

Usporedba metoda mjerenja debljina prevlaka

Vuković, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2009

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:990078>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-09**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Josip Vuković

Zagreb, 2009

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Damir Markučić

Josip Vuković

Zagreb, 2009



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske radove
 Povjerenstvo studija strojarstva za smjer
 Proizvodno inženjerstvo



Zagreb, 16. rujna 2008.

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP VUKOVIĆ**

Mat. br.: 0035151116

Naslov: **USPOREDBA METODA MJERENJA DEBLJINA PREVLAKA**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati sustavnu usporedbu nerazornih metoda za mjerjenje debljina prevlaka na metalnim podlogama, odnosno usporediti načela i postupke mjerjenja metodom vrtložnih struja i magnetskom metodom. Uvidom u materijale objavljene na internetu i u tiskanoj literaturi potrebno je usporedno prikazati:

- osnovna načela metoda
- područja primjene u industrijskoj praksi
- utjecajne čimbenike

Temeljem prikupljenih spoznaja, u drugom dijelu rada potrebno je provesti usporedbena mjerjenja dviju metoda na odgovarajućim postojećim, ili pripremljenim uzorcima s posebnim osvrtom na podešavanje ispitnih sustava prije mjerjenja te zahtijevana uzorkovanja.

Komentirati dobivene rezultate mjerjenja obzirom na ponovljivost i obnovljivost. Po mogućnosti procijeniti čimbenike koji u najvećoj mjeri doprinose varijabilnosti rezultata te sugerirati mjere unaprijedenja pouzdanosti ispitnih postupaka.

Zadatak zadan:

16. rujna 2008.

Zadatak dao:

Prof.dr.sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

ožujak 2009.

Predsjednik povjerenstva :

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu uspoređene su dvije nerazorne metode za mjerjenje debljina prevlaka na metalnim podlogama. U prvom dijelu rada detaljno su opisane magnetska metoda i metoda vrtložnih struja, njihova osnovna načela, područje primjene i utjecajni čimbenici.

U drugom dijelu rada provedena su usporedbena mjerena navedenih dviju metoda pri ujednačenim mjernim uvjetima. Mjerena magnetskom metodom provedena su na čeličnoj ploči, na kojoj su naneseni organski premazi u tri različite debljine slojeva (50 µm, 150 µm, 200 µm). Mjerena metodom vrtložnih struja provedena su na aluminijskoj ploči, na koju su također naneseni organski premazi u tri različite debljine slojeva (50 µm, 100 µm, 150 µm). Mjerena su provedena od strane tri mjeritelja s pet ponavljanja.

Analizom rezultata izračunati su statistički parametri ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) pomoću programskog paketa „STATGRAPHICS plus 5.1“.

Sadržaj:

1.	UVOD	1
2.	ODREĐIVANJE DEBLJINE PREVLAKA	2
2.1.	Vrste prevlaka.....	2
2.2.	Metode za mjerjenje debljine prevlaka	3
2.2.1.	Destruktivne metode	7
2.2.2.	Nerazorne metode.....	8
2.2.2.1.	Metoda povratne disperzije β -zraka	8
2.2.2.2.	Metoda rendgenske fluorescencije.....	9
2.2.2.3.	Kapacitivna metoda.....	9
2.2.2.4.	Nerazorne optičke metode	10
3.	MAGNETSKA METODA.....	11
3.1.	Utjecajni čimbenici na točnost mjerjenja magnetskom metodom	13
3.2.	Kalibracija instrumenata	16
3.2.1.	Kalibracijski etaloni.....	17
4.	METODA VRTLOŽNIH STRUJA	18
4.1.	Osnovni principi metode vrtložnih struja	18
4.2.	Utjecajni čimbenici na točnost mjerjenja metodom vrtložnih struja.....	21
4.3.	Kalibracija instrumenta	26
4.3.1.	Kalibracijski etaloni.....	26

4.4.	Interpretacija rezultata	27
4.5.	Oprema za ispitivanje	27
4.6.	Ispitno izvješće	28
5.	MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM	29
5.1.	Plan mjerena.....	29
5.2.	Kalibracija instrumenta	32
5.3.	Rezultati mjerena.....	33
6.	MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE METODOM VRTLOŽNIH STRUJA	35
6.1.	Plan mjerena.....	35
6.2.	Kalibracija instrumenta	36
6.3.	Rezultati mjerena.....	37
7.	ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA.....	39
7.1.	R&R analiza za magnetsku metodu.....	40
7.2.	R&R analiza za metodu vrtložnih struja	44
7.3.	Usporedba rezultata mjerena.....	48
8.	ZAKLJUČAK	51
9.	LITERATURA	52

Popis slika:

SLIKA 3.1. MAGNETSKI PULL-OFF UREĐAJ U OBЛИKU OLOVKE.....	11
SLIKA 3.2. ROLL-BACK MAGNETSKI UREĐAJ ZA MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE.....	12
SLIKA 3.3. PRINCIP MJERENJA DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM.....	13
SLIKA 4.1. OSNOVNI PRINCIP METODE VRTLOŽNIH STRUJA.....	19
SLIKA 5.1. PLAN MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI.....	29
SLIKA 5.2. ČELIČNA PLOČA S OZNAČENIM MJESTIMA MJERENJA.....	30
SLIKA 5.3. ISPIS PODATAKA U POSISOFT PROGRAMU.....	31
SLIKA 5.4. UREĐAJ DEFELSKO FNS3.....	32
SLIKA 5.5. ETALONSKI LISTIĆI.....	33
SLIKA 6.1. ALUMINIJSKA PLOČA S OZNAČENIM MJESTIMA MJERENJA.....	35
SLIKA 7.1. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO A.....	41
SLIKA 7.2. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO B.....	42
SLIKA 7.3. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO C.....	43
SLIKA 7.4. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO A.....	45
SLIKA 7.5. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO B.....	46
SLIKA 7.6. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO C.....	47
SLIKA 7.7. PROCIJENJENE RAZLIKE ZA MJERENJA MAGNETSKOM METODOM.....	48
SLIKA 7.8. PROCIJENJENE RAZLIKE ZA MJERENJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	49

Popis tablica:

TABLICA 2.1. PODJELA NAJČEŠĆE KORIŠTENIH PODLOGA ZA PREMAZIVANJE	4
TABLICA 2.2. IZBOR MJERAČA DEBLJINE PREVLAKE	6
TABLICA 5.1. KORIŠTENE DEBLJINE ETALONSKIH LISTIĆA ZA ČELIČNU PLOČU	30
TABLICA 5.2. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM PRVOG MJERITELJA	33
TABLICA 5.3. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM DRUGOG MJERITELJA	34
TABLICA 5.4. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM TREĆEG MJERITELJA	34
TABLICA 6.1. KORIŠTENE DEBLJINE ETALONSKIH LISTIĆA ZA ALUMINIJSKU PLOČU	36
TABLICA 6.2. REZULTATI MJERENJA PRVOG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	37
TABLICA 6.3. REZULTATI MJERENJA DRUGOG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA....	37
TABLICA 6.4. REZULTATI MJERENJA TREĆEG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA	38
TABLICA 7.1. REZULTATI MJERENJA DOBIVENI MIKROSKOPOM	39
TABLICA 7.2. PROCIJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE ZA MAGNETSKU METODU	40
TABLICA 7.3. PROCIJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE ZA METODU VRTLOŽNIH STRUJA	44
TABLICA 7.4. PROCJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE RAZLIKA REZULTATA MJERENJA.....	49

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
C	- kapacitet	F
d	- debljina prevlake	mm
d	- promjer zavojnice sonde	mm
d_{\max}	- maksimalna mjerljiva debljina	mm
d_{\min}	- najmanja kritična debljina	mm
D	- debljina stjenke	mm
f	- frekvencija	Hz
G	- vodljivost	S
I	- jakost struje	A
n	- faktor ispunjenja	-
R	- otpor	Ω
$R_{\bar{x}}$	- raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerena	μm
s	- procijenjena standardna devijacija	μm
s_r	- procijenjena standardna devijacija ponovljivosti	μm
s_R	- procijenjena standardna devijacija obnovljivosti	μm
$s_{R&R}$	- procijenjena kombinirana standardna devijacija	μm
s_{tm}	- procijenjena standardna devijacija koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerena	μm

T	- tolerancija	µm
U	- napon	V
\bar{x}	- aritmetička sredina	µm
δ_0	- standardna dubina penetracije	mm
ϵ_0	- dielektrična konstanta vakuma	F/m
ϵ_r	- relativna dielektričnost prevlake	-
μ_r	- relativna permeabilnost	-
σ	- električna provodnost vodiča	S/m

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu uz pomoć prof.dr.sc. Damira Markučića kojemu se ovim putem zahvaljujem, te literaturom navedenom u popisu.

Ovim putem želio bih se zahvaliti gosp. Dinku Tvrtkoviću, dipl.ing.stroj., koji mi je omogućio izradu diplomskog rada u prostorijama IGH, Instituta Građevinarstva Hrvatske, kao i ostalim kolegama iz IGH na bezuvjetnoj pomoći u svakom trenutku izrade ovog rada.

Također zahvalu upućujem svim profesorima, kolegama i priateljima na višegodišnjoj potpori tijekom studija.

U Zagrebu, ožujak 2009.

1. UVOD

Kontrola kvalitete prevlake redovito se temelji na zapažanjima prilikom vizualnog pregleda i na rezultatima mjerjenja deblijine prevlake. Praktično iskustvo ukazuje na povezanost izgleda i deblijine prevlake s jedne strane i njegovog vijeka trajanja, kao najvažnije tehničke karakteristike, s druge strane. Kontrolno ispitivanje provodi se nakon nanošenja prevlake i za vrijeme eksploatacije konstrukcijskog dijela, a zatim se ocjenjuje kvaliteta prevlake u skladu sa standardima, internim normama ili ugovornim obvezama prema naručitelju. Uređaji za mjerjenje deblijine prevlaka koriste različita fizikalna načela za mjerjenje deblijine prevlake ovisno o tome na kakvoj je osnovnoj podlozi prevlaka nanešena.

U okviru ovog rada opisane su dvije metode mjerjenja deblijine prevlake, magnetska metoda i metoda vrtložnih struja. Provesti će se usporedbena mjerena tih dviju metoda na pripremljenim uzorcima i analizirati dobiveni rezultati mjerjenja s obzirom na njihovu ponovljivost i obnovljivost.

2. ODREĐIVANJE DEBLJINE PREVLAKA

2.1. Vrste prevlaka¹

Svrha zaštitnih prevlaka i premaza je da dovoljno dugo štite konstrukcijski material, na koji su nanesene, od štetnih utjecaja okoline (trošenja korozijom, abrazijom, erozijom ili kavitacijom, od pojave zamora, pukotina, loma i puzanja, od bubrenja i izluživanja, razaranja biološkim čimbenicima, oštećivanja svjetlošću ili radijacijom, itd). Zaštitna funkcija prevlaka i premaza ostvaruje se prvenstveno odvajanjem materijala podloge od okoline, pa one same moraju biti dovoljno postojane i trajne u uvjetima eksploatacije. Stoga je najvažnije tehničko svojstvo prevlaka i premaza njihov vijek trajanja, a iskustvo pokazuje da je ono usko povezano s njenom debljinom.

Mnogim prevlakama osnovna svrha nije zaštita materijala, već poboljšanje estetskog izgleda (dekorativne prevlake) ili promjena električnih, toplinskih, optičkih i drugih svojstava površine konstrukcije (funkcionalne prevlake). Neke se prevlake i premazi primjenjuju u svrhu popravka pohabanih ili škartnih dijelova povećanjem dimenzija do propisanih vrijednosti (reparurne prevlake). Treba naglasiti da je i za te prevlake vrlo značajna njihova trajnost, pa prema tome i zaštitna uloga, budući da bi bez nje svi ostali korisni efekti nanošenja prevlaka i premaza bili kratkog vijeka.

Prevlake, za zaštitu od korozije, mogu se podijeliti na:

1. Metalne prevlake, koje se dijele na:
 - plemenite prevlake (katodne)
 - žrtvovane prevlake (anodne)

Plemenite prevlake su prevlake metala čiji je elektrodni potencijal u promatranim uvjetima pozitivniji od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje. Ovdje ubrajamo npr. prevlake od nikla, srebra, bakra, olova i kroma na čeliku.

Prevlake metala čiji je elektrodni potencijal u promatranoj sredini negativniji od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje, nazivaju se žrtvovane prevlake. To su npr. prevlake Zn, Cd, Al na čeliku.

2. Konverzijske prevlake

Konverzijske prevlake nastaju na površini metala uslijed kemijskih ili elektrokemijskih reakcija. Najčešće su to fosfatne i oksidne prevlake. U otopini koja sadrži metalne fosfate i fosfornu kiselinu, metal korodira stvarajući netopljive fosfate, kao i korozijske produkte koji čvrsto prianjaju uz metal i tako ga štite od korozije. Oksidne prevlake na metalima mogu nastati kontroliranom oksidacijom, uranjanjem u odgovarajuće otopine (npr. lužine), te elektrokemijski – anodnom oksidacijom (npr. kod aluminija). Prilikom nastajanja oksidnih prevlaka metal se prevodi iz aktivnog u pasivno stanje. Metali posjeduju povećanu kemijsku otpornost sve dok konverzijske prevlake održavaju metal u pasivnom stanju, tj. dok je manja površina metala u kontaktu s elektrolitom.

3. Nemetalne prevlake

Od nemetalnih prevlaka za zaštitu metala od korozije najviše se koriste organske prevlake na bazi polimera, tzv. premazi. Nemetalne prevlake mogu još biti metalni oksidi i keramike.

2.2. Metode za mjerjenje debljine prevlaka¹

Debljina prevlaka važna je varijabla za ocjenjivanje kvalitete proizvoda, procesa i kontrole troškova. Pri ocjenjivanju prevlake treba mjeriti njezinu lokalnu debljinu i to na onim mjestima mjerodavne plohe gdje se očekuje najmanja debljina, s obzirom da je kvaliteta prevlake definirana upravo tom minimalnom debljinom. Mjerjenje debljine prevlake može biti provedeno na više različitim načina. Pri izboru metode za mjerjenja debljine prevlaka treba voditi računa o tome da svaka metoda daje dovoljno točne

rezultate samo u određenom intervalu, koji se može ustanoviti eksperimentalno, a često ga navode i proizvođači mjernih uređaja.

Postoje brojne metode za ispitivanje debljine prevlaka, a izbor ovisi o:

- lokaciji (laboratorij ili teren),
- materijalu na koji se prevlaka nanosi – metal (magnetični ili nemagnetični), drvo, žbuka, cigla i plastika,
- uvjetima premazivanja (suhi ili vlažni),
- stanju površine (gruba ili glatka, ravna ili oblikovana, debela ili tanka, itd.)

Mjerači debljine prevlake najčešće mijere debljinu prevlake na metalnoj površini koja se premazivanjem zaštićuje od korozije. Za magnetične podloge, čelične i od lijevanog željeza, mjerači se baziraju na magnetskim svojstvima. Za nemagnetične podloge, kao što su aluminij i mjesec, koriste se električni mjerači. Prvi korak pri izboru mjerača je odrediti koja će se podloga ispitivati, a zatim je klasificirati u magnetične ili nemagnetične. Tablica 2.1. prikazuje primjere najčešće korištenih metalnih podloga i njihovu klasifikaciju.

Tablica 2.1. Podjela najčešće korištenih podloga za premazivanje¹

Najčešći tipovi metalnih podloga	
Feromagnetske metalne podloge	Neferomagnetske metalne podloge
Čelik	Aluminij
Lijevano željezo	Bakar
Blago prekaljeni čelik	Cink
Feromagnetski korozionski postojani čelik	Neferomagnetski korozionski postojani čelik

Mjerači debljine prevlake tvornički su označeni s oznakom F za feromagnetske metalne podloge i s N ili NF za neferomagnetske metalne podloge. Također postoje i kombinirani mjerači označeni s oznakom F/N ili F/NF koji automatski prepoznaju tip podloge i prilagođavaju joj metodu mjerena.

Jedan od zahtjeva pri odabiru mjerača debljine premaza je i očekivana debljina prevlake, na osnovu koje se mora odrediti mjerno područje mjerača.

Suvremeni instrumenti su najčešće izvedeni s nekoliko mjernih područja s time da se performanse mogu optimirati unutar jednog mjernog područja. Dobro pravilo pri izboru prikladnog mjernog područja mjerača je da se napravi proba na određenom premazu, a da pri tome očekivana debljina prevlake ne prelazi 80% od mjernog područja mjerača (npr. ako je očekivana debljina prevlake $500 \mu\text{m}$ mjerno područje mjerača mora biti najmanje do $625 \mu\text{m}$, za preciznija mjerena).

U praksi se često kao pomoć pri izboru mjerača debljine koristi tablica 2.2 koja prikazuje mogućnosti mjerena pomoću različitih mjerača. U svakom slučaju, mora postojati fizička razlika između svojstava podloge i prevlake, npr. feromagnetska podloga s neferomagnetskom prevlakom i vodljiva podloga s nevodljivom prevlakom.

Tablica 2.2. Izbor mjerača debljine prevlake¹

PREMAZ	PODLOGA									
	Aluminij	Mjed	Bronca	Bakar	Čelik	Magnezij	Nehrdajući čelik	Titan	Uran	Cink
Aluminij					F					
Anodizacija	N					N				
Mjed					F					
Bronca					F					
Kadmij					F					
Keramika					F					
Krom (tvrdi)	N?			N?	F					
Krom (dekorativni)										
Bakar					F					
Eloxal	N									
Epoksid	N	N	N	N	F		N	N		N
Galvanizacija					F					
Lakiranje	N	N	N	N	F		N			N
Molibden disulfid					F		N			
Boja	N	N	N	N	F	N	N	N	N	N
Plastika	N	N	N	N	F	N	N	N	N	N
Platiniranje					F					
Gumiranje	N				F					N
Nehrdajući čelik										
Kositar					F					
Cink					F					

N: koristi mjerače za
nemagnetične metalne podloge

F: koristi mjerače za magnetične
metalne podloge

? : poznati uzorci potrebni
za kalibraciju

Metode za mjerjenje debljine prevlake podijeljene su u dvije osnovne skupine:

- Destruktivne (razorne) metode
- Nedestruktivne (nerazorne) metode

2.2.1. Destruktivne metode

Kod destruktivnih metoda dolazi do fizičkog uništenja uzorka, te je postupak dugotrajniji i skuplji. Zbog toga se u operativnoj kontroli i mjerenu češće koriste nedestruktivne metode, koje omogućavaju dobivanje brze informacije s vrlo jednostavnim postupkom mjerena.

Destruktivne metode su:

Mjerenja pomoću mikrometra: Kada se mala ploha ili listić oljušti s površine premazanog objekta, njegova se debljina može direktno mjeriti uporabom mikrometra. Alternativno, ukupna debljina podloge i prevlake se može mjeriti, a zatim podloga može biti izmjerena nakon uklanjanja prevlake strugačem ili otopinom. Debljina prevlake je razlika između ova dva mjerena.

Mjerenja igličnim mjeračima: Princip mjerena debljine suhog filma igličnim mjeračima zasniva se na prodiranju igle mjerača kroz suhi film sve do metalne podloge. U mnogim slučajevima slojevi premaza su tako tvrdi da se opiru penetraciji igličnih mjerača, pa se igla zamjenjuje svrdлом.

Mikroskopske metode: Kod upotrebe mikroskopa za mjerjenje debljine prevlaka, pripremi se presjek uzorka, a debljina prevlake mjeri se pomoću mjerne skale u okularu mikroskopa. Postoje različite metode mjerena debljine suhog filma pomoću mikroskopa:

- Kod Brighweelove metode, na filmu se napravi mala brazda ili se otkine mala krhotina. Snop svjetla projicira se na odabranu površinu pod kutom od 45° . Lom zrake svjetlosti ispituje se mikroskopom koji ima mikrometar u vidnom području

okulara. Aparatura za ovu metodu dostupna je u obliku Schmaltz optičkog analizatora površine.

- Kod Stopped metode, na uzorku se oštrim nožem napravi rez, a zatim se mikroskopom fokusiraju naizmjence gornji i donji rubovi reza. Debljina filma računa se pomoću vertikalnih podešavanja mikroskopa.

2.2.2. Nerazorne metode

Nerazorni postupci ili metode određivanja debljine prevlake temelje se na razlikama fizikalnih svojstava prevlake i podloge, a dijele se na:

- Magnetske metode (MT)
- Metodu vrtložnih struja (EC)
- Metodu povratne disperzije β -zraka
- Metodu rendgenske fluorescencije
- Kapacitivnu metodu
- Optičke i druge metode

2.2.2.1. Metoda povratne disperzije β -zraka

Metoda povratne disperzije β -zraka služi za mjerjenje debljine prevlaka na temelju ovisnosti refleksije tih zraka (tj. mlaza elektrona) od nekog materijala o rednom (atomskom) broju njegovih atoma. Elektroni se pri refleksiji odbijaju u različitim smjerovima pa se ta pojava naziva povratnom disperzijom.

2.2.2.2. Metoda rendgenske fluorescencije

Metoda rendgenske fluorescencije služi za kontrolu gotovo svih kombinacija prevlaka/podloga, a temelji se na izlaganju uzorka X-zrakama, što izaziva sekundarno zračenje s valnom duljinom ovisnom o rednom broju prisutnih atoma. Kako X-zrake prodiru kroz film i jednim dijelom kroz podlogu, u spektru fluorescentnog zračenja biti će valnih duljina karakterističnih za oba materijala. Što je debljina filma veća, intenzitet njene fluorescencije je veći, a intenzitet fluorescencije podloge manji. Maksimalne mjerljive debljine iznose obično od 8 do 80 μm , ali je donja granica mjerljivosti čak 0.02 μm .

2.2.2.3. Kapacitivna metoda

Kapacitivna metoda može poslužiti za mjerjenje debljine nevodljivih prevlaka s poznatom dielektričnošću na vodljivim (obično metalnim) podlogama. Mjeri se kapacitet kondenzatora C koji čini uzorak s prevlakom i prislonjenom metalnom pločicom površine S . Tada je debljina prevlake prema jednadžbi 2.1:

$$d = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{C} \quad (2.1)$$

gdje je:

ϵ_r – relativna dielektričnost prevlake

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ – dielektrična konstanta vakuma

C – izmjereni kapacitet

2.2.2.4. Nerazorne optičke metode

Nerazorne optičke metode koriste se za kontrolu debljine prozirnih prevlaka, pri čemu se mjeri:

- pomak optičkog sustava mikroskopa kada se slika fokusira na površinu prevlake (obično označene mekom olovkom), odnosno podloge
- razmak između brazda nastalih izlaganjem uzorka monokromatskom svjetlu poznate valne duljine, tj. interferencijom zraka odbijenih od površine prevlake sa zrakama odbijenim od podloge
- razmak između dviju interferencijskih brazda nastalih iz zrake što pod kutom od 45° pada na uzorak dajući zraku koja se odbija od prevlake i zraku koja se odbija od podloge (metoda svjetlosnog presjeka)
- promjena ponašanja polariziranog svjetla pri refleksiji od osvjetlenog uzorka na kojem se nalazi prozirna prevlaka (elipsometrija)
- intenzivnost refleksije svjetla s obojenog uzorka anodiziranog aluminija (fotoelektrički postupak mjerena dubine nijanse).

Značajka optičkih metoda je usko ograničena primjenjivost.

3. MAGNETSKA METODA

Metoda magnetske indukcije (MT) koristi se za mjerjenje debljine neferomagnetske prevlake na feromagnetskim podlogama. Metoda je izravna, tj. vrh sonde dodiruje dio koji se mjeri. Kada je sonda pozicionirana, mjeri se linearna udaljenost između vrha sonde koja dodiruje kontaktnu površinu i osnovnog metala. Instrumenti za mjerjenje debljine prevlake magnetskom metodom mjere silu magnetske privlačnosti između permanentnog magneta i osnovnog metala, na koji je prevlaka nanesena ili magnetskog otpora koji se javlja pri prolasku kroz prevlaku i osnovni metal. Postoje dva principa mjerjenja magnetskom metodom, pull-off princip i princip elektromagnetske indukcije.²

Magnetski pull-off princip³

Uređaji koji mjere na pull-off principu koriste permanentan magnet, kalibriranu oprugu i pripadajuću mjernu skalu. Sila privlačnosti između magneta i podloge je veća što je prevlaka tanja, odnosno ta sila privlačnosti je slabija što je prevlaka deblja. Debljina prevlake tako se utvrđuje mjerenjem potrebne sile da se uređaj odvoji od podloge.

Magnetski pull-off uređaji su u obliku olovke (pencil-type) i osmišljeni su za rad u jednoj ili dvije pozicije, relativno su jeftini, jednostavnii, a primjenjuju se tamo gdje je potrebna brza kontrola tijekom proizvodnje (slika 3.1). Preciznost takvih uređaja iznosi $\pm 10\%$.



Slika 3.1. Magnetski pull-off uređaj u obliku olovke³

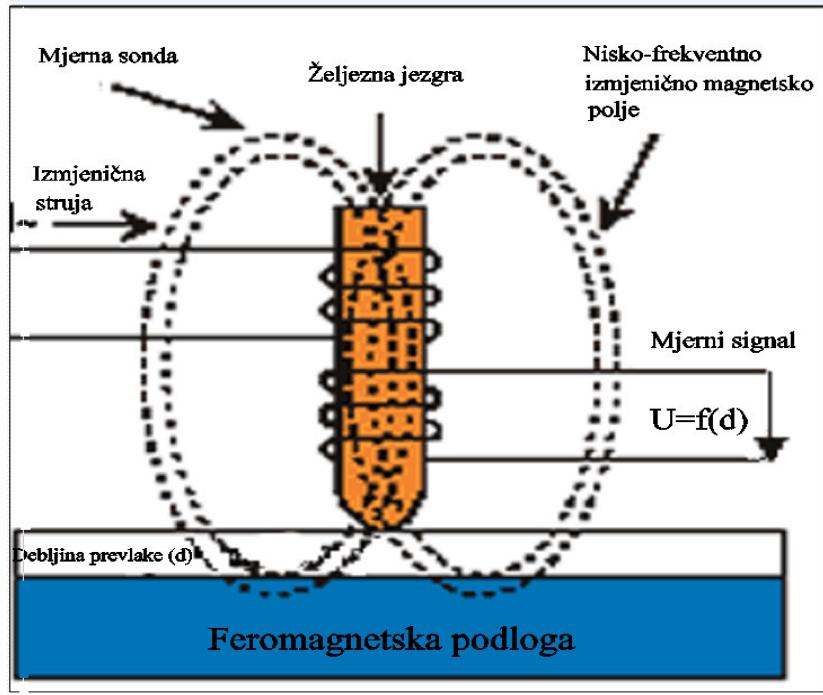
Roll-back modeli (slika 3.2) mogu mjeriti u bilo kojem položaju, precizniji su od uređaja u obliku olovke, a preciznost takvih uređaja iznosi $\pm 5\%$.



Slika 3.2. Roll-back magnetski uređaj za mjereje debljine prevlake³

Princip elektromagnetske indukcije³

Uređaji koji rade na principu elektromagnetske indukcije koriste izmjenično magnetsko polje. Sonda takvih uređaja građena je od željezne jezgre i dvije zavojnice. Primarna zavojnica priključena je na izvor struje i stvara magnetsko polje. Kada se sonda približava podlozi na koju je nanesena prevlaka, dolazi do promjene gustoće magnetskog polja u tom području. Ta promjena magnetske indukcije mjeri se pomoću sekundarne zavojnice, kako je prikazano na slici 3.3. Izlazni signal sekundarne zavojnice pretvara se pomoću mikroprocesora, tako da se dobije digitalni prikaz vrijednosti debljine prevlake.



Slika 3.3. Princip mjerjenja debljine prevlake magnetskom metodom³

Suvremeniji instrumenti za mjerjenje imaju mogućnost pohranjivanja i obrađivanja podataka, izračunavanja statističkih podataka kao što su prosječna vrijednost, standardna devijacija, maksimalna i minimalna vrijednost, broj mjerena, prikaz rasipanja podataka po normalnoj razdiobi, prikaz raznih histograma, itd. Preciznost takvih uređaja je $\pm 1\%$.

Prednosti magnetske metode u odnosu na neke druge metode mjerena su relativno velika brzina mjerena (rezultati mjerena odmah se vide na digitalnom zaslonu), nerazaranje materijala koji se mjeri, relativno jeftina metoda, jednostavna za rad, itd.

3.1. Utjecajni čimbenici na točnost mjerena magnetskom metodom⁴

Postoji više utjecajnih čimbenika na točnost mjerena, a to su prije svega:

- Debljina prevlake: Preciznost mjerena mijenja se s debljinom prevlake, zavisno o konstrukciji instrumenta. Za tanke prevlake, preciznost je konstantna. Kod debljih prevlaka preciznost je funkcija debljine prevlake.

- Magnetska svojstva osnovnog metala: Mjerenje debljine prevlake magnetskom metodom temelji se na razlikama magnetskih svojstava osnovnog metala i prevlake. Da bi se izbjegao utjecaj temperature, instrumenti moraju biti kalibrirani pomoću kalibracijskih etalona, tako da se koristi osnovni metal s istim svojstvima kao i ispitni uzorak, ili ako je moguće da se uzorak ispita prije primjene.
- Debljina osnovnog metala: Za svaki instrument postoji najmanja kritična debljina osnovnog metala, iznad koje iznos debljine osnovnog materijala neće imati utjecaja na točnost mjerjenja. To ovisi o sondi samog instrumenta i prirodi osnovnog metala. Kritična debljina treba biti određena eksperimentalno, osim ako je nije odredio proizvođač.
- Rubni efekti: Magnetska metoda osjetljiva je na nenadane promjene (npr. pojavu pukotina na osnovnom materijalu, mjerjenja na rubu osnovnog materijala, itd) na površinskom dijelu ispitnog uzorka. Stoga mjerjenja koja se provode preblizu ruba ili unutar kuta neće biti valjana, osim ako instrument nije posebno kalibriran za takva mjerjenja. Mjerena bi se trebala provoditi najmanje 20 mm od takvih diskontinuiteta, zavisno o instrumentu.
- Zakrivljenost ispitnog uzorka: Na mjerjenja utječe zakrivljenost ispitnog uzorka. Utjecaj zakrivljenosti zavisi o vrsti instrumenta, ali uvijek postaje izraženiji kada se radius zakrivljenosti smanjuje. Za mjerjenja zakrivljenih ispitnih uzoraka instrumenti trebaju biti posebno kalibrirani. Instrumenti koji imaju bipolarne sonde mogu pokazivati različite rezultate mjerjenja, ako su polovi poravnani u ravnini koja je paralelna s osi cilindričnog dijela. Sličan efekt može se pojaviti i s jedno-polarnom sondom ako je vrh sonde nejednako istrošen.
- Površinska hrapavost: Ako rezultati mjerjenja na nekoj hrapavoj površini nisu u granicama ponovljivosti instrumenta, potreban broj mjerjenja na takvoj površini ne smije biti manji od pet.
- Smjer mehaničke obrade: Na mjerjenja provedena instrumentima s bipolarnim sondama ili nejednako istrošenim jedno-polarnim sondama može utjecati smjer

mehaničke obrade osnovnog metala (npr. smjer valjanja). Ako mehanička obrada ima izrazit utjecaj na očitavanje, sonda mora imati istu orijentaciju kao kad je kalibrirana. Ako je to nemoguće, trebaju se provesti četiri mjerenja u istoj mjernoj točki tako da se sonda svaki put rotira za 90°.

- Zaostali magnetizam: Zaostali magnetizam kod osnovnih materijala od feromagnetskih metala utječe na mjerena sa instrumentima koji koriste stalno magnetsko polje. Utjecaj na instrumente koji koriste izmjenično magnetsko polje je mnogo manji. Ako je u osnovnom materijalu prisutan zaostali magnetizam, a mjerimo instrumentom koji koristi stalno magnetsko polje, važno je mjerena provesti u dva različita smjera od 180°.
- Magnetska polja: Jaka magnetska polja, kao što su polja dobivena različitim električnim uređajima, mogu ozbiljno utjecati na rad instrumenata koji koriste stalno magnetsko polje.
- Stanje površine: Sonda svakog instrumenta mora imati fizički kontakt s ispitnom površinom. Instrumenti su osjetljivi na strana tijela koja onemogućuju direktni kontakt sonde i površine prevlake. Prije svakog mjerena s površine se treba odstraniti svaki nepoznati materijal, kao što je prljavština, mast, koroziski produkti, bez da se ošteti materijal same prevlake. Pri provođenju mjerena treba izbjegavati područja koja imaju vidljiva oštećenja koja je teško odstraniti, kao što su zavarena i lemljena mjesta, kiseline, oksidi, itd.
- Provodljivost prevlake: Određeni magnetski instrumenti rade na frekvencijama od 200 Hz do 2000 Hz. Na ovim frekvencijama, vrtložne struje koje se stvaraju u gustim, visoko provodljivim prevlakama mogu ometati rad instrumenta.
- Sila pritiska sonde: Mjerne sonde dodiruju prevlaku konstantnom ali dovoljno visokom silom pritiska, tako da ne može doći do deformacije prevlake, pa čak ni ako je materijal prevlake premekan. Meke prevlake mogu biti prekrivene folijom (npr. listićem od kovine), a debljina folije se oduzima od konačnog rezultata.

- Orientacija sonde: Na uređaje koji rade na principu magnetske privlačnosti utječe orientacija magneta u odnosu na Zemljino polje gravitacije. Zato rad sonde uređaja u vodoravnom ili “obrnutom” (upside-down) položaju može zahtijevati različitu kalibraciju, ili može biti nemoguć.

3.2. Kalibracija instrumenata⁴

Prije uporabe, svaki instrument treba biti kalibriran prema uputama proizvođača, koristeći prikladne kalibracijske etalone. Kod instrumenata koji ne mogu biti kalibrirani, odstupanje od nominalne vrijednosti određuje se usporedbom sa kalibracijskim etalonima. U tom slučaju to odstupanje treba uzeti u obzir kod svih mjerena. Tijekom ispitivanja, kalibracija instrumenta se treba kontrolirati u određenim intervalima, pri čemu posebnu pažnju treba posvetiti na čimbenike iz točke 3.1.

Hrapavost površine i magnetska svojstva osnovnog metala i kalibracijskog etalona trebali bi biti slični ispitnom uzoraku. Kako bi se potvrdila njihova kompatibilnost, preporuča se usporediti mjerena nepresvučenog osnovnog metala standardiziranog kalibriranja s uzorkom bez prevlake.

U nekim slučajevima, kalibracija instrumenta treba se provjeravati tako da se sonda instrumenta rotira za 90° , kako bi se izbjegla ili kompenzirala pojava neželjenih čimbenika opisanih u točki 3.1.

Ako debljina osnovnog materijala nije veća od kritične debljine, osnovni materijal treba “podebljati” dovoljnom debljinom sličnog materijala.

Ako je prevlaka koja se mjeri zakrivljena, tada zakrivljenost etalonske prevlake ili podloge na koju se postavlja kalibracijska folija treba biti ista kao kod ispitnog uzorka.

3.2.1. Kalibracijski etaloni⁴

Kalibracijski etaloni ujednačene debljine dolaze ili u obliku podloška ili folije, ili kao etalonske prevlake.

Kalibracijske folije: U ovoj točki, riječ "folija" odnosi se na neferomagnetsku metalnu ili nemetalnu foliju ili pločicu. Zbog poteškoća da se ostvari adekvatan spoj folije i osnovnog metala, općenito folije nisu preporučljive za kalibraciju instrumenata kada se koriste načela magnetske sile privlačnosti. Kalibracijske folije su prikladne u određenim uvjetima, ali uz određene mjere opreza. One mogu biti korištene za kalibraciju drugih vrsta instrumenata.

Folije se, za razliku od etalonskih prevlaka često koriste za kalibraciju instrumenta kod mjerjenja zakrivljenih površina.

Kako bi se izbjegle greške prilikom mjerjenja, potrebno je utvrditi da je uspostavljen kontakt između folije i osnovnog metala.

Kalibracijske folije su podložne udubljenjima pa se stoga trebaju često mijenjati.

Etalonske prevlake: Etalonske prevlake sastoje se od poznatih prevlaka, jedinstvene debljine, koje su vezane za osnovni materijal.

4. METODA VRTLOŽNIH STRUJA

Mjerenje debljine prevlaka metodom vrtložnih struja (EC) temelji se na razlici u električnoj vodljivosti između prevlake i podloge. Metoda je posebno primjenjiva za mjerenja debljine većine oksidiranih prevlaka nastalih anodnim procesom, ali se ne može primijeniti na sve konverzijske prevlake, od kojih su neke pretanke da bi se izmjerile ovom metodom. Iako se teoretski metoda može koristiti za mjerenje debljine prevlaka na magnetskim osnovnim materijalima, njezina primjena za takve osnovne materijale nije preporučljiva. U takvim slučajevima preporučuje se magnetska metoda.⁵

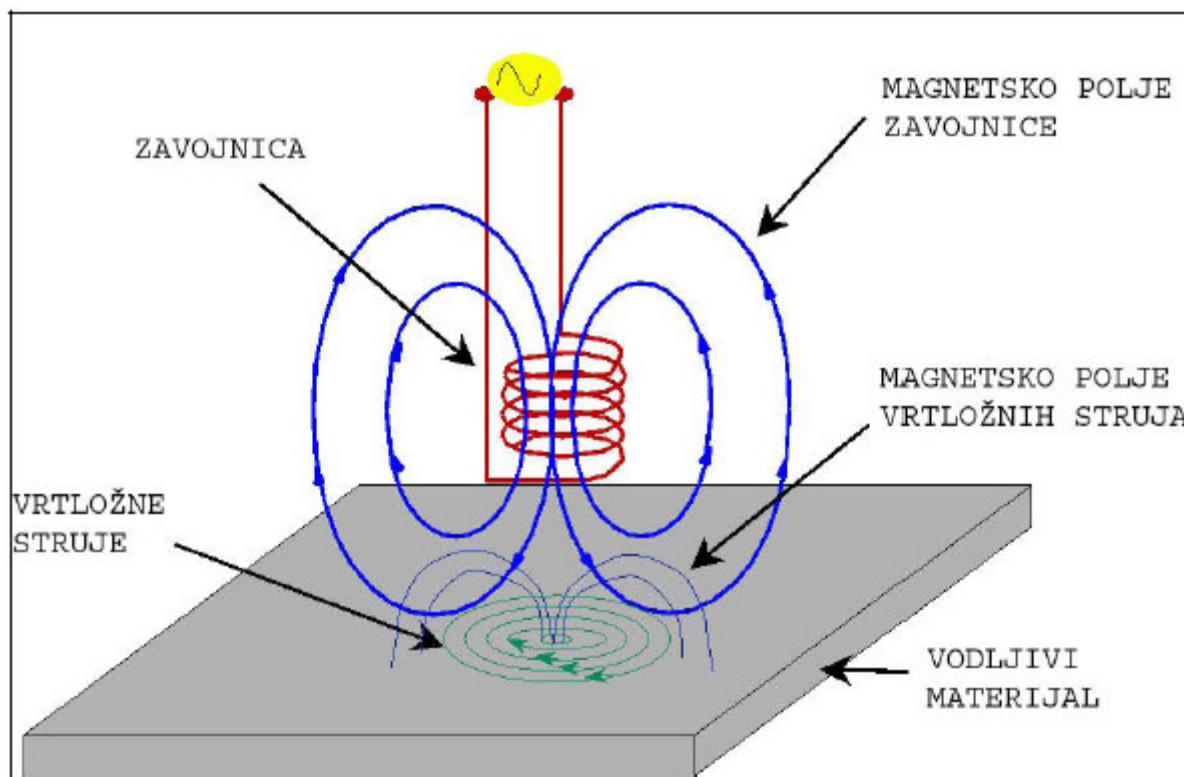
U općem slučaju ova metoda ima multifunkcionalnu primjenu:

- Utvrđivanje vodljivosti materijala (u svrhu klasifikacije materijala, detekcije toplinskih oštećenja...)
- Utvrđivanje permeabilnosti materijala
- Utvrđivanje kemijskog sastava legura
- Mjerenje debljina nevodljivih prevlaka na nemagnetičnim, vodljivim materijalima
- Mjerenje debljine nemagnetičnih, vodljivih prevlaka na nevodljivim prevlakama
- Mjerenje debljine nemagnetičnih metalnih prevlaka na nemagnetičnim metalima
- Ispitivanje tankostijenih cijevi (detekcija oštećenja i različitih uključaka)

4.1. Osnovni principi metode vrtložnih struja³

Pod utjecajem promjenljivog magnetskog polja u električki vodljivom materijalu induciraju se vrtložne struje (slika 4.1). Prolaskom visokofrekventne izmjenične struje kroz vodič (npr. bakrena zavojnica) formira se magnetsko polje oko same zavojnice

prema pravilu desne ruke. Ukoliko se u blizini tog vodiča nađe vodljivi materijal, magnetska indukcija će "propagirati" u isti.



Slika 4.1. Osnovni princip metode vrtložnih struja⁵

Vrtložne struje nastale u vodljivoj podlozi kreiraju svoju vlastitu impedanciju u zavojnici stvarajući visoko frekventno polje. Veličina promjene impedancije (odnosno napona zavojnice) funkcija je udaljenosti mjerne sonde od površine metala, odnosno debljine prevlake. Nevodljive prevlake predstavljaju "odmaknutost" između osnovnog metala i ispitne sonde. Ta "odmaknutost" izaziva gubitak u penetraciji vrtložnih struja u osnovni materijal i uzrokuje promjenu impedancije zavojnice sonde.

Dubina prodiranja vrtložnih struja u materijal funkcija je nekoliko parametara, prije svega svojstva materijala (vodljivost i permeabilnost materijala), faktora ispunjenja, frekvencije ispitivanja te kontakta između ispitne zavojnice i uzorka.

Jednadžba 4.1. prikazuje o čemu ovisi dubina penetracije:

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} \quad (4.1.)$$

gdje je:

δ_0 – standardna dubina penetracije u mm

f – frekvencija sonde u Hz

μ_r – relativna permeabilnost (za nemagnetske materijale $\mu_r = 1$)

σ – električna provodnost vodiča, u MS/m (megasimens po metru)

Iz jednadžbe 4.1. vidljiva je obrnuto proporcionalna veza frekvencije i dubine penetracije.

Faktor koji je mjerodavan za kvalitetan prijenos inducirane struje u materijal u obliku vrtložnih struja zove se faktor ispunjenja koji bi se za kvalitetna mjerjenja trebao kretati u granicama od 0.8 do 0.99. Faktor ispunjenja izračunava se prema izrazu 4.2.

$$n = \frac{d^2}{D^2} \quad (4.2.)$$

gdje je:

d – promjer zavojnice sonde (mm)

D – debljina stjenke (mm)

U slučaju da je faktor ispunjenja manji od 0.8 znači da odabrani promjer zavojnice nije dovoljno velik te da nema dobrog magnetskog kontakta. Time nema niti vrtložnih struja za daljnje ispitivanje.

Frekvencije ispitivanja u pravilu se dijele u tri kategorije:

- Niske frekvencije: 1 – 50 kHz
- Srednje frekvencije: 50 – 500 kHz
- Visoke frekvencije: preko 500 kHz

Uređaji za mjerjenje debljine prevlake metodom vrtložnih struja slični su onima koji rade na principu elektromagnetske indukcije. Tipična preciznost takvih uređaja je $\pm 1\%$. Dostupni instrumenti koriste analogni, digitalni ili mikroprocesorski dizajn. Mnogi mikroprocesorski instrumenti nude dvostruku mogućnost za elektromagnetsku indukciju na feromagnetskim (F) i ne feromagnetskim (N) materijalima s instrumentom koji koristi princip vrtložnih struja i koji ima dva različita dizajna sondi.

4.2. Utjecajni čimbenici na točnost mjerjenja metodom vrtložnih struja⁶

Postoji više utjecajnih čimbenika na točnost mjerjenja, a to su prije svega:

- Debljina prevlake: Preciznost mjerjenja mijenja se s debljinom prevlake. Kod tankih prevlaka nepreciznost mjerjenja je konstantna, neovisna o debljini prevlake i iznosi najmanje $0,5 \mu\text{m}$ za jedan niz mjerjenja. Kod prevlaka debljih od $25 \mu\text{m}$, nepreciznost postaje funkcija debljine prevlake. Za mjerjenja debljina prevlaka manjih od $5 \mu\text{m}$, uvijek se uzima prosjek nekoliko mjerjenja.
- Električna svojstva osnovnih materijala: Na mjerjenja može utjecati električna vodljivost osnovnih materijala, koja je funkcija strukture i toplinske obrade materijala. Utjecaj električne vodljivosti na mjerjenja varira značajno ovisno o izradi i tipu instrumenta. Materijali kojima se elektroni mogu lagano izbaciti iz putanje pod djelovanjem električne sile nazivaju se vodičima. Jedinica vodljivosti je Simens ($S = 1/\Omega$), te se izračunava prema jednadžbi 4.3.

$$G=1/R \quad (4.3.)$$

gdje je:

G – vodljivost u S

R – otpor u Ω

Zbog reciprociteta otpora i vodljivosti proizlazi da dobar vodič ima mali otpor i obrnuto. Kako različita vodljivost utječe na ispitnu zavojnicu, njena impedancija obrnuto djeluje na vodljivost. Veća vodljivost uzrokuje manju vrijednost impedancije.

- Debljina osnovnog metala: Za svaki instrument postoji najmanja debljina osnovnog materijala (kritična debljina), d_{\min} , iznad koje iznos debljine ne utječe na točnost mjerjenja. Budući da kritična debljina utječe na frekvenciju vrtložnih struja i električna svojstva osnovnog materijala, njezinu vrijednost treba odrediti eksperimentalno, osim ako ju nije odredio proizvođač.
 - Nevodljive prevlake na vodljivom osnovnom materijalu

U ovom slučaju gustoća vrtložnih struja određena je samo udaljenošću između sonde i osnovnog metala, tj. debljinom prevlake. Kako bi se to postiglo osnovni materijal mora biti deblji od najmanje kritične debljine osnovnog materijala d_{\min} . Najmanja kritična debljina d_{\min} može se odrediti pomoću jednadžbe 4.4.

$$d_{\min} = 2,5 \delta_0 \quad (4.4.)$$

Ako je debljina osnovnog materijala manja od d_{\min} , to će utjecati na mjerenu vrijednost debljine prevlake.

- Vodljive prevlake na nevodljivim osnovnim materijalima

U ovom slučaju gustoća vrtložnih struja određena je samo debljinom prevlake. Približna maksimalna mjerljiva debljina, d_{\max} u mm, može se izračunati pomoću jednadžbe 4.5.

$$d_{\max} = 0,8 \delta_0 \quad (4.5.)$$

Raspon debljine je ograničen dubinom penetracije δ_0 i ako se debljina vodljive prevlake poveća, to neće imati daljnog utjecaja na stvaranje vrtložnih struja. d_{\max} se zato ponekad i naziva "zasićenom debljinom".

- Skin efekt: Skin efekt može biti poželjna i nepoželjna pojava, ovisno o tome da li se ispituje samo površina ispitnog objekta ili unutrašnjost. Ako se kroz zavojnicu pusti struja visoke frekvencije, tada će se sve vrtložne struje koncentrirati po površini ispitnog objekta, a ako se pusti struja niske frekvencije vrtložne će struje dublje penetrirati u materijal.⁵
- Rubni efekt: Instrumenti vrtložnih struja mogu biti osjetljivi na nagle promjene (npr. pojavu pukotina na osnovnom materijalu, mjerena na rubu osnovnog materijala, itd) na površini ispitnog uzorka. Tako mjerena obavljena preblizu ruba, ne moraju biti valjana, osim ako instrument nije posebno kalibriran za takva mjerena.

Izmjenična struja koja prolazi ispitnom zavojnicom inducira magnetsko polje koje u materijalu pobuđuje vrtložne struje. Kako se zavojnica približava rubu ispitnog objekta, tako se vrtložne struje koje prethode zavojnici, prema određenim parametrima kao što su ispitna frekvencija i geometrijske karakteristike objekta, iskrivljuju. Ovaj negativan utjecaj može se umanjiti zaštitom zavojnice ili smanjenjem promjera ispitne zavojnice. Rubni efekt najčešće se pojavljuje kod ispitivanja ravnih ploča površinskom zavojnicom.

- Zakrivljenost površine: Na mjerena utječe zakrivljenost površine ispitnog uzorka. Ovaj utjecaj značajno varira ovisno o izradi i tipu instrumenta i sonde, ali je uvijek izraženiji što se radius zakrivljenosti smanjuje. Tako mjerena izvedena na zakrivljenim ispitnim uzorcima ne moraju biti valjana, osim ako je instrument kalibriran za zakrivljenost površine o kojoj se radi, ili ako se koristi specijalna sonda koja kompenzira utjecaj površine.
- Hrapavost površine: Na mjerena utječe topografija površine osnovnog materijala i prevlake. Hrapave površine mogu uzrokovati sustavne i slučajne pogreške. Slučajne pogreške mogu se umanjiti provedbom većeg broja mjerena, tako da

se svako mjerjenje izvrši na drugom mjestu i tada izračunava prosječna vrijednost te serije mjerjenja.

- Efekt završetka: Efekt završetka slijedi sličan princip kao i rubni efekt. To je signal koji se može opaziti kod ispitivanja tanko stijenih cijevi ili nekih profila, standardnom provlačnom ili obuhvatnom zavojnicom i to u trenutku kada zavojnica prolazi preko ruba, odnosno završetka ispitnog profila ili cijevi. Ovaj efekt može se umanjiti zaštitom zavojnice ili skraćivanjem njene dužine.⁵
- “Lift-off” efekt: Ako sonda nije postavljena direktno na prevlaku, praznina između sonde i prevlake (lift-off) utječe na mjerena debljine prevlake. Mjerna debljina će biti jednaka debljini prevlake plus dodatna “lift-off” praznina. Do “lift-off” efekta može doći nenamjerno, tj. zbog prisustva stranih čestica između sonde i prevlake, zbog čega je potrebno često provjeravati čistoću vrha sonde.
- Faktor podizanja: Elektromagnetska sprega između ispitne zavojnice i ispitnog objekta od primarnog je značaja kod ispitivanja vrtložnim strujama. Međutim, ta sprega može varirati zbog zračnosti prisutne između zavojnice i objekta koji se ispituje. Elektromagnetsko polje, najjače je u blizini ispitne zavojnice i smanjuje se s udaljenošću. Faktor podizanja je iz tog razloga puno veći ako se npr. zavojnica koja dodiruje ispitni objekt odmakne od njega za 0.1 mm, nego ako se ta zavojnica odmakne s 10 mm na 10.1 mm.

Kako nevodljivi materijali kao što su boje ili plastične mase djeluju kao zračni prostor između zavojnice i vodljivog materijala, tada je debljinu tog zračnog prostora, odnosno nevodljive prevlake, vrlo lako odrediti. Iz tog razloga oprema za ispitivanje metodom vrtložnih struja ima mogućnost brzog i jednostavnog određivanja faktora podizanja kao i mogućnost razlikovanja ovog faktora od promjene vodljivosti, permeabilnosti i ostalih karakteristika materijala ispitnog objekta. Međutim ovaj faktor može biti i nepoželjna pojava koja uzrokuje povećanje šuma, smanjenje elektromagnetskog sprega te smanjenu mogućnost detektiranja diskontinuiteta.⁵

- Sila pritiska sonde: Sila pritiska sonde na ispitni uzorak utječe na očitanje instrumenta i zato treba biti konstantna. Ona je primjetnija kod mekših prevlaka. Većina instrumenata dostupnih u prodaji opremljeni su sondama s konstantnom silom pritiska.
- Otklon sonde: Osim ako drugačije nije odredio proizvođač, sonda se postavlja okomito na površinu prevlake jer otklon sonde od okomitog položaja može uzrokovati pogrešku u mjerenu. Vjerojatnost otklanjanja zbog nepažnje može se smanjiti dizajniranjem sonde ili upotrebom stalka koji pridržava sondu.
- Utjecaji temperature: Budući da temperaturne promjene utječu na svojstva sonde, ona se mora koristiti u približno istim temperaturnim uvjetima koji se koriste za kalibraciju, osim ako sonda ima ugrađenu kompenzaciju temperature. Kod većine metala mijenja se njihova električna vodljivost ovisno o temperaturi. Budući da na mjerena debljine prevlake utječe promjena u električnoj vodljivosti osnovnog materijala, treba izbjegavati velike promjene temperature.
- Posredne prevlake: Prisustvo posredne prevlake može utjecati na debljinu prevlake ako se električna svojstva te posredne prevlake razlikuju od električnih svojstava druge prevlake ili osnovnog materijala. Ako razlika postoji, tada će na mjerena dodatno utjecati debljina posredne prevlake manja od d_{min} . Ako je debljina veća od d_{min} , tada se posredna prevlaka (ako je neferomagnetska) može tretirati kao osnovni materijal. Neki instrumenti koji imaju sonde koje rade na višestrukim frekvencijama mogu mjeriti debljine i vršne i posredne prevlake.
- Diskontinuiteti: Oštećenja nastala korozijom ili vibracijama (udubine, ovalnost, i slično) uglavnom uzrokuju smanjenu vodljivost materijala ispitnog objekta. Diskontinuitete na površini mnogo je lakše otkriti nego razna dubinska oštećenja. Dok se površinske greške detektiraju osnovnom frekvencijom, otkrivanje dubljih oštećenja zahtijeva mnogo pažljiviji i složeniji izbor frekvencije. To su dijelovi gdje je raspodjela vrtložnih struja vrlo rijetka i gdje se, radi bolje penetracije, upotrebljava niska ispitna frekvencija.⁵

- Omjer signal – šum: Omjer amplitude očekivanog signala (npr. signala oštećenja u cijevi) i neželjenih signal (razni oblici šumova) naziva se omjer signala i šuma. Kod ispitivanja vrtložnim strujama bitno je da se nivo šuma tijekom ispitivanja svede na najmanju mjeru, odnosno da omjer signala oštećenja ispitnog objekta i šuma kod ispitivanja bude kao minimum u omjeru 3:1.⁵

4.3. Kalibracija instrumenta⁶

Prije upotrebe, svaki instrument treba kalibrirati prema uputama proizvođača, koristeći prikladne kalibracijske etalone. Pri tome, posebnu pažnju treba posvetiti čimbenicima iz točke 4.2. Kako bi se smanjile promjene provodljivosti uslijed varijacija u temperaturi, instrument i kalibracijski etaloni moraju pri kalibraciji biti pri približno jednakoj temperaturi kao i predmeti koji se mjere.

Električna svojstva osnovnog materijala kalibracijskih etalona trebaju biti približno jednaka kao i svojstva osnovnog materijala ispitnog uzorka.

Kako bi potvrdili njihovu podobnost, očitanja dobivena mjeranjem osnovnog materijala nepresvučenog kalibracijskog etalona treba usporediti s očitanjima dobivenim mjeranjem ispitnog uzorka.

Ako debljina osnovnog materijala nije veća od kritične debljine, osnovni materijal treba "podebljati" dovoljnom debljinom materijala koji ima slična električna svojstva, kako bi se očitanja učinila neovisnim o debljini osnovnog materijala.

Ako je zakriviljenost presvučene površine koja se mjeri takva da kalibracija na ravnoj površini neće biti valjana za takva mjerjenja, etaloni korišteni pri kalibraciji trebaju imati iste radijuse zakriviljenosti kao i uzorak koji se mjeri, osim ako se koristi posebna sonda koja kompenzira utjecaj zakriviljenosti.

4.3.1. Kalibracijski etaloni⁶

Kalibracija instrumenta mora se provesti pomoću najmanje dva etalona različite i poznate debljine. Jedan od ovih etalona može biti od nepresvučenog osnovnog materijala.

Kako su kalibracijski etaloni podložni trošenju tijekom vremena, potrebno ih je rekalibrirati i/ili zamijeniti u vremenskim intervalima utvrđenim lokalno, ili nakon konzultacije s proizvođačem.

4.4. Interpretacija rezultata⁶

Interpretacija i prezentacija rezultata dogovara se između zainteresiranih stranaka i obično uključuje:

- popis svih dobivenih očitanja,
- srednje, najveće i najmanje vrijednosti,
- standardnu devijaciju i/ili varijancu rezultata.

4.5. Oprema za ispitivanje⁵

Neophodna oprema za ispitivanje metodom vrtložnih struja sastoji se od izvora izmjenične struje (oscilator), ispitne sonde sa zavojnicom koja je indirektno, preko transformatora spojena na izvor signala, voltmetra u funkciji pokazatelja pada napona na istoimenoj ispitnoj zavojnici, faznog rotatora te osciloskopa kao krajnji korisnički čitač promjene faznog kuta. Kao generator elementarnog signala, najčešće se primjenjuje sinusoidalna struja frekvencije od 1 kHz do 2 MHz. Optimiranje parametra ispitne sonde svodi se na pravilan odabir promjera žice, broja zavoja te samog promjera namota zavojnice. Sama zavojnica izvedena je u obliku namotane izolirane bakrene žice.

Voltmetar mjeri promjenu napona kroz ispitnu zavojnicu koja je pak produkt promjene stanja i svojstva ispitnog elementa, te promjene relativnog razmaka između zavojnice i materijala. Promjena napona uključuje kako razliku amplituda tako i promjenu faze relativno prema prolasku struje kroz zavojnicu.

4.6. Ispitno izvješće⁶

Ispitno izvješće uključuje sljedeće informacije:

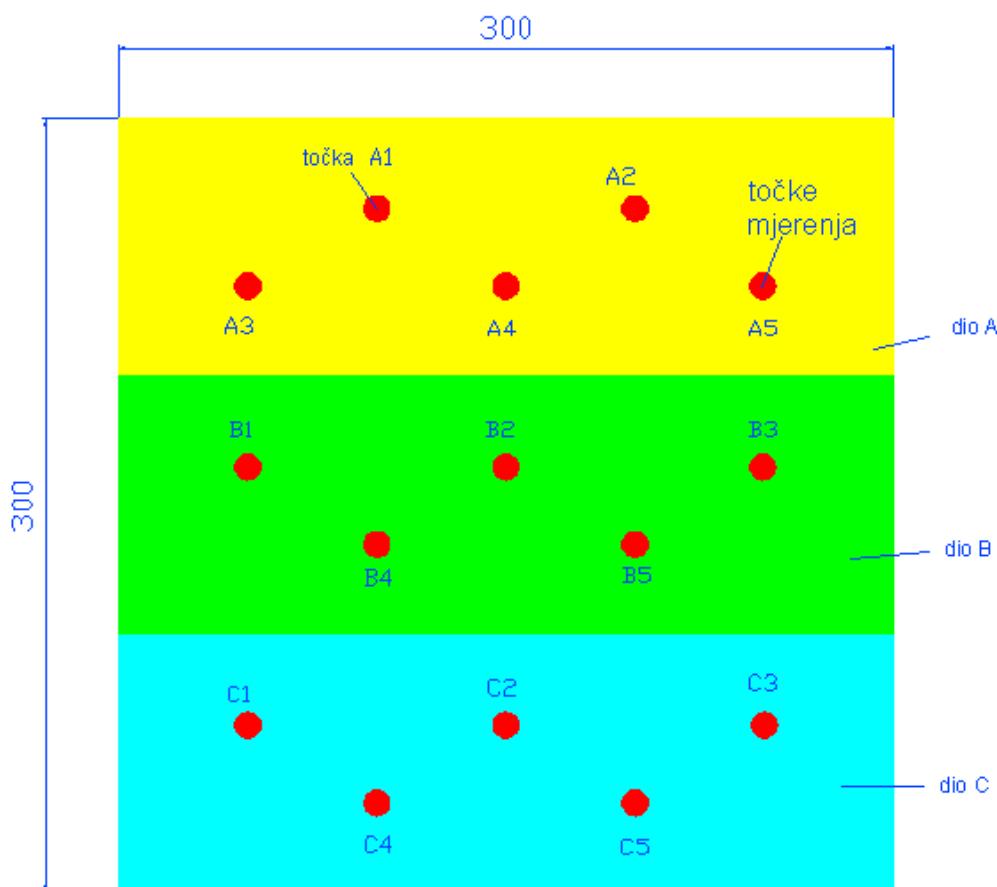
- sve informacije potrebne za identifikaciju ispitnog uzorka;
- veličine ispitnih područja, u kvadratnim milimetrima (mogu se koristiti i druge mjerne jedinice po dogovoru dobavljača i klijenta);
- lokacije ispitnih područja na svakom uzorku;
- broj mjerениh ispitnih uzoraka;
- mjerne debljine, u mikrometrima, na svakom ispitnom području i broj prosječnih mjerena i standardna devijacija za svako područje merenja;
- ime mjeritelja i ispitnog labaratorija;
- datum merenja;
- sva neuobičajena obilježja te okolnosti i uvjeti koje bi mogle utjecati na valjanost rezultata merenja;
- svako odstupanje od zadane metode;
- identifikaciju instrumenta, sonde i etalona korištenih pri merenju, uključujući referencu sa certifikatom valjanosti opreme.

5. MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM

5.1. Plan mjerena

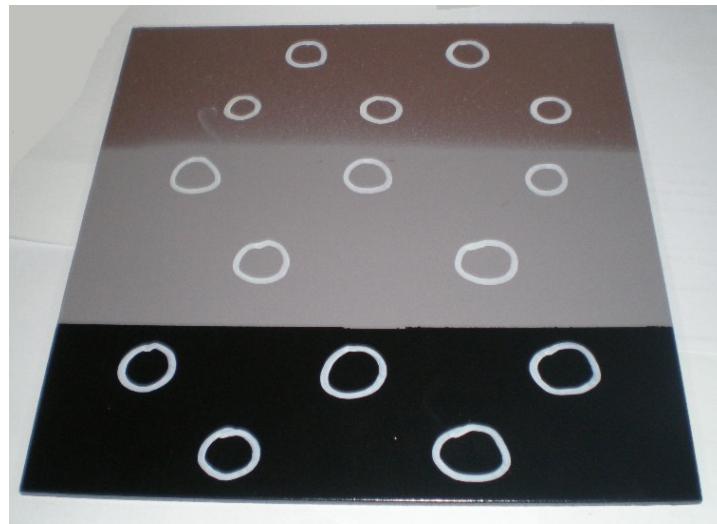
Mjerenja debljina prevlaka magnetskom metodom (MT) provedena su na čeličnoj ploči dimenzija $300 \times 300 \times 5$ (mm). Ploča je podijeljena na tri dijela, kao što je prikazano na slici 5.1, na kojima su naneseni premazi različitih debljina:

- dio A – temeljni premaz očekivane debljine $50 \mu\text{m}$
- dio B – temeljni sloj s međuslojem očekivane ukupne debljine od $150 \mu\text{m}$
- dio C – temeljni sloj s međuslojem i pokrivnim slojem očekivane ukupne debljine od $200 \mu\text{m}$



Slika 5.1. Plan mjerena na čeličnoj ploči

Na svakom dijelu čelične ploče odabrano je pet proizvoljnih točaka mjerena. Točke mjerena označene su ručno, vodootpornim markerom bijele boje (slika 5.2), i obilježavaju nešto veću površinu od kontaktne površine mjerne sonde. Stoga je teoretski moguće da eventualna neravnomjernost debljine prevlake doprinese rasipanju rezultata mjerena u slučaju ako mjeritelj kod ponavljanja mjerena neznatno promijeni poziciju sonde unutar označene mjerne točke.



Slika 5.2. Čelična ploča s označenim mjestima mjerena

Instrument je kalibriran putem tzv. "nulte kalibracije" i pomoću etalonskih listića. Tablica 5.1 prikazuje korištene debljine etalonskih listića pri kalibraciji instrumenta za mjerjenje ciljanih vrijednosti debljina prevlaka.

Tablica 5.1. Korištene debljine etalonskih listića za čeličnu ploču

Debljina etalonskog listića	Ciljana vrijednost debljine prevlake
54 µm	50 µm
128 µm	150 µm
252 µm	200 µm

Nakon kalibracije instrumenta na prvu očekivanu vrijednost od 50 µm, izvršeno je pet uzastopnih mjerena u točki A1, zatim pet uzastopnih mjerena u točki A2, i tako redom do točke A5. Zatim je instrument kalibriran za mjerjenje sljedeće debljine sloja očekivane vrijednosti 150 µm, i provedeno je pet uzastopnih mjerena u točki B1, zatim pet uzastopnih mjerena u točki B2, i tako redom do točke B5. Nakon toga instrument je kalibriran za mjerjenje sljedeće debljine sloja očekivane vrijednosti 200 µm, i ponovljen je isti postupak mjerena kao kod dijela A i dijela B čelične ploče. Rezultati mjerena dobiveni od strane jednog mjeritelja pohranjuju se u uređaj tijekom mjerena. Ispis rezultata mjerena provodi se spajanjem uređaja na računalo i korištenjem programa Posisoft (slika 5.3). Mjerena su provela ukupno tri mjeritelja.

Readings - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM		
Reading	Date	Time
1	29.01.2009	12:14:13
2	29.01.2009	12:14:17
3	29.01.2009	12:14:20
4	29.01.2009	12:14:24
5	29.01.2009	12:14:28

Summary - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM		
Reading	Date	Time
Max		66,00
Min		62,00
Mean		63,20
StdDev.		1,79

Annotations - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM		
Gage Model:	6000FNS3	
Gage S/N:	68008	
Probe Model:	FNS	
Probe S/N:	45856	
User:	Josip Vukovic	
Part:	celicna ploca	
Substrate:	celik	
Coating 1:	premaz	

Slika 5.3. Ispis podataka u Posisoft programu

5.2. Kalibracija instrumenta

Za mjerjenje debljine prevlake na čeličnoj ploči korišten je uređaj "DeFelsko FSN3" serije 6000 (slika 5.4). Uređaj funkcioniра na principu magnetske indukcije i metode vrtložnih struja te je njime moguće mjeriti debljine slojeva na feromagnetskim i neferomagnetskim podlogama. Već samim pritiskom mjerne sonde na osnovni material na kojem mjerimo, uređaj će prema vrsti podloge sam prepoznati metodu. Na feromagnetskim podlogama željeza ili čelika na ekranu instrumenta je oznaka F, dok je na neferomagnetskim podlogama aluminija, bakra, bronce, cinka ili nemagnetičnog čelika na ekranu instrumenta oznaka N. Mjerno područje uređaja kod obje mjerne tehnike je od 0 do 1500 µm.

Na ovom uređaju kod samog uključivanja postoji automatska kalibracija prema tvornički učitanom N.I.S.T. etalonu. Kalibracija podešavanjem je postupak promjene, odnosno podešavanja očitanja vrijednosti tako da na poznatom uzorku povećamo mjernu efikasnost obzirom na specifičnost oblika površine uzorka u njegovom mjernom području.



Slika 5.4. Uređaj DeFelsko FSN3

Uvijek prije početka mjeranja uređaj se kalibrira putem tzv. "nulte kalibracije". Pod pojmom "nulta kalibracija" podrazumijeva se mjerjenje vrijednosti na nepremazanim dijelovima površina i postavljanje očitane vrijednosti instrumenta na nulu. Na taj način se kompenzira utjecaj stanja površine.

Nakon "nulte kalibracije" uređaj se kalibrira pomoću etalonskih listića, prikazanih na slici 5.5. Etalonski listići su različitih debljina, a napravljeni su od plastičnih folija. Za kalibraciju se koristi listić čija debljina približno odgovara očekivanoj ili nazivnoj debljini premaza.



Slika 5.5. Etalonski listići

5.3. Rezultati mjerena

Mjerenja su provela tri mjeritelja, redom M1, M2 i M3, a rezultati mjerena prikazani su u tablicama 5.1, 5.2 i 5.3.

Tablica 5.2. Rezultati mjerena magnetskom metodom prvog mjeritelja

M1	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	68	62	66	70	64	70	62	66	3,16
A2	62	64	70	60	64	70	60	64	3,74
A3	74	76	72	78	74	78	72	74,8	2,28
A4	72	62	70	68	68	72	62	68	3,74
A5	66	58	64	60	58	66	58	61,2	3,63
B1	126	136	130	134	136	136	126	132,4	4,34
B2	124	118	118	116	122	124	116	119,6	3,29
B3	126	132	132	122	122	132	122	126,8	5,02
B4	138	132	140	138	142	142	132	138	3,74
B5	140	142	136	144	136	144	136	139,6	3,58
C1	188	188	182	190	184	190	182	186,4	3,29
C2	194	192	202	202	196	202	192	197,2	4,60
C3	182	182	188	184	186	188	182	184,4	2,61
C4	194	190	190	200	196	200	190	194	4,24
C5	208	206	212	212	212	212	206	210	2,83

Tablica 5.3. Rezultati mjerjenja magnetskom metodom drugog mjeritelja

M2	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	62	60	60	62	66	66	60	62	2,45
A2	70	70	62	66	64	70	62	66,4	3,58
A3	82	80	80	76	76	82	76	78,8	2,68
A4	64	68	68	66	64	68	64	66	2,00
A5	50	52	47	56	50	56	47	51	3,32
B1	132	136	138	136	138	138	132	136	2,45
B2	120	124	116	116	120	124	116	119,2	3,35
B3	134	140	140	138	142	142	134	138,8	3,03
B4	158	162	154	152	152	162	152	155,6	4,34
B5	144	144	136	136	144	144	136	140,8	4,38
C1	186	180	186	180	184	186	180	183,2	3,03
C2	202	204	204	202	202	204	202	202,8	1,01
C3	186	188	188	184	182	188	182	185,6	2,61
C4	184	188	192	192	190	192	184	189,2	3,35
C5	210	210	210	202	208	210	202	208	3,46

Tablica 5.4. Rezultati mjerjenja magnetskom metodom trećeg mjeritelja

M3	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	58	58	68	64	60	68	58	61,6	4,34
A2	64	64	66	56	62	66	56	62,4	3,85
A3	74	80	74	72	78	80	72	75,6	3,29
A4	68	60	62	70	64	70	60	64,8	4,15
A5	50	54	56	58	58	58	50	55,2	3,35
B1	132	138	138	134	134	138	132	135,2	2,68
B2	134	126	126	126	128	134	126	128	3,46
B3	126	134	122	128	122	134	122	126,4	4,98
B4	148	148	142	152	146	152	142	147,2	3,63
B5	138	138	144	136	140	144	136	139,2	3,03
C1	184	186	178	182	186	186	178	183,2	3,35
C2	198	206	202	202	204	206	198	202,4	2,97
C3	184	186	186	180	178	186	178	182,8	3,63
C4	190	188	188	192	188	192	188	189,2	1,79
C5	204	200	204	206	206	206	200	204	2,45

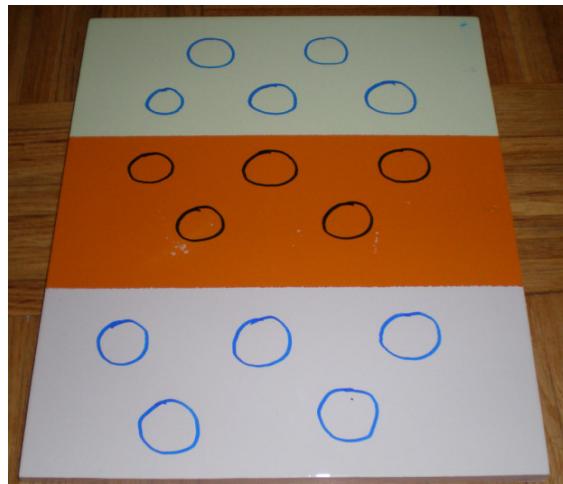
6. MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE METODOM VRTLOŽNIH STRUJA

6.1. Plan mjerena

Mjerenje debljine prevlaka metodom vrtložnih struja (EC) provedena su na aluminijskoj ploči dimenzija 300 x 300 x 10 (mm). Ploča je podijeljena na tri dijela, kao kod mjerena magnetskom metodom, na kojima su naneseni premazi različitih debljina:

- dio A – temeljni premaz očekivane debljine 50 µm
- dio B – temeljni sloj s međuslojem očekivane ukupne debljine od 100 µm
- dio C – temeljni sloj s međuslojem i pokrivnim sloj očekivane ukupne debljine od 150 µm

Na svakom dijelu aluminijске ploče odabранo je pet proizvoljnih točaka mjerena. Točke mjerena označene su ručno, vodootpornim markerom plave boje (slika 6.1), i obilježavaju nešto veću površinu od kontaktne površine mjerne sonde. Stoga je teoretski moguće da eventualna neravnomjernost debljine prevlake doprinese rasipanju rezultata mjerena u slučaju ako mjeritelj kod ponavljanja mjerena neznatno promijeni poziciju sonde unutar označene mjerne točke.



Slika 6.1. Aluminijска ploča s označenim mjestima mjerena

Mjerenja su provedena na isti način i istim redoslijedom kao kod mjerenja magnetskom metodom. Rezultati mjerenja dobiveni od strane jednog mjeritelja pohranjuju se u uređaju tijekom mjerenja, a ispis rezultata mjerenja jednog mjeritelja dobije se spajanjem uređaja na računalo i korištenjem programa Posisoft, kao kod mjerenja magnetskom metodom. Mjerenja su provela ukupno tri mjeritelja.

6.2. Kalibracija instrumenta

Za mjerenje debljine prevlake na aluminijskoj ploči korišten je isti uređaj, "DeFelsko FSN3", kao i kod mjerenja debljine prevlake na čeličnoj ploči. Uređaj prema vrsti podloge sam prepoznaje metodu kojom je potrebno mjeriti debljinu prevlake. Frekvencija uređaja prilikom mjerenja vrtložnim strujama je 5 MHz, što znači da standardna dubina penetracije vrtložnih struja u aluminiju, prema jednadžbi 4.1, iznosi 4,24 mm.

Uređaj se kalibrira jednakom kroz mjerjenje magnetskom metodom, putem tzv. "nulte kalibracije" i pomoći etalonskih listića, prikazanih na slici 5.4. Tablica 6.1 prikazuje korištene debljine etalonskih listića pri kalibraciji instrumenta za mjerenje ciljanih vrijednosti debljina prevlaka.

Tablica 6.1. Korištene debljine etalonskih listića za aluminijsku ploču

Debljina etalonskog listića	Ciljana vrijednost debljine prevlake
54 µm	50 µm
128 µm	100µm
128 µm	150µm

6.3. Rezultati mjerenja

Mjerenja su provela tri mjeritelja, M1, M2 i M3, a rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 6.1, 6.2 i 6.3.

Tablica 6.2. Rezultati mjerenja prvog mjeritelja metodom vrtložnih struja

M1	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	43	43	38	39	38	43	38	40,2	2,6
A2	42	43	43	44	44	44	42	43,2	0,8
A3	39	39	39	39	39	39	39	39	0
A4	42	42	42	42	42	42	42	42	0
A5	43	42	43	41	42	43	41	42,2	0,8
B1	92	92	94	92	92	94	92	92,4	0,9
B2	88	88	88	90	88	90	88	88,4	0,9
B3	92	90	92	92	92	92	90	91,6	0,9
B4	92	94	94	94	92	94	92	93,2	1,0
B5	90	90	90	90	90	90	90	90	0
C1	172	172	174	174	172	174	172	172,8	1,1
C2	156	154	156	156	158	158	154	156	1,4
C3	152	152	150	150	152	152	150	151,2	1,1
C4	146	146	146	148	148	148	146	146,8	1,1
C5	142	140	138	138	140	142	138	139,6	1,7

Tablica 6.3. Rezultati mjerenja drugog mjeritelja metodom vrtložnih struja

M2	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	40	40	40	40	40	40	40	40	0
A2	40	40	40	41	41	41	40	40,4	0,6
A3	37	38	37	38	37	38	37	37,4	0,6
A4	37	38	41	40	40	41	37	39,2	1,6
A5	41	41	41	41	41	41	41	41	0
B1	90	92	90	90	90	92	90	90,4	0,9
B2	88	86	88	86	88	88	86	87,2	1,1
B3	90	94	90	90	90	94	90	90,8	1,8
B4	92	98	92	92	92	98	92	93,2	2,7
B5	88	90	90	90	88	90	88	89,2	1,1
C1	172	174	172	172	172	174	172	172,4	0,9
C2	156	156	156	158	156	158	156	156,4	0,9
C3	150	150	152	150	152	152	150	150,8	1,1
C4	146	146	146	146	148	148	146	146,4	0,9
C5	140	142	140	140	140	142	140	140,4	0,9

Tablica 6.4. Rezultati mjerjenja trećeg mjeritelja metodom vrtložnih struja

M3	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	43	43	43	43	43	43	43	43	0
A2	43	44	44	44	44	44	43	43,8	0,5
A3	40	40	40	40	39	40	39	39,8	0,5
A4	43	43	43	42	43	43	42	42,8	0,5
A5	44	44	44	44	44	44	44	44	0
B1	88	88	88	88	88	88	88	88	0
B2	84	84	84	84	86	86	84	84,4	0,9
B3	88	88	88	88	88	88	88	88	0
B4	90	90	90	88	90	90	88	89,6	0,9
B5	86	86	86	86	88	88	86	86,4	0,9
C1	168	170	170	172	168	170	168	169,6	1,7
C2	154	154	152	154	154	154	152	153,6	0,9
C3	150	152	152	152	152	152	150	151,6	0,9
C4	142	140	142	142	142	142	140	141,6	0,9
C5	136	136	138	140	136	140	136	137,2	1,8

7. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA

Za analizu rezultata mjerena korišten je program Statgraphics plus 5.1.

Provedene su tri analize:

1. analiza ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) na svim dijelovima čelične ploče za magnetsku metodu (MT),
2. analiza ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) na svim dijelovima aluminijске ploče za metodu vrtložnih struja (EC),
3. usporedba metoda s obzirom na ponovljivost i obnovljivost razlika rezultata mjerena.

Za treću predviđenu analizu bilo je potrebno procijeniti stvarno postignutu debljinu prevlake, odnosno referentnu debljinu za sva tri dijela dviju ploča. Sa svih dijelova ploča izrezan je po jedan uzorak na kojemu je izmjerena debljina prevlake mikroskopom. Dobivene referentne vrijednosti debljina prevlaka prikazane su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Rezultati mjerena dobiveni mikroskopom

µm	Čelična ploča			Aluminijска ploča		
	dio A	dio B	dio C	dio A	dio B	dio C
1.	65,13	126,57	188,92	34,90	84,71	168,92
2.	57,27	138,91	194,14	41,17	88,44	153,18
3.	71,88	152,12	202,17	43,23	90,13	141,93
\bar{x}	64,76	139,2	195,07	39,77	87,99	154,67
s	7,3	12,7	6,67	4,34	2,38	13,56

7.1. R&R analiza za magnetsku metodu

R&R analiza provedena je u programu Statgraphics, a podaci su organizirani za tri mjeritelja (operators), pet točaka mjerjenja na pojedinim dijelovima ploča (parts) uz pet ponavljanja (trials). Analiza podataka prikazana je u tablici 7.2.

Tablica 7.2. Procijenjene standardne devijacije za magnetsku metodu

	μm	dio A	dio B	dio C
1.	s_r	3,45	3,77	2,97
2.	s_R	1,34	3,31	0,91
3.	$s_{R\&R}$	3,70	5,01	3,11
4.	s_{tm}	8,32	9,99	9,31
5.	$R_{\bar{x}}$	2,88	6,48	2,08
6.	$4 \cdot s_{R\&R}$	$\pm 7,41$	$\pm 10,03$	$\pm 6,21$
7.	T	$\pm 6,5$	$\pm 13,9$	$\pm 19,5$

gdje je:

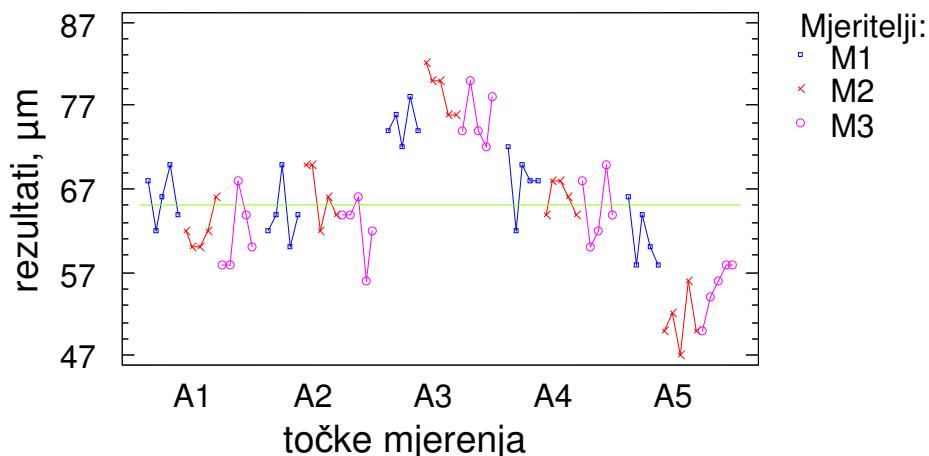
- s_r - procijenjena standardna devijacija ponovljivosti
- s_R - procijenjena standardna devijacija obnovljivosti
- $s_{R\&R}$ - kombinirana procijenjena standardna devijacija ponovljivosti i obnovljivosti
- s_{tm} - procijenjena standardna devijacija rezultata koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerjenja (parts)
- $R_{\bar{x}}$ - raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerjenja
- $4 \cdot s_{R\&R}$ - intervalna procjena preciznosti uz razinu povjerenja $P=95,45\%$ ($\pm 2 s_{R\&R}$)
- T - tolerancija zahtijevana normom [4]

Zahtjev norme [4] za točnost magnetske metode (tolerancija odstupanja, T) iznosi 10% stvarne (referentne) vrijednosti. Za potrebe ovog rada referentne vrijednosti debljina prevlaka utvrđene su mikroskopom i prikazane su u tablici 7.1. Uz razinu povjerenja od 95,45% odnosno interval koji iznosi četiri standardne devijacije ($\pm 2 \cdot s_{R\&R}$), procijenjena je preciznost mjerjenja svakog dijela ploče i prikazana u tablici 7.2.

Proizlazi da je preciznost mjerjenja na dijelu A čelične ploče izvan granica zahtijevane tolerancije i da primijenjena magnetska metoda mjerjenja na debljini prevlake od $65 \mu\text{m}$ ne zadovoljava zahtjeve norme. Preciznost na dijelovima B i C, čelične ploče, unutar je granica tolerancije i metoda za takve debljine ispunjava zahtjev norme.

Čelična ploča – dio A

Na slici 7.1 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (A1, A2, A3, A4 i A5) na dijelu A čelične ploče.

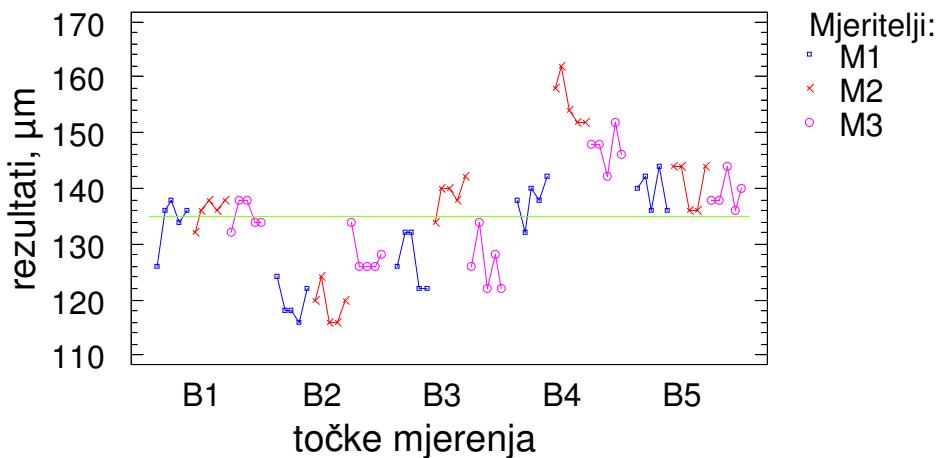


Slika 7.1. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na čeličnoj ploči – dio A

Može se uočiti da su u pojedinim točkama mjerjenja rezultati relativno ujednačeni, kako u pogledu ponovljivosti tako i u pogledu obnovljivosti. U točki mjerjenja A5 ponovljena mjerjenja mjeritelja M1 značajnije se razlikuju od rezultata druge dvojice mjeritelja. Promatrajući sveukupne rezultate mjerjenja u pojedinim točkama na slici 7.1 uočljivo je da rezultati u točkama A3 i A5 u većoj mjeri odstupaju od rezultata u ostale tri točke mjerjenja. Temeljem toga može se pretpostaviti da se u tim točkama (A3 i A5) debljine prevlake značajnije razlikuju od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama (A1, A2 i A4).

Čelična ploča – dio B

Na slici 7.2 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (B1, B2, B3, B4 i B5) na dijelu B čelične ploče.

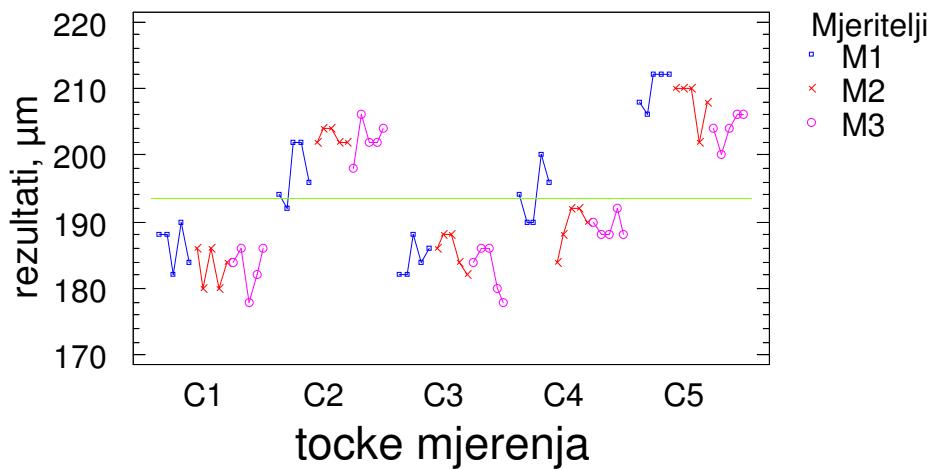


Slika 7.2. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na čeličnoj ploči – dio B

Na dijelu ploče B, za razliku od rezultata na dijelu ploče A, izraženije su razlike između mjeritelja u točkama mjerjenja B2, B3 i B4. Ponovljivost rezultata pojedinih mjeritelja je neznatno veća ($s_r=3,77 \mu\text{m}$) od rezultata na drugim dijelovima ploče. Obnovljivost rezultata na dijelu ploče B ($s_R=3,31 \mu\text{m}$) je značajno veća od obnovljivosti na dijelovima A i C, čelične ploče, što proizlazi i iz podataka prikazanih u tablici 7.2. Standardna devijacija obnovljivosti (s_R) je 2,5 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu A i 3,5 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu C. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerjenja na ovom dijelu ploče ($R_{\bar{x}}=6,48 \mu\text{m}$) značajno je veći od istog raspona na preostalim dijelovima ploče. Procijenjena standardna devijacija koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerjenja ($s_{tm}=9,99 \mu\text{m}$) neznatno je veća od iste standardne devijacije na dijelovima ploče A i C, što se također vidi iz tablice 7.2.

Čelična ploča – dio C

Na slici 7.3 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (C1, C2, C3, C4 i C5) na dijelu C čelične ploče.



Slika 7.3. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na čeličnoj ploči – dio C

Može se uočiti da su u svim točkama mjerjenja, zasebno promatrano, rezultati između mjeritelja ujednačeni u pogledu obnovljivosti, a u usporedbi s dijelovima A i B, na ovom su dijelu ploče mjeritelji ostvarili najbolju obnovljivost ($s_R=0,91 \mu\text{m}$). Ponovljivost rezultata za sve točke mjerjenja na dijelu C ($s_r=2,97 \mu\text{m}$) približno je jednaka ponovljivosti rezultata na dijelovima ploče A i B. U odnosu na vrijednosti standardnih devijacija ponovljivosti i obnovljivosti uzrok najveće varijabilnosti rezultata mjerjenja na dijelu C čelične ploče, kao i na dijelovima A i B iste ploče, proizlazi iz različitosti debljine premaza u točkama mjerjenja ($s_{tm}=9,31 \mu\text{m}$), što navodi na zaključak da cijela ploča nije ravnomjerno premazana i da pomoću primijenjene magnetske metode možemo utvrditi te različitosti.

7.2. R&R analiza za metodu vrtložnih struja

R&R analiza provedena je u programu Statgraphics, a podaci su organizirani za tri mjeritelja (operators), pet točaka mjerena na pojedinim dijelovima ploča (parts) uz pet ponavljanja (trials). Analiza podataka prikazana je u tablici 7.3.

Tablica 7.3. Procijenjene standardne devijacije za metodu vrtložnih struja

	μm	dio A	dio B	dio C
1.	s_r	0,51	0,86	1,08
2.	s_R	1,62	2,0	1,32
3.	$s_{R\&R}$	1,69	2,18	1,71
4.	s_{tm}	1,52	2,15	13,13
5.	$R_{\bar{x}}$	3,08	3,84	2,56
6.	$4 \cdot s_{R\&R}$	$\pm 3,38$	$\pm 4,36$	$\pm 3,42$
7.	T	$\pm 4,0$	$\pm 8,8$	$\pm 15,5$

gdje je:

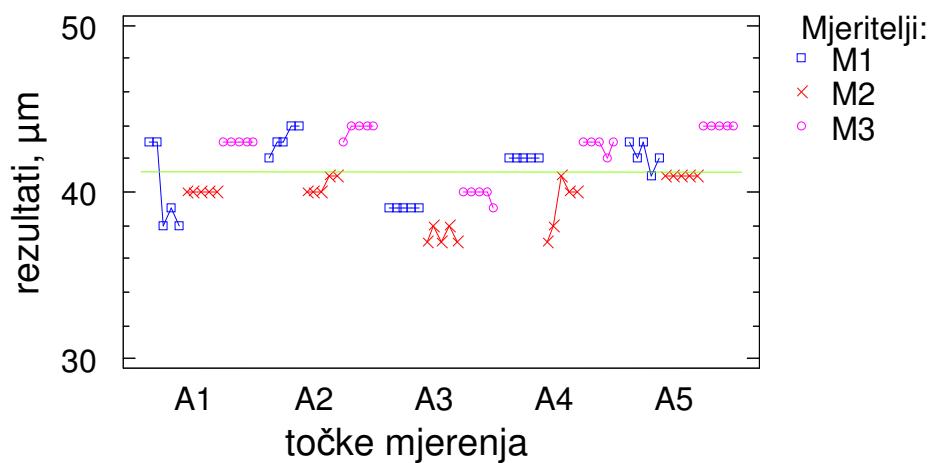
- s_r - procijenjena standardna devijacija ponovljivosti
- s_R - procijenjena standardna devijacija obnovljivosti
- $s_{R\&R}$ - kombinirana procijenjena standardna devijacija ponovljivosti i obnovljivosti
- s_{tm} - procijenjena standardna devijacija rezultata koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerena (parts)
- $R_{\bar{x}}$ - raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerena
- $4 \cdot s_{R\&R}$ - intervalna procjena preciznosti uz razinu povjerenja P=95,45% ($\pm 2 s_{R\&R}$)
- T - tolerancija zahtijevana normom [6]

Zahtjev norme [6] za točnost metode vrtložnih struja (tolerancija odstupanja, T) iznosi 10% stvarne (referentne) vrijednosti. Za potrebe ovog rada referentne vrijednosti debljina prevlaka utvrđene su mikroskopom i prikazane su u tablici 7.1. Uz razinu povjerenja od 95,45% odnosno interval koji iznosi četiri standardne devijacije ($\pm 2 s_{R\&R}$), procijenjena je preciznost mjerena svakog dijela ploče i prikazana u tablici 7.3.

Proizlazi da je preciznost na svim dijelovima aluminijске ploče unutar granica tolerancije (T) iz čega se može zaključiti da metoda ispunjava zahtjev norme.

Aluminijска ploča – dio A

Na slici 7.4 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (A1, A2, A3, A4 i A5) na dijelu A aluminijске ploče.

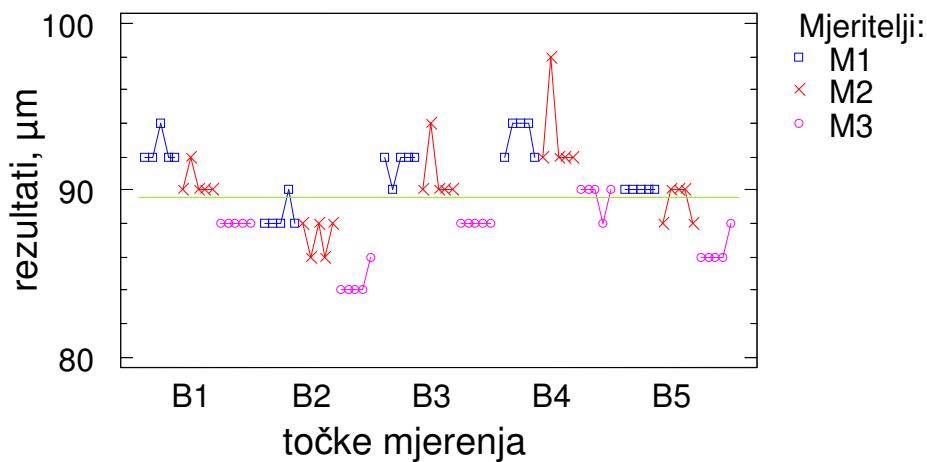


Slika 7.4. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na aluminijskoj ploči – dio A

Može se uočiti da su u svim točkama mjerena rezultati relativno ujednačeni, posebice u pogledu ponovljivosti ($s_r=0,51 \mu\text{m}$) uz nešto veći iznos standardne devijacije obnovljivosti ($s_R=1,62 \mu\text{m}$) koji je međutim istog reda veličine kao i kod magnetske metode. Na ovom dijelu aluminijске ploče rezultati se značajno ne rasipaju niti zbog različitosti debljina premaza u pojedinim točkama mjerena, što se vidi iz vrijednosti standardne devijacije točaka mjerena ($s_{tm}=1,52 \mu\text{m}$) koja je značajno manja od istih standardnih devijacija za sva tri dijela čelične ploče.

Aluminijska ploča – dio B

Na slici 7.5 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (B1, B2, B3, B4 i B5) na dijelu B aluminijske ploče.

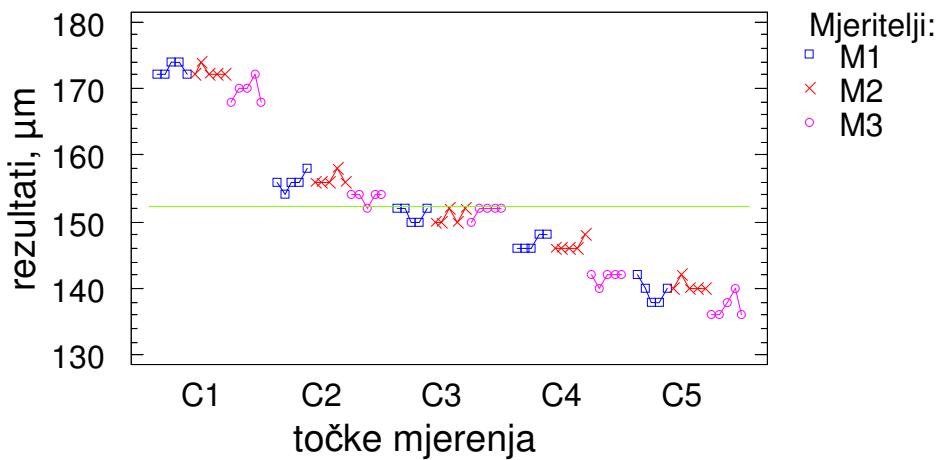


Slika 7.5. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na aluminijskoj ploči – dio B

Iz slike se vidi da se rezultati mjerjenja trećeg mjeritelja (M3) neznatno razlikuju od preostala dva mjeritelja u pojedinim točkama mjerjenja, a po iznosu su redovito manjih izmijerenih vrijednosti. To izravno utječe na obnovljivost rezultata ($s_R=2,0 \mu\text{m}$) koja je nešto veća od obnovljivosti rezultata na dijelovima A i C aluminijske ploče. Standardna devijacija ponovljivosti ($s_r=0,86 \mu\text{m}$) i standardna devijacija točaka mjerjenja ($s_{tm}=2,15 \mu\text{m}$) nešto su većih iznosa od istih standardnih devijacija na dijelu A, što se vidi iz tablice 7.3. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerjenja ($R_{\bar{x}}=3,84 \mu\text{m}$) na ovom dijelu ploče neznatno je veći od istog raspona na dijelovima A i C aluminijske ploče.

Aluminijska ploča – dio C

Na slici 7.6 prikazani su rezultati mjerjenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerjenja (C1, C2, C3, C4 i C5) na dijelu C aluminijske ploče.



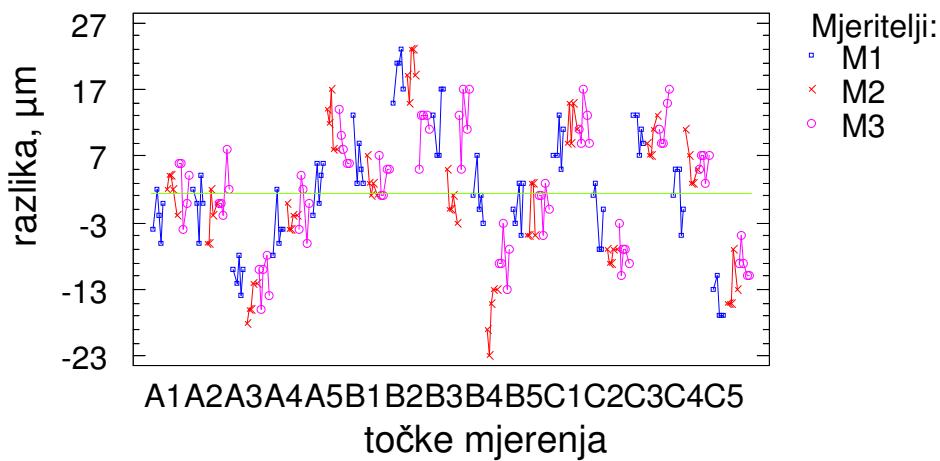
Slika 7.6. Grafički prikaz rezultata mjerjenja na aluminijskoj ploči – dio C

Može se uočiti da su u svim mjernim točkama rezultati ujednačeni kako u pogledu ponovljivosti tako i u pogledu obnovljivosti, osim u točki C4, gdje se niz mjerjenja mjeritelja M3 ponovo u neznatno većoj mjeri razlikuje od rezultata druge dvojice mjeritelja. Standardna devijacija ponovljivosti ($s_r=1,08 \mu\text{m}$) neznatno je veća od iste standardne devijacije na dijelovima A i B ove ploče, dok je standardna devijacija obnovljivosti ($s_R=1,32 \mu\text{m}$) najmanja upravo na ovom dijelu aluminijske ploče, što se može iščitati iz tablice 7.3. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerjenja ($R_{\bar{x}}=2,56 \mu\text{m}$) na ovom dijelu ploče neznatno je manji od istog raspona na preostalim dijelovima ploče. Na slici 7.6 također je vidljivo da se nizovi mjernih rezultata značajnije razlikuju između pojedinih točaka mjerjenja, posebno u točkama C1 i C5, što proizlazi i iz standardne devijacije točaka mjerjenja ($s_{tm}=13,13 \mu\text{m}$) na dijelu C, koja je 6 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu B i 8 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu A aluminijske ploče. Na temelju toga može se pretpostaviti da se u pojedinim točkama

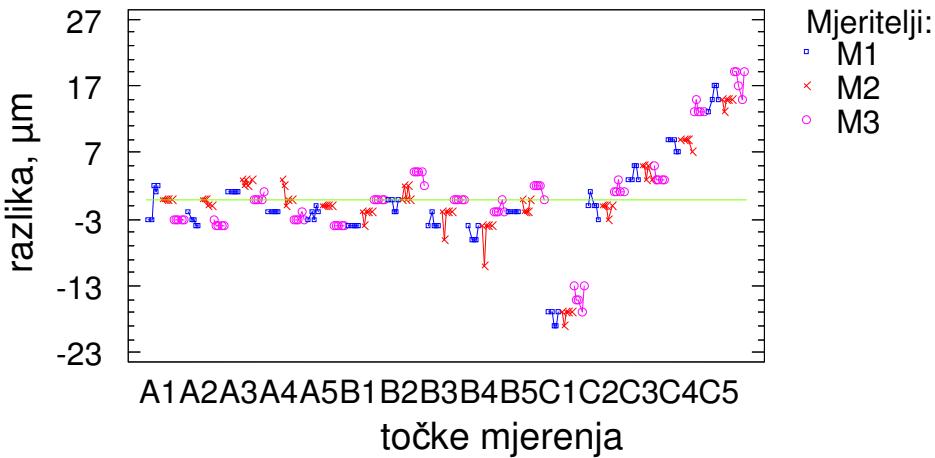
mjerenja (posebno u točkama C1 i C5), na dijelu C aluminijске ploče, debljine prevlake razlikuju od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama (C2, C3 i C4).

7.3. Usporedba rezultata mjerena

Za potrebe R&R analize i usporedbe dviju mjernih metoda, magnetske metode (MT) i metode vrtložnih struja (EC), izračunate su razlike za svaki pojedini rezultat mjerena u odnosu na referentne vrijednosti debljine prevlake izmjerene pomoću mikroskopa za svaki odgovarajući dio ploča. Na taj način dobivena su odstupanja rezultata mjerena magnetske metode i metode vrtložnih struja u odnosu na referentna mjerena provedena mikroskopom. Slika 7.7 prikazuje tako procijenjene razlike za mjerena magnetskom metodom, dok slika 7.8 prikazuje procijenjene razlike za mjerena metodom vrtložnih struja.



Slika 7.7. Procijenjene razlike za mjerena magnetskom metodom



Slika 7.8. Procijenjene razlike za mjerjenja metodom vrtložnih struja

Iz slika 7.7 i 7.8 može se zaključiti da su rezultati metode vrtložnih struja točniji i precizniji od rezultata dobivenih magnetskom metodom. Procijenjene razlike rezultata, dobivenih metodom vrtložnih struja, manje se rasipaju u odnosu na magnetsku metodu, što se vidi iz standardnih devijacija ponovljivosti (s_r) prikazanih u tablici 7.4.

Obzirom na uočljiviju izdvojenost mjernih nizova u točkama C1 i C5 te djelomično u točki C4, u odnosu na referentnu vrijednost (slika 7.8) potvrđuje se zaključak iznesen u poglavljju 7.2, a koji je iznesen na temelju analize rezultata za dio C aluminijске ploče: debljine prevlaka u točkama C1 i C5 razlikuju se od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama.

Tablica 7.4. Procijenjene standardne devijacije razlika rezultata mjerjenja

	μm	MT	EC
1.	s_r	3,39	0,80
2.	s_R	0,89	0,88
3.	$s_{R\&R}$	3,50	1,19
4.	S_{tm}	8,20	9,16

Standardna devijacija ponovljivosti procijenjenih razlika (s_r) 4 je puta veća za magnetsku metodu, u odnosu na metodu vrtložnih struja, dok su standardne devijacije obnovljivosti približno jednake.

Rasipanja promatranih razlika koja proizlaze iz različitosti debljina prevlaka u pojedinim točkama mjerjenja (s_{tm}) znatno je veća od standardne devijacije ponovljivosti i obnovljivosti ($s_{R&R}$) kod obje metode.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je usporedba dviju nerazornih metoda mjerjenja debljina prevlaka, magnetske metode i metode vrtložnih struja.

Temeljem prikaza utjecajnih čimbenika i principa metoda planirana su i provedena usporedbena mjerena na pripremljenim uzorcima. Mjerena metodom vrtložnih struja provedena su na aluminijskoj ploči, dok su mjerena magnetskom metodom provedena na čeličnoj ploči. U svrhu usporedne analize obiju metoda, procijenjene su referentne vrijednosti debljine prevlaka pojedinih uzoraka na osnovu mjerena poprečnih presjeka uzoraka pomoću mikroskopa.

Rezultati provedenih analiza, dobiveni pomoću programskog paketa Statgraphics plus 5.1, komentirani su obzirom na ponovljivost i obnovljivost, te obzirom na zahtjevanu preciznost mjernih metoda u relevantnim normama [4, 6].

Procijenjena preciznost rezultata dobivenih metodom vrtložnih struja pokazala se boljom i to prvenstveno zbog približno četiri puta manjeg iznosa ponovljivosti mjerena ($s_r=0,80 \mu\text{m}$) u odnosu na magnetsku metodu ($s_r=3,39 \mu\text{m}$), a kako je prikazano u tablici 7.4.

Dodatno je potrebno istaknuti da je za magnetsku metodu ponovljivost rezultata mjerena ($s_r=3,39 \mu\text{m}$) približno četiri puta veća od obnovljivosti rezultata mjerena tom metodom ($s_R=0,89 \mu\text{m}$) što je neuobičajeno.

Procijenjena preciznost rezultata mjerena magnetskom metodom na dijelu A čelične ploče (tablica 7.2) veća je od dopuštene tolerancije iz čega proizlazi da primjena ove metode na debljinama prevlaka reda veličine $65 \mu\text{m}$ nije u skladu sa zahtjevima norme [4].

U sveobuhvatnim rezultatima mjerena, doprinos rasipanja uslijed različitosti debljina prevlaka u pojedinim točkama mjerena pripremljenih dijelova ploča, a radi nesavršenosti tehnologije nanošenja prevlaka, nije značajno različit na pločama koje su korištene za mjerena magnetskom metodom ($s_{tm}=8,20 \mu\text{m}$) i metodom vrtložnih struja ($s_{tm}=9,16 \mu\text{m}$).

9. LITERATURA

1. Kliškić, M., Vrsalović, L.: *Tehnologija površinske zaštite*, Kemijsko - tehnočki fakultet u Splitu, Split, 2005
2. www.pfonline.com/articles/0206gf1.html
3. www.defelsko.com/technotes/coating_thickness_measurement.htm
4. HRN EN ISO 2178: 1999. – Nemagnetske prevlake na magnetskim podlogama – Mjerenje debljine prevlake – Magnetska metoda
5. D. Novosel: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
6. HRN EN ISO 2360: 2003. – Nevodljive prevlake na nemagnetskim električnim vodljivim metalnim podlogama – Mjerenje debljine prevlake – Metoda vrtložnih struja