

NEPORUŠNO TESTIRANJE PLANARNIH PARAMAGNETIKOV IN FEROMAGNETIKOV

Damijan Miljavec, Rajko Šušmelj, Konrad Lenasi

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: neporušno testiranje, vrtnični toki, vrtilno magnetno polje, magnetna sonda, MKE, FLUX-2D;

Izvleček: Delo obravnava problematiko neporušnega testiranja električno prevodnih plošč z metodo vrtničnih tokov. Metoda je osnovana na merjenju sprememb magnetnega polja induciranih vrtničnih tokov v testirani plošči. Fizikalno, metoda neporušnega testiranja temelji na uporabi vrtilnega magnetnega polja. Posledično, se zaradi tega polja inducirajo vrtnični toki v plošči in njihovo magnetno polje nad površino plošče vpliva na inducirane napetosti v iskalnih tuljavicah. Sprememba magnetnega polja vrtničnih tokov nastane, ko poškodba plošče, bodisi razpoka bodisi korozijska razjeda, spremeni pot vrtničnim tokom. Spremembo polja zaznamo s pomočjo iskalnih tuljav na površini plošče. Stanje preizkušane plošče tako ovrednotimo na način brezkontaktnega merjenja. Magnetne razmere pri testiranju z vrtničnimi toki smo analizirali s pomočjo metode končnih elementov (MKE), ki jo podpira programski paket FLUX-2D /1/. S pomočjo modela magnetne sonde smo preiskovali vpliv lege in dimenzij utora v testirani plošči na inducirane napetosti 3-osnega iskalnega navitja. Ovrednotili smo merilne rezultate v smislu sposobnosti zaznavanja zarez in določanja njihovih smeri dveh tipov iskalnih navitij: 3-osnega iskalnega navitja in izvedbe s petimi z-osnimi iskalnimi tuljavicami. Teoretične izsledke smo testirali na aluminijasti in litoželezni plošči z vrezanimi zarezami.

Nondestructive Testing of Planar Paramagnetics and Ferromagnetics

Key words: non-destructive testing, eddy currents, rotational magnetic field, magnetic probe, FEM, FLUX-2D

Abstract: The paper reports the principle of eddy current non-destructive testing of conducting plates. The flow paths of eddy currents induced in the testing plate are perturbed by cracks and defects, and the result is reflected in the magnetic field above the plate surface. The change of the magnetic flux density can be measured by search coil which is in vicinity with a specimen. The advantage of this method is that the cracks and defects can be evaluated without contact in a short time.

Magnetic field distribution in electrically conductive plates was analysed with two-dimensional finite element method (FLUX-2D). The influence of the position and the size of a slot on output signals of the three-axis search coil were investigated. The relationship between the ability to consistently detect slots on one hand, and the electromagnetic properties of the specimen, the exciting frequency and the lift-off between the magnetic probe and the sample under test on the other hand have been estimated. The numerical results reveal the fundamental behaviour of magnetic probe. The prototype of the magnetic probe which generates rotational magnetic field in the testing plate was built-up. The mechanism of slot detection was elucidated. The results of this analysis show that output signals of the three-axis search coil include a lot of effective information of the direction and the position of a slot. Furthermore, experimental work has been carried out: the effects of the machined slots on aluminium and steel plate have been measured by the probe. In order to obtain better detection results of a slot, a set of five z-axis search coils was also used in the magnetic probe. Experimental results have proved that measurement system is useful in slot detection and recognition of slot direction.

1 Uvod

Potreba po učinkovitem avtomatiziranem neporušnem testiranju ima za seboj močno ekonomsko ozadje. Avtomatizirana inšpekcijska oprema odpravlja dolgotrajne postopke vizualnih pregledov (nalogo odločanja seveda prepušča človeku) in nekajkrat prekaša njihovo učinkovitost odkrivanja poškodb. Posebej pomembno pa je, da lahko z instrumentalnimi metodami detektiramo in ovrednotimo skrite poškodbe. Sem sodijo: skrite razpoke, skrite korozijske razjede ali nezveznosti v kompozitnih materialih /2/. Poleg višjega odstotka odkritih poškodb omogočajo instrumentalne metode tudi enostaven način njihovega dokumentiranja. Z analizo zbranih podatkov testiranja serije enakih izdelkov oz. naprav lahko določimo njihove najpogostejše poškodbe. Podatke o tipičnih poškodbah določenega izdelka lahko uporabimo pri iskanju boljših konstrukcijskih rešitev in proizvodnih procesov s katerimi poskušamo izboljšati poškodbam najbolj izpostavljene dele.

Izbira senzorja, ki določa metodo neporušnega testiranja, je ključnega pomena glede na vrsto okolja v katerega bo postavljen, saj lahko okolje dramatično vpliva na njegovo delovanje. Za preizkušanje sestavov iz prevodnih materialov se v zadnjem času vedno bolj uveljavlja metoda vrtničnih tokov (ang. eddy current testing). Metoda je osnovana na merjenju sprememb magnetnega polja induciranih vrtničnih tokov v testiranem objektu. Prednosti te metode so, da so senzori vrtničnih tokov neobčutljivi na umazanijo, prah, vlago, olje ali druge dielektrične materiale v razpokah, ki jih želimo oceniti /3/. Tako so ti senzori primerni za delovanje tudi v okoljih z manj čistimi razmerami. Omogočajo tudi testiranje z veliko hitrostjo, zanesljivo delujejo v širokem temperaturnem razponu ter njihova izdelava je relativno poceni. Prednost je tudi njihova enostavna vključitev v računalniški merilni sistem. Širšo uporabnost metode testiranja na principu vrtničnih tokov med drugim omejuje zahteva po enakomerni nalegi senzorja na površino testiranca. Tako težje preizkušamo objekte z zakrivljeno,

hrapavo ali kako drugače slabo dostopno površino. Nezanisljiva in tudi ekonomsko neupravičena je preiskava poškodovanosti predmeta zaradi splošne utrujenosti materiala.

2 Magnetna sonda

Pri neporušnem testiranju z vrtilnimi toki skušamo v testiranem objektu doseči čim večjo gostoto induciranih tokov. V ta namen sta vzbujalna para navitij nameščena na feritnih jedrih, ki vzbujalno magnetno polje ojačita in ga usmerita v ploščo (slika 1). Med seboj pravokotno postavljena vzbujalna para navitij napajamo z za 90° fazno premaknjenima izmeničnima tokoma. V območju plošče pod sredino magnetne sonde se ustvari vrtilno magnetno polje. Le-to generira vrtilne toke, ki se z njim sinhrono vrtijo. Poškodba plošče spremeni pot vrtilnim tokom, kar se v zunanosti plošče odraža kot sprememba magnetnega polja vrtilnih tokov. To spremembo lahko zaznamo preko spremembe induciranih napetosti iskalnega navitja nad površino plošče. Na spodnji levi strani slike 1 je narisano 3-osno iskalno navitje: iskalne tuljavice so orientirane v smereh koordinatnih osi, tako da posamezna tuljavica zaznava le komponento magnetnega polja v smeri istoležne osi. Druga različica uporabljenega iskalnega navitja je prikazana na spodnji desni strani slike 1. To je set 5-ih z-osnih iskalnih navitij, ki detektirajo spremembe magnetnega pretoka pravokotno na površino plošče. Z analizo induciranih napetosti iskalnih navitij moremo določiti prisotnost in usmeritev razpoke v plošči.

Uporaba vrtilnega magnetnega polja je ključnega pomena za učinkovitejšo odkrivanje poškodb /4/.

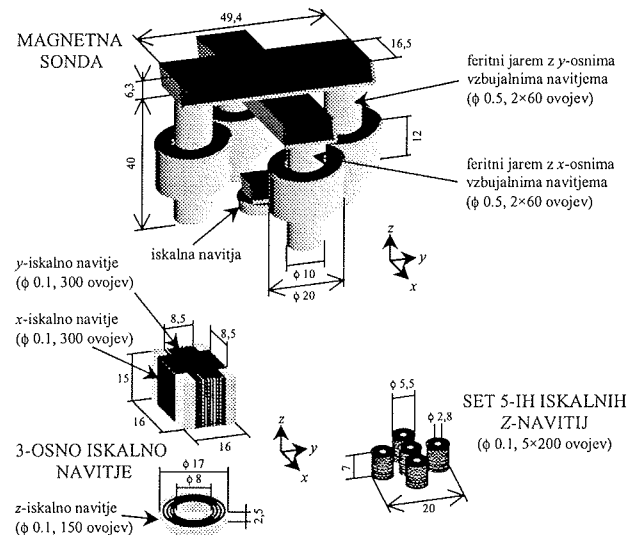
Vrtilne toke v preizkušani plošči lahko vzbudimo tudi z izmeničnim poljem. Vendar pa je detekcija napak v tem primeru slabša. Največja sprememba magnetnega polja in s tem tudi induciranih napetosti iskalnega navitja namreč nastane takrat, ko je smer razpoke pravokotna na smer vrtilnih tokov. Razpoka v takšnem položaju ovira vrtilne toke na območju cele svoje dolžine. Obratno pa velja za razpoke, ki so vzporedne s tokovnicami. Tako orientirane razpoke v mnogo manjši meri vplivajo na magnetno polje na območju iskalnih navitij. V primerjavi z izmeničnim poljem požene vrtilno magnetno polje vrtilne toke v vseh smereh proti razpoki. Tako zagotovo pride do stanja, ko se prisotnost razpoke najmočnejše odrazi.

Učinkovitost zaznavanja napak je odvisna tudi od frekvence vzbujalnega magnetnega polja. Večji odziv induciranih napetosti iskalnih navitij na poškodbo, ki leži na isti strani plošče kot magnetna sonda, dosežemo z višjo frekvenco vzbujanja. Pri tem se v plošči inducira večja gostota vrtilnih tokov in posledično naraste tudi gostota magnetnega polja induciranih tokov na območju iskalnih navitij. Pri odkrivanju razpok na nasprotni strani plošče pa moramo biti pozorni na učinek izrivanja toka. Stopnja kožnega učinka je pogojena z vdorno globino /5/. Globina prodiranja δ je poleg snovnih konstant testiranca, to je specifične električne

prevodnosti γ in permeabilnosti μ , odvisna še od električne krožne frekvence vzbujalnih tokov ω :

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\gamma} \quad (1)$$

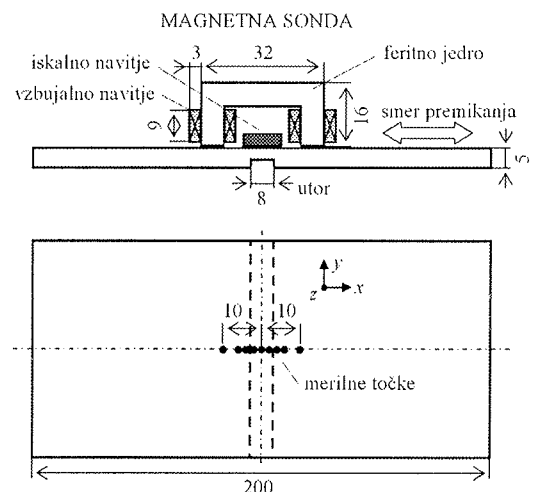
Zaradi opisanega učinka moramo uporabiti dovolj nizko frekvenco, da se tudi na nasprotni strani plošče inducira zadostna gostota vrtilnih tokov. Zaradi manjše gostote induciranih tokov je razpoke na drugi strani plošče mnogo težje detektirati.



Slika 1: Konfiguracija magnetne sonde in iskalnih navitij

3 Dvodimenzionalna numerična analiza

S pomočjo dvodimenzionalne metode končnih elementov /6/ smo analizirali vpliv lege in velikosti utora (simulacija razpoke) na inducirano napetost v x, y in z tuljavici 3-osnega iskalnega navitja. Na sliki 2 je prikazana postavitev



Slika 2: Postavitev magnetne sonde, dimenzije testirane plošče in lege merilnih točk.

magnetne sonde, dimenzije testirane plošče in položaji merilnih točk (sondo smo premikali prečno na razpoko, to je od -10 mm do 10 mm glede na njeno središče).

Numerično analizo smo opravili pri sledečih razmerah: gostota vzbujačnega toka $2,2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, relativna permeabilnost feritnega jedra 1000, preizkušali pa smo 5 mm debelo aluminijasto ploščo z relativno permeabilnostjo $\mu_{rAl} = 1$ in specifično električno prevodnostjo $\gamma_{Al} = 35,4 \times 10^6 \text{ S/m}$ ter enako debelo litoželezno ploščo relativne permeabilnosti $\mu_{rFe} = 1000$ in specifične električne prevodnosti $\gamma_{Fe} = 8 \times 10^6 \text{ S/m}$. Rezultati analize, ki so predstavljeni na slikah 3, 4 in 5, veljajo za primer ko je utor širok 8 mm in globok 2 mm. S takim utorom smo simulirali stanje vrtilnega polja v plošči, ko inducirani vrtilni toki tečejo prečno na utor. V takem primeru dobimo največji odziv induciranih napetosti v iskalnih tuljavah na prisotnost utora. Frekvenco napajanja smo prilagodili tako, da je globina prodiranja magnetnega polja (1) še presegala debelino plošče. Pri analizi aluminijaste plošče to pomeni napajanje frekvence 250 Hz, pri litoželezni plošči pa 1 Hz. Na sliki 3 so prikazani poteki induciranih napetosti v x- in z-iskalnem navitju pri različnih globinah utora na nasprotni (spodnji) strani aluminijaste plošče. Pri gibanju magnetne sonde čez utor doseže napetost U_{ix} največjo spremembo takrat, ko sonda leži nad sredino utora. Takrat je zaradi prisotnosti razpoke vpliv zmanjšane polja vrtilnih tokov na x-iskalno navitje največji. Pri inducirani napetosti z-osnega iskalnega navitja pa se središčni položaj sonde glede na utor odraža ravno nasprotno. Inducirana napetost U_{iz} je v tem primeru enaka nič, kot v primeru plošče brez utora. V tej, simetrični legi z-tuljavice na razpoko se namreč izniči magnetni vpliv vrtilnih tokov (magnetni pretok polja vrtilnih tokov skozi z-navitje je enak nič). Inducirana napetost U_{iz} pa je odvisna le od magnetnega polja vrtilnih tokov. Vzbujačno magnetno polje nanjo neposredno ne vpliva. Temu je tako, ker je z-osno navitje postavljeno na sredini med poloma jarma in je njena normala pravokotna na gostotnice vzbujačnega magnetnega polja.

Na sliki 4 so predstavljene napetosti iskalnih navitij pri analizi litoželezne plošče z utorom na spodnji strani.

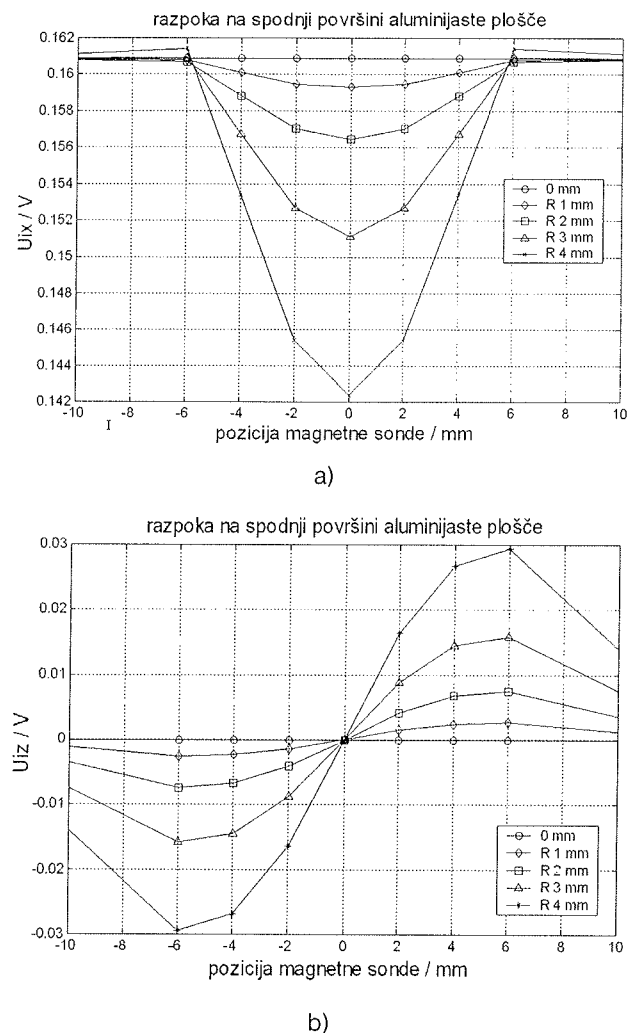
Zanimiva je primerjava potekov napetosti U_{ix} v primeru litoželezne in aluminijaste plošče (sliki 3.a in 4.a). Pri prehodu magnetne sonde čez utor v litoželezni plošči napetost U_{ix} naraste.

Porast napetosti je posledica stresanega vzbujačnega magnetnega polja čez utor. Pri plošči brez utora se magnetno polje v celoti zaključuje po plošči in ne pride do pojava stresanja polja. Zaradi tega je gostota magnetnega polja nad površino plošče na območju iskalnih navitij manjša kot v primeru plošče z utorom, posledično pa je manjša tudi inducirana napetost. Pri aluminijasti plošči pa je stresanje polja enako prisotno v primeru brez ali z utorom. Aluminij je namreč za magnetno polje enako sprejemljiv medij kot zrak. Ob prisotnosti utora se gostota magnetnega polja nad površino aluminijaste plošče zmanjša zaradi oslabiljenega polja vrtilnih tokov in inducirana napetost U_{ix} upade.

Odvisnost inducirane napetosti z-iskalnega navitja od lege utora se pri litoželezni plošči kaže na podoben način kot pri preizkušanju aluminijaste plošče. Napetost U_{iz} zavzame najmanjšo vrednost v položaju sonde nad sredino utora (slika 4.b).

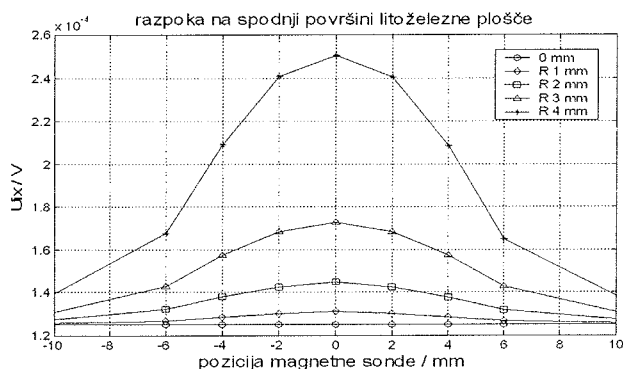
3 Rezultati meritev

Merilni sistem je sestavljen iz treh glavnih sklopov: napajalne enote, magnetnega sensorja in sistema za zajem in obdelavo merilnih signalov. Omenjeni sklopi so podrobneje predstavljeni na sliki 5.

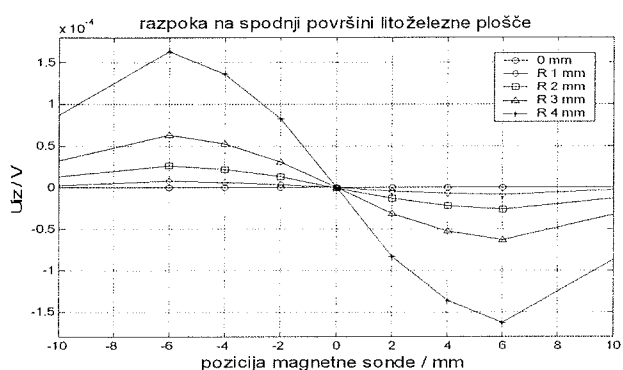


Slika 3: Inducirana napetost v x- in z-iskalnem navitju glede na lego sonde in utora (razpoke) v aluminijasti plošči.

Sposobnost odkrivanja poškodb plošče s 3-osnim iskalnim navitjem in s setom 5-ih z-osnih iskalnih navitij smo preizkusili na različnih umetno "poškodovanih" vzorcih plošč in pri različnih merilnih pogojih. V 2 mm debelo aluminijasto ploščo velikosti 200×280 mm, relativne permeabilnosti $\mu_{rAl} = 1$ in specifične električne prevodnosti $\gamma_{Al} = 35 \times 10^6 \text{ S/m}$, smo vrezali tri utora dolžine 100 mm in širine 4 mm. Utori globine 0.7 mm, 0.8 mm in 0.9 mm so enakomerno razporejeni na površini plošče. V litoželezno ploščo rela-

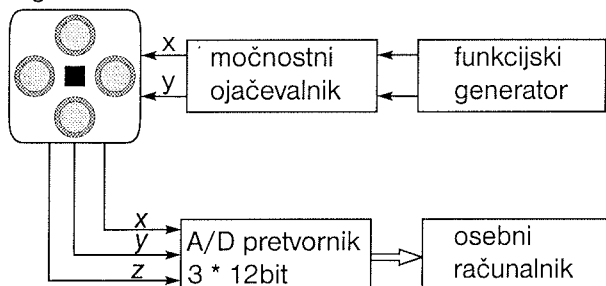


Slika 4a: Poteki inducirane napetosti v x-iskalnem navitju v odvisnosti od relativnega položaja magnetne sonde in utora (razpoke) v primeru litoželezne plošče.



Slika 4b: Poteki inducirane napetosti v z-iskalnem navitju v odvisnosti od relativnega položaja magnetne sonde in utora (razpoke) v primeru litoželezne plošče.

magnetni senzor



Slika 5: Merilni sistem.

itivne permeabilnosti $\mu_{rFe} \approx 1000$ in specifične električne prevodnosti $\gamma_{Fe} = 35 \times 10^6$ S/m ter dimenzij $200 \times 420 \times 3.15$ mm pa smo vdelali pet zarez dolžine 110 mm ter širine in globine: 3.3×2 mm, 3.3×1.3 mm, 2.8×0.75 mm, 2.8×0.5 mm, 1.8×0.2 mm. Občutljivost 3-osnega navitja smo tudi preverili s prehodom čez 0.1 mm široko režo med dvema 2.35 mm debelima ploščama iz Al-Fe litine.

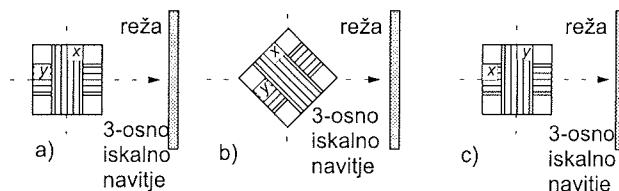
Za doseganje dobrih merilnih rezultatov je najbolj odločujoča frekvenca napajanja vzbujalnih tuljav. Najboljše rezultate pri odkrivanju utorov na isti strani aluminijaste plošče, kot je bila postavljena magnetna sonda, smo dosegli z napajanjem frekvenca 3 kHz. Utoře na spodnji strani plošče pa so se najjasneje "pokazale" pri frekvenci 1 kHz. Pri litoželezni plošči pa smo dobili dobre rezultate pri frekvenci 250 Hz, seveda pri testiranju plošče z zarezami na zgornji površini.

4.1. Rezultati testiranja s 3-osnim iskalnim navitjem

Prednost izvedbe 3-osnega iskalnega navitja je v tem, da lahko enostavno določimo smer reže (razpoke) iz razmerja signalov x- in y-iskalnega navitja. Na sliki 6 so prikazani trije možni prehodi x- in y-navitja čez režo:

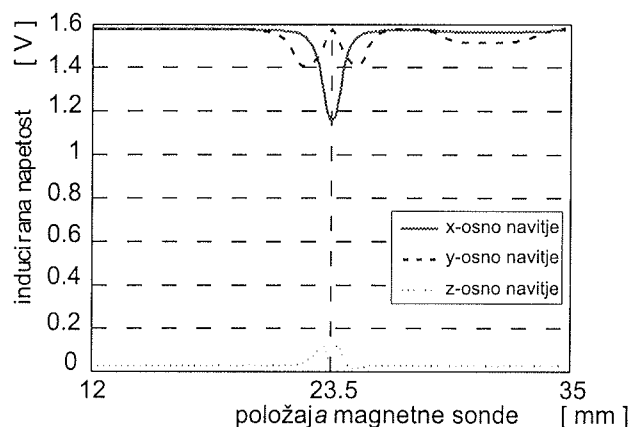
- y-iskalno navitje pravokotno prečka režo, x-navitje se giblje vzporedno proti njej,
- obe navitji preideta režo pod kotom 45° ,
- položaj navitij je ravno obraten kot v primeru a).

Glede na prej omenjene prehode iskalnih navitij čez režo dobimo tri značilne potoke induciranih napetosti (slika 7).

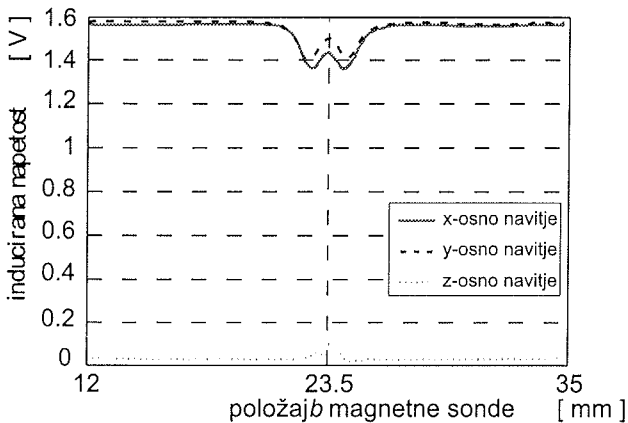


Slika 6: Prehodi x- in y-iskalnega navitja čez režo med dvema ploščama iz Al-Fe litine.

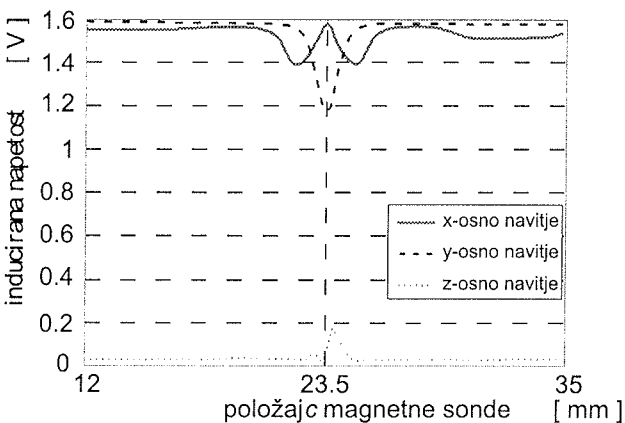
Inducirana napetost iskalnega navitja, ki se giblje pravokotno na smer reže, doseže najnižjo vrednost v legi navitja nad sredino reže. To velja za napetost x-navitja na sliki 7.a in napetost y-navitja na sliki 7.c. V tem položaju je merodajna komponenta gostote magnetnega polja vrtničnih tokov



Slika 7a: Inducirane napetosti 3-osnega iskalnega navitja v položaju a (slika 6) glede na prehod čez režo med ploščama iz Al-Fe litine.



Slika 7b: Inducirane napetosti 3-osnega iskalnega navitja v položaju b (slika 6) glede na prehod čez režo med ploščama iz Al-Fe litine.



Slika 7c: Inducirane napetosti 3-osnega iskalnega navitja v položaju c (slika 6) glede na prehod čez režo med ploščama iz Al-Fe litine.

najmanjša zaradi netekočih vrtničnih tokov na območju reže. V primeru diagonalnega prehoda iskalnih navitij čez režo pa sta poteka induciranih napetosti x- in y-navitja enaka, slika 7.b. Velika razlika napetostnih nivojev signalov x- in y-navitja na eni in z-iskalnega navitja na drugi strani je posledica narave teh navitij. Večji del magnetnega pretoka, ki preide skozi x- in y-navitje, je stresani magnetni pretok med vzbujalnimi navitji. Od tod tako velika inducirana napetost na območju plošče brez reže. Simetrična lega z-tuljavice med jarmoma sonde pa vpliv vzbujalnega polja izniči, saj je normala na ravnino z-tuljavice pravokotna na gostotnice vzbujalnega magnetnega polja.

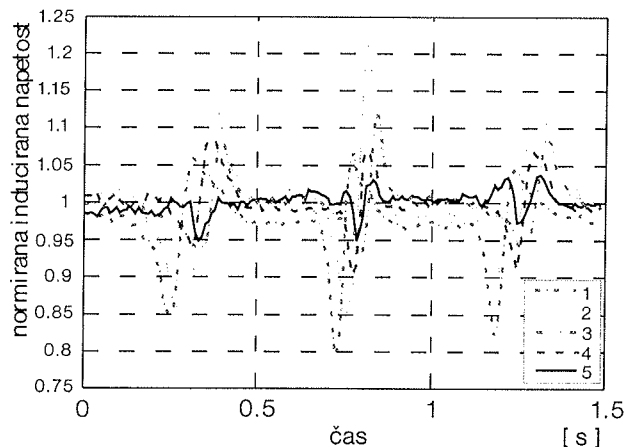
4.2. Rezultati testiranja s setom 5-ih z-osnih iskalnih navitij

Izvedba iskalnega navitja s petimi z-osnimi tuljavicami (slika 1) zelo dobro izpolnjuje prvenstveno funkcijo, to je detekcijo poškodb testirane plošče. Pri najustreznejši frekvenci napajanja je sprememba amplitude induciranih napetosti iskalnih navitij ob prehodu sonde čez utor tako izrazita, da lahko nedvoumno razpoznamo prisotnost utorov na

zgornji in spodnji površini aluminijaste plošče. Iskalno navitje prav tako zanesljivo "odkrije" prve štiri najgloblje zarezne na zgornji površini litoželezne plošče. Najmanjšo zarezno širine 1,8 mm in globine 0,2 mm pa zazna v 40% poizkusov.

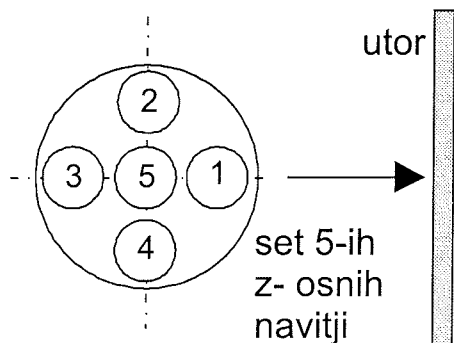
Pri odkrivanju smeri utorov (zarez) kot drugotni funkciji magnetnega senzorja s petimi z-osnimi iskalnimi navitji smo zabeležili slabše rezultate. Pravilno informacijo o smeri zarez smo dobili le v približno 20% primerov testiranja aluminijaste plošče. Pri preizkušanju litoželezne plošče pa je ta odstotek še manjši.

Krajevna razmeščenost iskalnih navitij nam omogoča, da lahko iz časovnega poteka signalov določimo smer utora ali zarez. V ta namen pri vsakem signalu določimo trenutek nastopa spremembe napetosti, ki označuje prehod iskalnega navitja čez utor ali zarez. Trenutek prehoda smo določili s pomočjo ekstremov motnje. Tak način določanja trenutka prehoda iskalnega navitja čez razpoko je seveda uspešen le v primeru dobro izražene spremembe inducirane napetosti. Signale oštevilčenih iskalnih navitij nato razporedimo glede na čas nastanka motnje in s tem dobimo informacijo, v kakšnem vrstnem redu so navitja prešla zarez. Primer razvrstitve signalov je prikazana na legendi slike 8. Signali so bili "posneti" pri testiranju aluminijaste plošče z utori na zgornji površini pri napajalnem toku 0.14 A, frekvence 3 kHz. Signale smo normirali z njihovimi povprečnimi vrednostmi z namenom, da lahko lažje preverimo pravilnost razporeditve. Na podlagi razporeditve signalov ugotovimo orientiranost razpoke (slika 9).

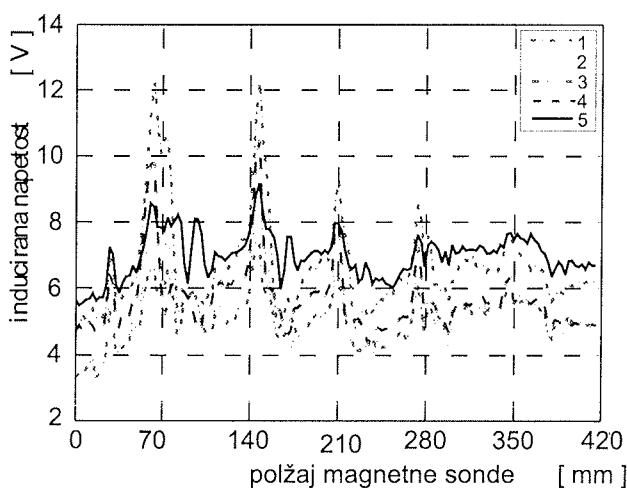


Slika 8: Razporeditev signalov glede na vrstni red prehoda iskalnih navitij čez utor v aluminijasti plošči.

Na sliki 10 so prikazani še poteki induciranih napetosti pri prehodu magnetne sonde čez zarezne na zgornji površini litoželezne plošče. Inducirane napetosti smo posneli pri vzbujanju s tokovi 0.54 A, frekvence 250 Hz, ter jih zgladili z računanjem povprečnih vrednosti efektivne napetosti s korakom dveh period. Zaradi prevelikega vpliva stresanih magnetnih polj v okolici zarez nismo mogli določiti orientiranost le-teh glede na iskalna navitja. Medtem, ko so pris-



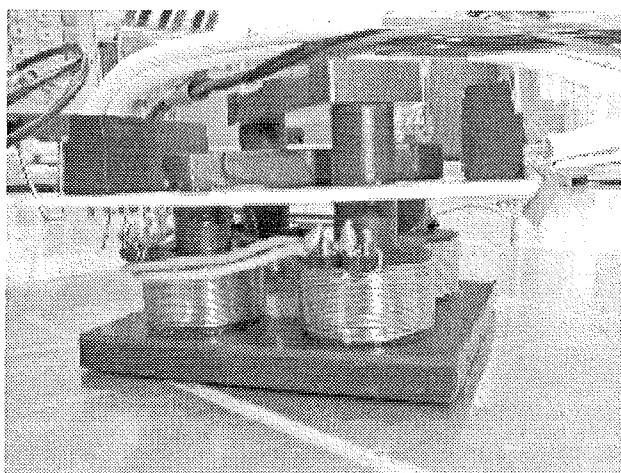
Slika 9: Konfiguracija iskalnih navitij pri prehodu sonde čez razpoko.



Slika 10: Inducirane napetosti seta 5-ih z-iskalnih navitij pri testiranju litoželezne plošče z zarezami na zgornji površini.

otnost in velikost zarez zelo izražena na obliki induciranih napetosti (slika 10).

Na sliki 11 si lahko ogledamo izdelano magnetno sondo.



Slika 11: Izdelana magnetna sonda.

5 Zaključek

S pomočjo metode končnih elementov (modeliranje s pomočjo programskega paketa FLUX-2D) smo analizirali magnetna dogajanja v magnetni sondi. Pri tem smo osrednjo pozornost namenili odzivu induciranih napetosti iskalnih navitij glede na lego in dimenzije utora testirane plošče. Rezultate teoretične analize smo zaokrožili z merilnimi rezultati izdelane magnetne sonde. Analizirali smo geometrijo vzbujalnega dela magnetnega senzorja. Vrtilno magnetno polje se je pokazalo za zelo učinkovito pri iskanju napak preiskovanca, saj lahko le z enoosnim premikom senzorja zaznamo prisotnost vseh možnih leg napak. Definirali smo odločujoči parameter za zagotavljanje kvalitetnih meritev, to je vrednost frekvence vzbujalnih tokov. Primerjava rezultatov meritev s 3-osnim iskalnim navitjem in setom 5-ih z-osnih iskalnih navitij je pokazala prednosti in slabosti posameznega merilnega sistema. Delo predstavlja tudi osnovo za nadaljnji razvoj magnetne sonde oz. merilnega sistema. Odprava pomanjkljivosti, ki so se pokazale pri praktičnem preizkušanju, pa zahteva celovitejši pristop k reševanju problematike metode testiranja z vrtilnimi toki. Predvsem z namenom, da postane ta metoda zanesljivejša in učinkovitejša ter uporabniku prijaznejše "orodje" za vrednotenje stanja preizkušane objekta.

6 Literatura

- /1/ Flux 2D, *User manual*, Cedrat, France, 2002
- /2/ D. Miljavec, B. Šuštaršič, T. Željko, K. Lenasi, *Magnetne lastnosti mehkomagnetnih kompozitnih materialov*, Elektrotehnični vestnik 70(3): 109-114, 2003 Ljubljana, Slovenija
- /3/ G.Y. Tian, Z.X. Zhao, R.W. Baines, *The research of inhomogeneity in eddy current sensors*, Sensors and Actuators A 69, pp 148-151, 1998.
- /4/ H. Hoshikawa and K. Koyama, *A New Eddy Current Probe Using Uniform Rotating Eddy Currents*, Materials Evaluation, pp 85-89, January 1998.
- /5/ P. Kokelj, *Elektromagnetne strukture*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2000.
- /6/ D. Maga, R. Hartansky, *Numerické riešenia elektromechanických uloh*, Trenčianska univerzita, Ludoprint Trenčín, 2001, ISBN 80-88914-29-9

doc. dr. Damijan Miljavec,
e-mail: miljavec@fe.uni-lj.si

Rajko Šušmelj, univ. dipl. inž. el.

red. prof. Konrad Lenasi
e-mail: Konrad.Lenasi@fe.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, 1000 Ljubljana
Tel. (01) 476 82 81