, morskih vetrov, topografije obale in oddaljenosti od obale (24 m od obale je korozija okoli 3-krat večja kot je na razdalji 244 m).

Morska voda in slani morski aerosol. V tabeli 2 je prikazana hitrost korozije v različnih vodah, na **sliki 5** pa pričakovana življenjska doba do prve resne sanacije pocinkanih delov. Kljub visoki koncentraciji kloridnih ionov in njihovi agresivnosti, obstoja prepričanje, da je protikorozijska zaščita jekel z vročim pocinkanjem primerna za takšno vrsto okolja.

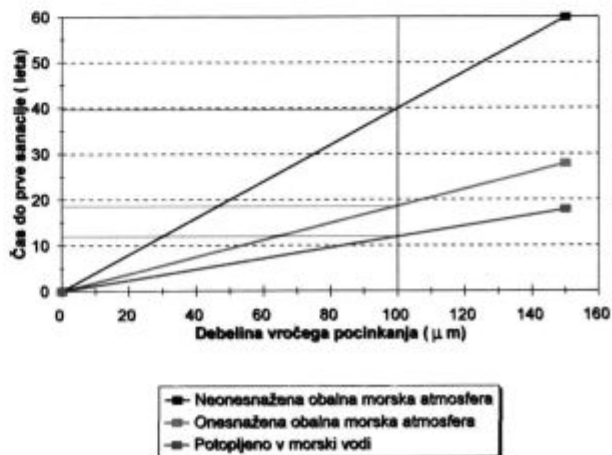
Tabela 2. Korozija cinka v različnih vodah

Vrsta vode	Približna korozijska hitrost $\mu m/leto$
Morska voda:	
• Oceani (povprečno)	15 - 25
• Severno morje	12
• Baltik	10
Sladke vode:	
• Trda	2.5 - 5
• Mehka rečna voda	20
• Vodovodna voda	5 - 10
Destilirana voda	50 - 200

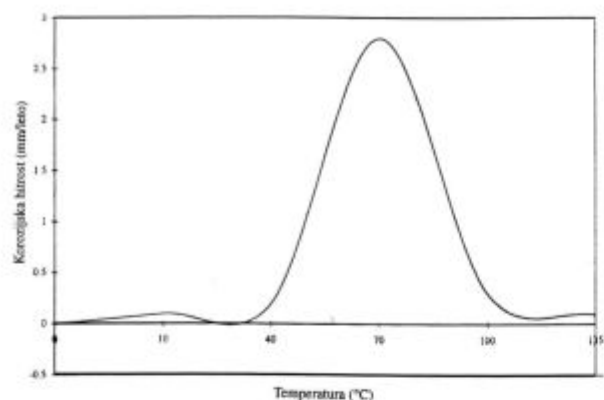
Korozijska hitrost cinka ali pocinkanja v vodi narašča s povečanjem temperature med 65 in 70 °C, zatem pa naglo pada (**slika 6**). To je posledica spremembe potenciala cinka v tem temperaturnem področju.

pH vrednost večine voda je med 6 in 8. Korozijska hitrost cinka se zmanjšuje z naraščanjem pH in doseže najnižjo vrednost pri pH 12 do 12.5.

Obstojnost v zemljinah. Korozijska hitrost je funkcija vrste zemljine in njene sposobnosti, da veže različne soli, organske komponente, atmosferske odplake, mikroorganizme, raztopljene pline (kisik, vodik, metan itd.), kisline in luge. V odvisnosti od strukture zemlje, se spre-



Slika 5. Čas do prve sanacije pocinkanih delov v odvisnosti od debeline pocinkanja



Slika 6. Vpliv temperature vode na korozijsko hitrost cinka v ozračeni destilirani vodi

minja tudi njena prepustnost. V zemljinah, ki so dobro ozračene, je korozijska hitrost pocinkanja podobna tisti, ki je značilna za atmosfersko korozijo. V zemljinah, ki so dobro prepojene z vodo, so korozijske hitrosti večje.

Za zemeljine je značilna njihova električna prevodnost. Dobro prevodne so bolj agresivne. Suhe zemljine so slabi prevodniki, zato je tudi korozijska hitrost mnogo manjša.

Stik pocinkanega jekla z drugimi kovinami. Kombinacija z bakrom ali z medenino povzroča močne korozijske poškodbe cinka oz. pocinkanja. Takšen galvanski člen je potrebno premostiti z izolacijo. V kombinaciji z aluminijem ali nerjavnim jeklom se pocinkanje dobro obnaša le pri majhni vlažnosti. V nasprotnem primeru pa je potrebna izolacija med kovinama.

2.6 Spajanje vroče pocinkanih konstrukcijskih elementov

Vroče pocinkane jeklene dele konstrukcij je možno variti, toda cinkove pare je potrebno odvajati v zaprtih prostorih. Različne raziskave (natezni, upogibni in utrujenostni testi ter radiografska kontrola) so pokazale, da je možno električno obločno varjenje z oplasčeno elektrodo ali v zaščiti CO_2 . Zvari so povsem ekvivalentni tistim, ki so izdelani na nepocinkanih jeklih. To pa je možno doseči le, če v neposredni okolici zvara mehansko ali plamensko (močno oksidativen plamen) odstranimo pocinkanje. Raztaljeni cink je še posebej nevaren v korenskem delu zvara, kjer lahko nastanejo razpoke vroče pocinkanih varjencev, ali njihova poroznost, ki pa je pogosto zanemarljiva.

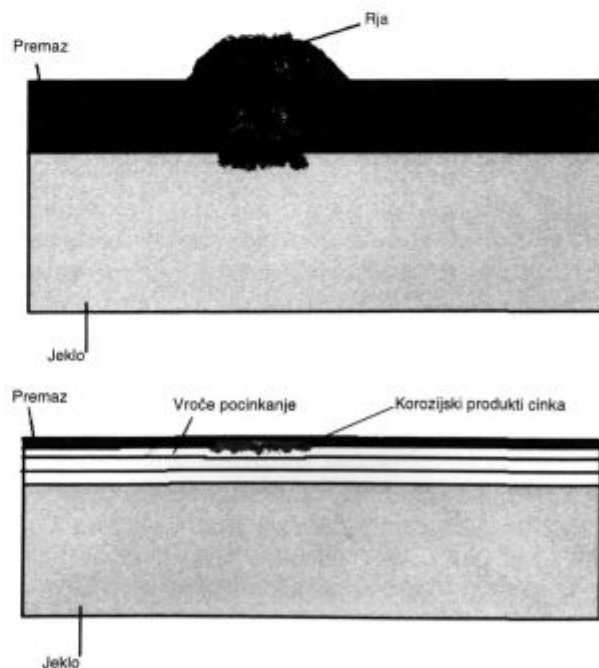
Po varjenju se običajno poškodovana mesta pocinkanja in sam zvar zaščitijo s premazi, ki vsebujejo okoli 95 % Zn. Ta mesta pa je možno zaščititi tudi s plamenskimi navarjanjem tanke plasti Zn-Cd ali Zn-Sn-Pb spajke.

2.7 Dodatna zaščita vroče pocinkanega jekla z različnimi premaznimi sredstvi

Samo vroče pocinkanje nudi dovolj dobro protikorozijsko zaščito v večini medijev. Toda vroče pocinkanje daje odlično podlago za različne barve (po mehanski odstranitvi cinkovih oksidov ali drugih korozijskih produktov je potrebna takojšnja zaščita), katerih aplikacija je zaželeno v naslednjih primerih:

- izboljšava estetskega izgleda
- podaljšanje življenjske dobe, kajti v kombinaciji pocinkanje - premazno sredstvo, so mehanizmi korozije pod premazom povsem drugačni kot pod pocinkanjem, ki je nanešen direktno na jekleno podlago (slika 7)
- izboljšanje korozijske odpornosti v izjemno agresivnih okoljih.

V tabeli 3 je prikazana življenjska doba vroče pocinkanega jekla v primerjavi s tistim, ki je dodatno zaščiten z organskimi premazi (barvami), ali le samo z ustreznim organskim premaznim sistemom. Rezultati se nanašajo na različne atmosfere in debeline zaščitnih sistemov. Življenjska doba je bila definirana kot čas, v katerem se je pojavilo 5 % rdeče rje (korozijski produkti železa).



Slika 7. Ilustracija mehanizma korozije za jeklo, zaščiteno s premaznimi sredstvi a) in z vročim pocinkanjem ter dodatno zaščito s premazi b)

a) Pora v premazu povzroča močno podržavanje jekla, posledica je še večja destrukcija premaza

b) Pora v premazu, ki ščiti vroče pocinkanje se zamaši s cinkovimi korozijskimi produkti, kar prepreči nadaljnjo korozijo cinka in destrukcijo premaza

Tabela 3. Življenjska doba v odvisnosti od vrste zaščite, njene debeline in atmosfere

Tip atmosfere	Vroče pocinkano jeklo		Zaščiteno s premazom		Vroče pocinkano in zaščiteno s premazom	
	Debelina (μm)	Življ. doba (leta)	Debelina (μm)	Življ. doba (leta)	Debelina (μm)	Življ. doba (leta)
Težkoindustrijska	50	10	100	3	150	19
	75	14	150	5	225	29
	100	19	100	3	200	33
	100	19	150	5	250	36
Velemestna (mestna)	50	19	100	4	150	34
	75	29	150	6	225	52
	100	39	100	4	200	64
	100	39	150	6	250	67
Morska	50	20	100	4	150	36
	100	40	100	4	200	66
	100	40	150	6	250	69

Tabela 4. Cenovne korelacije med protikorozijsko zaščito z vročim pocinkanjem in barvanjem

Leto	Vroče pocinkano		Zaščita s premazom	
	Dejanski stroški	Naraščanje stroškov po vsakih 10 letih eksploatacije	Dejanski stroški	Naraščanje stroškov po vsakih 10 letih eksploatacije (obnove)
0	\$ 1.25	\$ 1.25	\$ 1.0	\$ 1.0
10	-	-	-	\$ 0.43
20	-	-	-	\$ 0.24
30	-	-	-	\$ 0.14
40	-	-	-	\$ 0.08
Celotni strošek za življenjsko dobo 50 let	-	\$ 1.25	-	\$ 1.89

Opomba: Za izračun je bila predpostavljena 4 % inflacija, eskontna stopnja 10 %, ponovna obnova premaza na 10 let, pričakovana življenjska doba pa je znašala 50 let. Stroški ponovne obnove so znašali 75 % od dejanskih začetnih stroškov barvanja, stroški vročega pocinkanja pa so znašali 25 % več kot prvo barvanje.

Vpliv varovanja okolja na korozijo cinkove plasti. Zaradi obveznega varovanja okolja v razvitem svetu in s tem drastičnega znižanja emisije agresivnih komponent, ki omogočajo korozijo cinka, je postalo vroče pocinkanje korozijsko bolj odporno, takšna zaščita pa ekonomsko še veliko bolj opravičljiva.

V letih med 1960 in 1970 so bile v Evropi izdelane obsežne raziskave korozijske odpornosti vročega pocinkanja v različnih atmosferskih razmerah. Ugotovljeno je bilo, da je povprečna korozijska hitrost med 4 in 5 μm/leto; v podeželski atmosferi precej manjša in mnogo večja v industrijski, mestni ali morski. Toda ekološka naravnost v številnih deželah je omogočila znižanje korozijske hitrosti na vrednosti, ki izrazito potencirajo uporabo vročega pocinkanja. To so pokazale nove raziskave po letu 1990. Tako je v tabeli 5 prikazano postopno upadanje korozijske hitrosti vročega pocinkanja za mesto Stockholm, v tabeli 6 pa letna povprečna hitrost korozije cinkove plasti v različnih državah Evrope za obdobje od 1989 do 1993.

Tabela 5. Hitrost korozije cinkove plasti v odvisnosti od koncentracije SO₂ v Stockholmu

Leto	Konc. SO ₂ (μg/m ³)	Hitrost korozije (μm/leto)
1978	90	2,02
1979	85	2,00
1980	73	1,74
1981	72	1,53
1982	65	1,20
1983	57	1,92
1984	48	0,86
1985	42	1,17
1986	25	1,14
1987	22	0,79
1988	20	0,75
1989	15	0,63
1990	12	0,61
1991	10	0,58
1992	8	0,57

Opomba: Letno povprečno znižanje koncentracije SO₂ v zraku za 1 μg/m³ zmanjša korozijo cinkove plasti za okoli 0,2 g/m² (1 μm = 7,15 g Zn/m²)

Tabela 6. Letna povprečna hitrost korozije cinkove plasti v različnih državah za obdobje 1989-1993

Država	Izguba mase oz. zmanjšanje debeline nanosa cinka	
	g/m ² /leto	µm/leto
Nemčija	8,6	1,2
Anglija	8,3	1,2
Finska	7,0	1,0
Nizozemska	9,9	1,3
Norveška	10,6	1,4
Rusija	7,5	1,1
Španija	6,0	0,8
Češka/Slovaška	8,7	1,2
Švedska	5,2	0,7

2.8 Ekonomičnost vroče pocinkanega jekla

V primerjavi s protikorozijsko zaščito s premaznimi sredstvi, je po nekaterih literarnih podatkih vroče pocinkanje jekla za okoli 25 % dražje. Toda to je značilno le za začetno obdobje, zatem pa stroški zaradi hitrega propadanja premaza in njegove pogoste obnove, stalno naraščajo. Takšni odnosi so prikazani v tabeli 4.

2.9 Uporaba vroče pocinkanega jekla

Uporaba vroče pocinkanega jekla je že desetletja masovna. Samo v ZDA so leta 1985 uporabili 6,5 mio ton pocinkanega jekla, kar pomeni, da so v te namene v tistem času uporabili dvajsetino njihove celotne letne produkcije jeklarske industrije.

Jekleni mostovi. Prvi jekleni cestni most v ZDA (128 m dolžine in 9,1 m širine), ki je bil v celoti izdelan iz vroče pocinkanih elementov, je bil namenjen prometu leta 1966. Pri inšpekciji leta 1986 so ugotovili, da znaša preostala debelina pocinkanja 112 µm, kar zadošča še za nadaljnjih 60 do 100 let. Zatem ga bo potrebno prepleškati.

Tovarne celuloze in papirja. Tu so prisotne različne kemikalije, agresivne odpadne vode in visoka vlažnost agresivne atmosfere. Številni vroče pocinkani deli konstrukcij in opreme se dobro obnesejo v takšnih pogojih dela.

Druga procesna industrija in elektrarne. Uporabljen je širok spekter pocinkanih elementov.

Rekreativni objekti. To so športne hale, stadioni, tribune itd.

Armiranobetonske konstrukcije. Zaradi dobre vzdržljivosti vroče pocinkane jeklene armature pri pH

vrednostih betona med 12 in 12,5, se ta artikel vse bolj uporablja v običajnih betonskih konstrukcijah, ki so izpostavljene agresivnim atmosferam in drugim medijem.

Številna druga uporaba. Mnoge nosilne konstrukcije iz vročega pocinkanega jekla so primerne za petrokemično industrijo in rafinerije, različno signalizacijo, razsvetljavo, zaščitne ograje, vodne rezervoarje, rezervoarje za odpadne vode, hladilne vodne stolpe, cevovode plavalnih bazenov, številne druge drobne izdelke itd.

3. Literaturni viri

- ¹ L. Vehovar, *Korozija kovin in korozijsko preskušanje*, Samozaložba, Ljubljana 1991
- ² F.M. Reinhart, in *Twenty-Year Atmospheric Corrosion Investigation of Zinc-Coated and Uncoated Wire and Wire Products*, STP 290, American Society for Testing and Materials, 1961
- ³ S.E. Hadden, Effect of Annealing on the Resistance of Galvanized Steel to Atmospheric Corrosion, *J. Iron Steel Inst.*, Vol 171, 1952, str. 121-127
- ⁴ H.S. Campbell *et al.*, Effect of Heat Treatment on the Protective Properties of Zinc Coatings on Steel, *J. Iron Steel Inst.*, Vol 203, 1965, str. 248-251
- ⁵ D. Horstmann, Reaction Between Liquid Zinc and Silicon-Free and Silicon-Containing Steels, in *Proceedings of the Seminar on Galvanizing of Silicon-Containing Steels*, International Lead-Zinc Research Organization, 1975, str. 94
- ⁶ R.W. Sandelin, "Effects of Microstructure on the Galvanizing Characteristics of Steel", Paper presented at the Annual Meeting, American Hot Dip Galvanizers Association, Sept. 1964
- ⁷ *Galvanizing Characteristics of Structural Steels and Their Weldments*, International Lead Zinc Research Organization, 1975
- ⁸ "Standard Recommended Practice for Safeguarding Against Embrittlement of Hot-Dip Galvanized Structural Steel products and Procedure for Detecting Embrittlement, A 143, *Annual of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials
- ⁹ *The Design of Products To Be Hot Dip Galvanized After Fabrication*, American Hot Dip Galvanizers Association, 1985
- ¹⁰ *Recommended Details of Galvanized Structures*, American Hot Dip Galvanizers Association, 1983
- ¹¹ *Welding Zinc Coated Steels*, American Welding Society, 1973
- ¹² S.K. Coburn, C.P. Larrabee, H.H. Lawson, and G.B. Ellis, Corrosiveness at Various Atmospheric Test Sites as Measured by Specimens of Steel and Zinc, *Metal Corrosion in the Atmosphere*, STP 435, American Society for Testing and Materials, 1968, str. 371-372
- ¹³ *Feuerverzinhen*, 25, 1996, 1, str. 10-12

Pocinkovalnica d.o.o. Celje je omogočila številne raziskave, s katerimi je bilo možno opredeliti različne dejavnike, ki kreirajo kvaliteto vročega pocinkanja. Za takšno raziskovalno naravnost se najlepše zahvaljujemo.