

# Ispitivanje CFRP kompozitnih struktura metodom vrtložnih struja

---

**Miroslav, Sven**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*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:235:443015>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

Sven Miroslav

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:  
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Sven Miroslav

Zagreb, 2010.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **SVEN MIROSLAV**

Mat. br.: 0035163626

Naslov: **ISPITIVANJE CFRP KOMPOZITNIH STRUKTURA METODOM  
VRTLOŽNIH STRUJA**

Opis zadatka:

U prvom dijelu rada potrebno je dati prikaz principa rada metode ispitivanja vrtložnim strujama (EC) s osvrtom mogućnosti primjene na CFRP kompozitnim strukturama. Također dati pregled zastupljenosti CFRP kompozitnih struktura u zrakoplovnim konstrukcijama i eventualne konvencionalne primjene ovakvih ispitivanja u redovitom održavanju zrakoplovnih konstrukcija.

Sistematski prikazati postupke i principe analize elektromagnetskih odziva u korelaciji s karakterističnim značajkama ili nepravilnostima u ispitivanim strukturama. Istaknuti specifične ispitne parametre za ispitivanje CFRP kompozitnih struktura u odnosu na konvencionalna EC ispitivanja metalnih materijala.

Po mogućnosti, na uzorku od CFRP kompozitnog materijala snimiti karakteristične odzive vrtložnih struja i prikazati dobivene rezultate s odgovarajućim obrazloženjima i komentarima.

Zadatak zadan:

11. prosinca 2009.

Zadatak zadao:

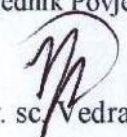
  
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Referada za diplomske i završne ispite

Rok predaje rada:

Prosinac 2010.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Vedran Žanić

Obrazac DS - 3Z/PDS - 3Z

## Sažetak

U radu je prezentirana primjena metode vrtložnih struja (EC) u ispitivanju CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) struktura. Prikazani su postupci analize ispitnih parametara u karakterizaciji CFRP struktura, određivanju orijentacije ugljičnih vlakana unutar materijala, detektiranju lokalnih nepravilnosti u strukturi materijala, procjeni starosti materijala i detekciji delaminacije unutar CFRP kompozita.

Također je prezentirana i SQUID tehnologija bazirana na supervodičima koja omogućava detektiranje oštećenja uslijed udara niskih energija. Opisan je princip rada EC metode te njena primjena u redovitom održavanju metalnih zrakoplovnih konstrukcija.

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Općenito o metodi vrtložnih struja</b>	<b>2</b>
2.1	Princip EC metode . . . . .	2
2.2	Oprema za EC ispitivanje . . . . .	4
2.2.1	Konfiguracija sonde . . . . .	4
2.2.2	Način rada sonde . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Primjena EC metode</b>	<b>7</b>
3.1	Primjena EC metode u održavanju zrakoplova . . . . .	7
3.1.1	Detektiranje pukotina u aluminijskim legurama . . . . .	8
3.1.2	Ispitivanje provrta od zakovica . . . . .	9
3.1.3	Detektiranje ispodpovršinske korozije . . . . .	9
3.1.4	Ispitivanje površine pomoću višezavojničke sonde . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Ispitivanje CFRP materijala EC metodom</b>	<b>13</b>
4.1	Zastupljenost CFRP kompozitnih struktura u zrakoplovnim konstrukcijama . . . . .	13
4.2	Karakterizacija CFRP materijala EC metodom . . . . .	14
4.2.1	Oprema za karakterizaciju . . . . .	16
4.2.2	Određivanje orijentacije vlakana . . . . .	18
4.2.3	Lokalne nepravilnosti . . . . .	18
4.2.4	Procjena starosti CFRP materijala . . . . .	21
4.3	Detekcija delaminacije EC metodom . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Ispitivanje CFRP materijala SQUID tehnologijom</b>	<b>24</b>
5.1	Detekcija oštećenja uslijed udara . . . . .	24
5.1.1	Oprema i materijal . . . . .	25
5.1.2	Rezultati . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Zaključak</b>	<b>30</b>

## Popis slika

1	Slabljenje vrtložnih struja uslijed oštećenja materijala . . . . .	2
2	Oprema za EC ispitivanje . . . . .	4
3	Površinske sonde . . . . .	5
4	Split D sonda . . . . .	6
5	EC uređaj SD-PC-12 . . . . .	8
6	Signal lift-off razmaka i oštećenja . . . . .	8
7	Odziv oštećenja u provrtu od zakovice . . . . .	9
8	Referentni uzorak . . . . .	10
9	Odziv pri frekvenciji 5 kHz . . . . .	10
10	Odziv pri frekvenciji 2 kHz . . . . .	10
11	Spoj odziva dvaju frekvencija . . . . .	11
12	Odziv ispodpovršinske korozije . . . . .	11
13	Odziv dobiven višezavojničkom sondom . . . . .	12
14	Oblici umjetno napravljenih oštećenja . . . . .	12
15	Materijali korišteni u Boeing 787 . . . . .	13
16	Model relacije između distribucije struje i magnetskog polja . . . . .	15
17	Procjena raspodjele vrtložnih struja u unidirekcijskom CFRP uzorku . . . . .	15
18	Magnetsko polje u multidirekcijskom CFRP uzorku . . . . .	16
19	EC sonde za karakterizaciju CFRP-a . . . . .	17
20	Sustav za mjerenje . . . . .	17
21	Rezultati dobiveni rotirajućom sondom . . . . .	18
22	Rezultati dobiveni statičkom sondom . . . . .	18
23	Detekcija sloja s različito orijentiranim vlaknima . . . . .	19
24	EC prikaz CFRP-a sa stepeničastom promjenom orijentacije vlakana . . . . .	20
25	EC prikaz područja s većom količinom polimerne matrice . . . . .	20
26	EC signali dobiveni rotirajućom sondom prije toplinskih cik- lusa, nakon 10 i nakon 200 toplinskih ciklusa . . . . .	21
27	Mikrostruktura mjehurića zraka . . . . .	22
28	EC signal . . . . .	22
29	a) raspored blokova u ispitivanim uzorcima, b) orijentacija vlakana unutar blokova . . . . .	25
30	Jakost magnetskog polja i faza . . . . .	26
31	Pad faze u ovisnosti o energijama udara i frekvencije struje . . . . .	27
32	Prikaz faze za oštećeni i neoštećeni uzorak . . . . .	28
33	Odzivi uzeti iz slike 32 . . . . .	29
34	Prikaz gustoće vrtložnih struja . . . . .	29

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$d$	standardna dubina penetracije	mm
$f$	frekvencija struje	Hz
$\mu$	magnetska permeabilnost	Vs/Am
$\sigma$	električna vodljivost	A/V
$T_C$	kritična temperatura supervodiča	K



## Izjava

Izjavlujem da sam ovaj rad izradio samostalno korištenjem stečenih znanja, vještina i potrebne literature pod voditeljstvom prof. dr. sc. Damira Markučića.

---

# 1 Uvod

CFRP materijal (Carbon Fiber Reinforced Polymer) je jedan od najzastupljenijih materijala koji se danas koriste u proizvodnji zrakoplova. Razvojem tehnologije izrade njegov će se udio u zrakoplovstvu sve više povećavati te je od velike važnosti pronaći adekvatne metode za ispitivanje CFRP konstrukcija u redovnom održavanju zrakoplova.

Jedna od tih metoda prezentirana je u ovom radu. Riječ je o nerazornoj metodi ispitivanja vrtložnim strujama. U prvom dijelu rada prezentiran je općeniti princip metode vrtložnih struja i oprema koja se koristi pri ispitivanju. Nadalje je prikazana primjena metode vrtložnih struja na metalne dijelove zrakoplovne konstrukcije i prikazani su ispitni parametri na temelju kojih se određuje stanje ispitivane strukture.

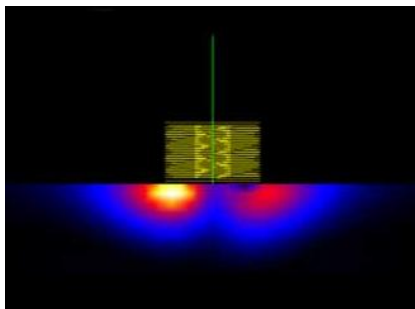
Nakon toga prikazana je zastupljenost CFRP materijala u modernim zrakoplovnim konstrukcijama i primjena metode vrtložnih struja pri ispitivanju CFRP struktura. Opisan je način karakteriziranja CFRP materijala i ispitni parametri bitni za određivanje usmjerenosti vlakana unutar materijala, detektiranje lokalnih nepravilnosti unutar materijala i procjenu starosti materijala. Također je prikazana i detekcija delaminacije unutar CFRP materijala. U zadnjem dijelu rada ukratko je prikazana SQUID tehnologija. To je relativno nova tehnologija koja se bazira na primjeni sonde napravljenih od supravodiča.

## 2 Općenito o metodi vrtložnih struja

Metoda vrtložnih struja (eng. Eddy Current Testing - EC) jedna je od najzastupljenijih metoda ispitivanja. Zbog svoje svestranosti i praktičnosti koristi se u održavanju raznih strojeva, od onih u energetske postrojenjima do zrakoplova.

### 2.1 Princip EC metode

EC metoda bazira se na elektromagnetskoj indukciji. Ispitivanje se provodi pomoću sonde u kojoj je smještena zavojnica kroz koju prolazi izmjenična električna struja i oko nje se stvara magnetsko polje. Kada se u to magnetsko polje stavi električni vodljiv materijal, u njemu će se početi stvarati vrtložne struje. Te vrtložne struje teku zatvorenim kružnim putanjama i suprotstavljaju se magnetskom polju zavojnice u sondi, što rezultira promjenom napona u zavojnici. Ako se u putanji vrtložnih struja nađe nepravilnost ili oštećenje u materijalu, vrtložne struje će teći ometano (slika 1) i u zavojnici će doći do promjene napona. Upravo mjerenjem napona ili jakosti struje u zavojnici možemo odrediti nalazi li se u ispitnom predmetu oštećenje ili ne.



Slika 1: Slabljenje vrtložnih struja uslijed oštećenja materijala [1]

Gustoća vrtložnih struja koje se induciraju u ispitnom predmetu nije jednolika. Pri površini, bliže zavojnici, gustoća vrtložnih struja je najveća i eksponencijalno se smanjuje s dubinom materijala. Dubina na kojoj gustoća vrtložnih struja iznosi 37% površinske gustoće naziva se standardna dubina penetracije i može se približno prikazati izrazom

$$d \approx \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad [1] \quad (1)$$

gdje je  $\pi = 3,14$ ,  $f$  frekvencija struje,  $\mu$  magnetska permeabilnost i  $\sigma$  električna vodljivost. Kako su magnetska permeabilnost i električna vodljivost

svojstva materijala, jedini parametar kojim možemo utjecati na veličinu  $d$  je frekvencija struje. Tako se prilikom ispitivanja odabire takva frekvencija koja će nam dati standardnu dubinu penetracije koja se poklapa s dubinom na kojoj očekujemo oštećenje. To znači da za uspješno detektiranje oštećenja EC metodom moramo unaprijed poznavati približnu lokaciju i prirodu oštećenja koje tražimo. Generalno, ako se prilikom ispitivanja traže površinska oštećenja koristi se visoka frekvencija, a ako se traže podpovršinska oštećenja koristi se niža frekvencija zbog veće dubine penetracije. Danas postoje uređaji za EC ispitivanje koji istovremeno mogu provoditi ispitivanje s više frekvencija što omogućava dobivanje više vrsta odziva iz ispitnog predmeta.

Još jedan bitan parametar u EC ispitivanju je fazni pomak. Fazni pomak je vremenski interval između odziva s površine ispitnog materijala i odziva s neke udaljenosti ispod površine i pomoću njega je moguće odrediti dubinu na kojoj se nalazi nepravilnost ili oštećenje. Malo površinsko oštećenje i veliko podpovršinsko oštećenje mogli bi jednako utjecati na promjenu struje u zavojnici, no kako fazni pomak raste s dubinom možemo točno odrediti o kakvom oštećenju je riječ.

U pravilu, prije svakog ispitivanja potrebno je opremu podesiti na referentnom uzorku načinjenom od materijala s istim električnim i magnetskim svojstvima kao ispitni predmet. Na referentnom uzorku također moraju biti načinjena umjetna oštećenja slična onima koje očekujemo u ispitnom predmetu. Na taj način možemo odrediti kakav nam odziv daje pojedina vrsta oštećenja kako bi se podaci dobiveni ispitivanjem mogli pravilno interpretirati.

Glavne prednosti EC metode zbog kojih je toliko zastupljena u održavanju su sljedeće:

- osjetljivost na mala oštećenja i nepravilnosti
- mogućnost detekcije površinskih i podpovršinskih nepravilnosti
- trenutni prikaz rezultata
- lako prenosiva oprema
- minimalna priprema ispitnih predmeta
- nema kontakta sonde i ispitnog predmeta

no, isto tako ima i određena ograničenja:

- ispitivati se mogu samo električni vodljivi materijali

- ograničena dubina penetracije
- ispitna površina mora biti dostupna sondi
- potrebno je više vještine i znanja nego kod ostalih NDT metoda [1]

## 2.2 Oprema za EC ispitivanje

Postoje mnoge konfiguracije za ispitivanje vrtložnim strujama, kako digitalne tako i analogne. Najjednostavnija konfiguracija sastoji se od izvora izmjenične struje, sonde u kojoj je smještena zavojnica i voltmetra ili ampermetra. Instrumenti za prikaz podataka mogu biti analogni, kao npr. ampermetar kojim se mjeri promjena jačine struje u zavojnici, ili digitalni koji prikazuju promjenu napona u vremenu. Također postoje i automatizirani sustavi za EC ispitivanje koji skeniraju ispitni predmet s više sonde istovremeno i daju dvodimenzijski prikaz ispitnog područja.



Slika 2: Oprema za EC ispitivanje [1]

Sonda je najkompliciraniji dio opreme za EC ispitivanje. Sastoji se od zavojnice, jezgre i kućišta. Zavojnica se uglavnom izrađuje od bakra i namata se oko jezgre. Jezgra može biti ili kruti materijal ili zrak, u slučaju da se radi o krutoj jezgri često se koristi ferit koji koncentrira magnetsko polje zavojnice na malo područje. Glavne dvije zadaće sonde su induciranje vrtložnih struja u ispitnom predmetu i detektiranje promjena u magnetskom toku vrtložnih struja. Sonde se klasificiraju po konfiguraciji i po načinu rada [1].

### 2.2.1 Konfiguracija sonde

Pojam konfiguracija sonde odnosi se na geometrijske karakteristike sonde kojima se prilagođava ispitnom području. Tako postoje površinske sonde, sonde za navoje, sonde za ispitivanje unutrašnjosti provrta i cijevi (ID sonde), te sonde za ispitivanje vanjskih cilindričnih površina, npr. cijevi ili osovina (OD sonde).

Površinske sonde (slika 3) koriste se za detektiranje površinskih nepravilnosti i oštećenja koja su orijentirana okomito na ispitnu površinu. Oštećenja kao npr. delaminacija kod kompozitnih CFRP konstrukcija uglavnom se ne mogu detektirati ovom sondom [1].



Slika 3: Površinske sonde [1]

### 2.2.2 Način rada sonde

Sonde se prema načinu rada dijele na apsolutne sonde, diferencijalne sonde, refleksijske sonde i hibridne sonde.

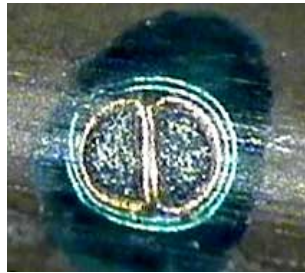
Apsolutne sonde uobičajeno imaju jednu zavojnicu koja služi i za induciranje vrtložnih struja i za detektiranje promjena u magnetskom polju vrtložnih struja. Signal dobiven apsolutnom sondom ovisi samo o stanju područja koje se ispituje. Osim za pronalaženje oštećenja, mogu se još koristiti za mjerenje vodljivosti i mjerenje debljine ispitnog predmeta.

Diferencijalne sonde sastoje se od dvije aktivne zavojnice. Signal dobiven diferencijalnom sondom predstavlja razliku odziva koje prima pojedina zavojnica. Kad se obje zavojnice nalaze nad područjem na kojem nema nepravilnosti ili oštećenja, obje zavojnice primaju jednak odziv od induciranih vrtložnih struja. Međutim ako se jedna zavojnica nađe iznad neoštećenog područja, a druga iznad oštećenog područja, odzivi koje će primiti zavojnice će se razlikovati i oštećenje će biti detektirano. Prednost ovih sondi je velika osjetljivost na oštećenja, ali su zato slabo osjetljive na postepene promjene debljine.

Refleksijske sonde kao i diferencijalne imaju dvije zavojnice, ali je razlika u tome što se ovdje jedna zavojnica koristi za induciranje vrtložnih struja, a druga za prikupljanje odziva od vrtložnih struja. Velika prednost ovih sondi je što se pojedina zavojnica može optimirati za svoju funkciju. Zavojnica koja prikuplja odziv vrtložnih struja obično je manja kako bi bila što osjetljivija

na mala oštećenja, dok je zavojnica koja inducira vrtložne struje napravljena veća kako bi proizvela jako i jednoliko magnetsko polje.

Primjer hibridne sonde je tzv. split D sonda (slika 4). Ona se sastoji od tri zavojnice. Jedna zavojnica služi za induciranje vrtložnih struja i okružuje dvije zavojnice oblika slova D koje prikupljaju odziv vrtložnih struja. Zavojnica koja inducira vrtložne struje radi s dvije D zavojnice kao refleksijska sonda, dok dvije D zavojnice rade kao diferencijalna sonda [1].



Slika 4: Split D sonda [1]

### 3 Primjena EC metode

Metoda vrtložnih struja danas je zastupljena u ispitivanju raznih dijelova strojeva, kao npr. cijevi izmjenjivača topline u nuklearnim elektranama, turbinskih lopatica ili raznih dijelova zrakoplova. Zbog svoje prirode može se koristiti za raznovrsna ispitivanja:

- detekcija pukotine
- mjerenje debljine materijala
- mjerenje debljine premaza
- verifikacija toplinske obrade
- mjerenje vodljivosti

Mjerenjem debljine materijala moguće je pronaći područja na ispitnom predmetu na kojima je došlo do stanjenja materijala, te tako detektirati koroziju.

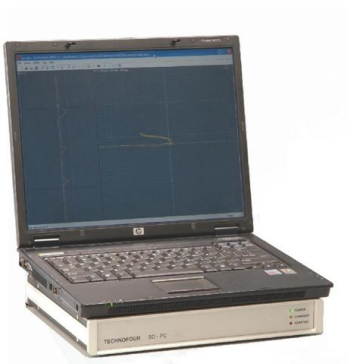
Vodljivost pojedinog materijala ovisi o kemijskoj strukturi. S obzirom da se ona mijenja s porastom temperature, EC metodom moguće je ustanoviti postoje li u materijalu oštećenja nastala povišenom temperaturom (u održavanju zrakoplova se to svojstvo koristi za ispitivanje dijela konstrukcije u kojem je došlo do udara groma) ili je li materijal podvrgnut nekoj toplinskoj obradi. Mjerenjem vodljivosti također je moguće identificirati materijal [1].

#### 3.1 Primjena EC metode u održavanju zrakoplova

U održavanju zrakoplova od velike je važnosti pravovremeno uočiti bilo kakva oštećenja, jer bi u suprotnom moglo doći do katastrofalnih posljedica. U tu svrhu koriste se razne NDT metode, pa tako i EC metoda kojom se detektiraju površinske pukotine u oplati i podpovršinska korozija na spojevima oplata i ispituju rupe od zakovica i podvozje.

Ispitivanje se provodi uređajima kao npr. SD-PC-12 (slika 5). To je prijenosni EC uređaj koji se spaja s prijenosnim računalom na kojem se prikazuju podaci dobiveni ispitivanjem. Omogućava ispitivanje s jednom ili dvije frekvencije i podržava dva načina rada, statički i dinamički [2]. Razlika između statičkog i dinamičkog načina rada je u tome što se kod dinamičkog načina signal filtrira tako da su propuštene samo nagle promjene magnetskog toka vrtložnih struja. Time je omogućena bolja razlučivost pukotine od ostalih nepravilnosti u ispitnom predmetu [3].



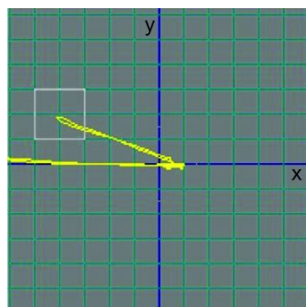


Slika 5: EC uređaj SD-PC-12 [2]

### 3.1.1 Detektiranje pukotina u aluminijskim legurama

EC metodom mogu se ispitivati kako ravne, tako i zakrivljene aluminijske površine kao što su razni dijelovi oplate. Prije ispitivanja uređaj se obično podešava na aluminijskim referentnim uzorcima s umjetno napravljenim pukotinama dubine 0,5 mm i 1 mm. Bitan parametar koji utječe na ispitivanje je tzv. lift-off, razmak između sonde i ispitne površine. Kako gustoća magnet-skog toka vrtložnih struja ovisi o udaljenosti zavojnice od ispitnog materijala, očito je da će kod većeg lift-off razmaka gustoća vrtložnih struja biti manja i obratno, kod manjeg lift-off razmaka gustoća vrtložnih struja će biti veća. Zato je važno da tijekom ispitivanja varijacije lift-off razmaka budu što manje.

No, u praksi su varijacije lift-off razmaka neizbježne, pogotovo ako se skeniranje obavlja ručno. Zato se uređaj SD-PC-12 prije ispitivanja podešava tako da odziv od varijacija lift-off razmaka bude prikazan na zaslonu kao horizontalan pomak signala ulijevo (slika 6).



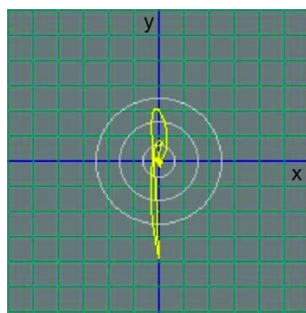
Slika 6: Signal lift-off razmaka i oštećenja [3]

Ukupni odziv se sastoji od signala lift-off razmaka i signala eventualnog oštećenja. Ako na ispitnom području nema oštećenja, signal će biti hori-

zontalan i kretat će se ulijevo s varijacijama lift-off razmaka. U slučaju da se detektira oštećenje, signal više neće biti horizontalan. Njegova  $x$  komponenta davat će i dalje informaciju o lift-off razmaku, dok će  $y$  komponenta predstavljati oštećenje. Prilikom podešavanja uređaja pomoću referentnih uzoraka s oštećenjima poznatih dimenzija, možemo unaprijed odrediti koji su signali relevantni, a koji nisu. Na slici 6 područje signala koji nas zanimaju prikazano je kvadratom. Ukoliko tijekom skeniranja signal uđe u kvadrat znači da smo naišli na oštećenje [3].

### 3.1.2 Ispitivanje provrta od zakovica

U održavanju zrakoplova metodom vrtložnih struja ispituju se unutrašnje strane provrta od zakovica. Prije ispitivanja uređaj se podešava na referentnim uzorcima s provrtima jednakim onima na zrakoplovnoj konstrukciji i ispitivanje se obavlja u dinamičkom načinu rada. Unutar provrta umjetno su napravljene pukotine dubine 0,5 mm i širine 0,12 mm. Odziv je prikazan na slici 7.



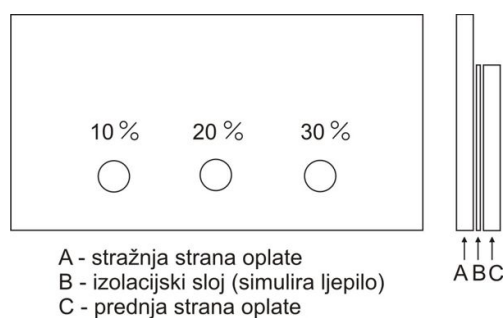
Slika 7: Odziv oštećenja u provrtu od zakovice [3]

Kružnice prikazuju područje u kojem nema oštećenja i oni su određeni podešavanjem na referentnom uzorku. Ukoliko tijekom ispitivanja signal izađe izvan kružnica znači da se sonda nalazi iznad oštećenja [3].

### 3.1.3 Detektiranje ispodpovršinske korozije

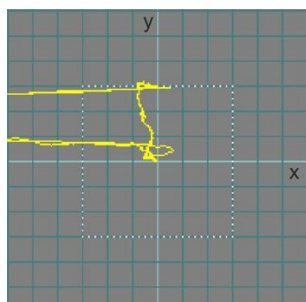
Korozija je jedan od glavnih čimbenika koji utječu na smanjenje otpornosti materijala na umor te ju je stoga važno pravovremeno detektirati. Korozija se uglavnom pojavljuje na ljepljenim ili zakovičnim spojevima dijelova oplata.

Referentni uzorak za podešavanje EC uređaja prikazan je na slici 8. Mora biti načinjen od materijala približno iste vodljivosti i debljine kao i oplata koja se ispituje. Stanjenje materijala uslijed korozije na referentnom uzorku simulirano je kao područje smanjenje debljine za 10, 20 i 30 % debljine oplata.

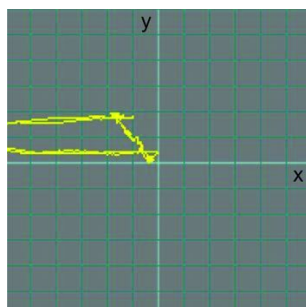


Slika 8: Referentni uzorak [3]

Male šupljine između slojeva mogu davati sličan odziv kao i stanjenje materijala. Zato se podešavanje vrši na dvije frekvencije 5 kHz (slika 9) i 2 kHz (slika 10).



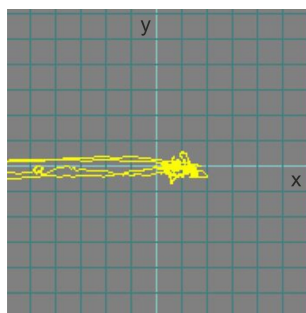
Slika 9: Odziv pri frekvenciji 5 kHz [3]



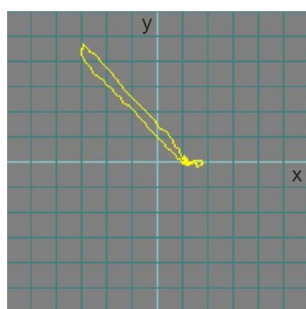
Slika 10: Odziv pri frekvenciji 2 kHz [3]

Svaka frekvencija nosi zasebni signal i spajanjem tih signala dobiva se novi signal koji se može podesiti tako da se signali šupljina između slojeva ponište. Na taj način dobiva se čisti horizontalni lift-off signal (slika 11). Kad je oprema ovako podešena, moguće je detektirati stanjenje materijala za 10 %

uslijed podpovršinske korozije, čak i u prisutnosti šupljina između slojeva (slika 12) [3].



Slika 11: Spoj odziva dvaju frekvencija [3]



Slika 12: Odziv ispodpovršinske korozije [3]

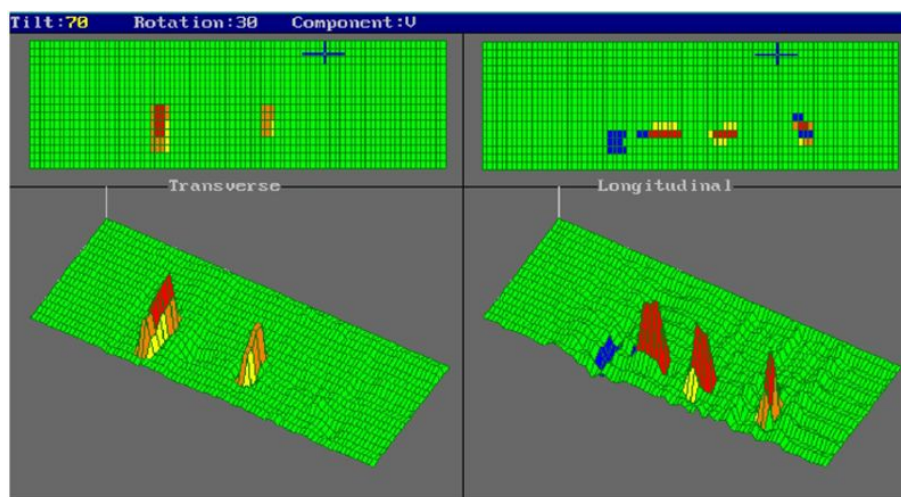
### 3.1.4 Ispitivanje površine pomoću višezavojničke sonde

Kod ručnog skeniranja površine glavni problem koji se pojavljuje je ovisnost rezultata o ispitivaču zbog varijacija lift-off razmaka. Zato se za ispitivanje površine koristi višezavojnička sonda sastavljena od dva reda od po osam zavojnica i struja se provodi kroz svaku zavojnicu pojedinačno. Skeniranje takvom sondom je automatizirano kako bi se smanjio utjecaj lift-off razmaka i kako bi se ispitivanje ubrzalo.

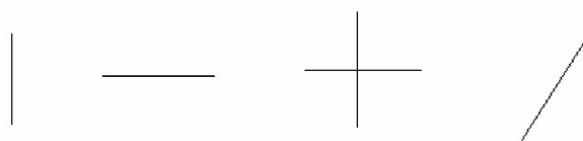
Slika 13 prikazuje odzive poprečnih i uzdužnih nepravilnosti dobivene skeniranjem uzorka s umjetno napravljenim oštećenjima oblika prema slici 14. Prvo je poprečni urez, drugo uzdužni urez, zatim slijedi križ s uzdužnom i poprečnom komponentom i zadnje je urez pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na smjer skeniranja.

Vidljivo je da se poprečnim skeniranjem dobiva dobar odziv poprečnih ureza, dok uzdužni imaju jako slab odziv. Uzdužnim skeniranjem dobiveni

su dobri odzivi i uzdužnih i poprečnih ureza, kao i ureza pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na smjer skeniranja [3].



Slika 13: Odziv dobiven višezavojničkom sondom [3]



Slika 14: Oblici umjetno napravljenih oštećenja [3]

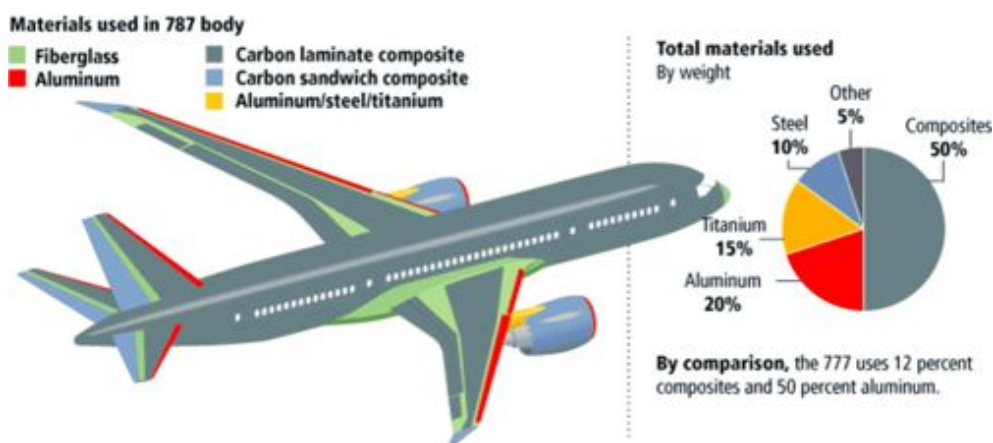
## 4 Ispitivanje CFRP materijala EC metodom

### 4.1 Zastupljenost CFRP kompozitnih struktura u zrakoplovnim konstrukcijama

CFRP (eng. Carbon Fiber Reinforced Plastic) je kompozitni materijal sastavljen od polimerne matrice, uglavnom epoksidne smole, ojačane ugljičnim vlaknima. Zbog svoje visoke specifične čvrstoće, krutosti i otpornosti na koroziju našao je primjenu u mnogim industrijama pa tako i u zrakoplovnoj industriji. Neke od prednosti CFRP materijala pred tradicionalnim materijalima su slijedeće:

- primjenom CFRP materijala masa se može smanjiti za 25 do 50% u odnosu na aluminij
- specifična vlačna čvrstoća je četiri do šest puta veća nego kod aluminija i čelika
- specifični modul (omjer krutosti i gustoće) je tri do pet puta veći nego kod aluminija i čelika
- otpornost na umor puno veća nego kod aluminija i čelika [4]

Udio kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama u stalnom je rastu. Tako je npr. maseni udio kompozita u Boeing 747 1969. g. bio 1%, dok je u Boeing 787 2009. g. maseni udio kompozita 50% (uglavnom CFRP) (slika 15).



Slika 15: Materijali korišteni u Boeing 787 [5]

CFRP se koristi za razne dijelove oplata krila, trupa i kućišta motora, te je zbog sve veće zastupljenosti tog materijala potrebno i daljnje istraživanje o primjeni EC metode u ispitivanju CFRP-a.

## 4.2 Karakterizacija CFRP materijala EC metodom

Pod karakterizacijom CFRP-a smatra se određivanje orijentacije vlakana, detektiranje mogućih lokalnih nepravilnosti i procjena starosti materijala.

Karakterizacija CFRP materijala bazira se na neizotropnim električnim svojstvima materijala. Unutar materijala postoje znatne razlike u električnoj vodljivosti pojedinih komponenti kompozita, tj. ugljičnih vlakana i polimerne matrice. Električna vodljivost također ovisi i o smjeru ugljičnih vlakana. U smjeru vlakana vodljivost je puno veća nego okomito na njih pa će o orijentaciji vlakana također ovisiti i inducirano magnetsko polje [6].

Metoda karakterizacije bazira se na mjerenju  $z$  komponente magnetskog polja. U proračunu će se koristiti gustoća struje u obliku mreže sastavljene od elementarnih strujnih krugova (slika 16). Svaki krug ima tok struje jakosti  $S(x, y)$ . Gustoća struje  $J$  je rezultat parcijalnih derivacija od  $S$ :

$$J_x(x, y) = \frac{\partial S(x, y)}{\partial y} \text{ i } J_y(x, y) = -\frac{\partial S(x, y)}{\partial x} \quad [6] \quad (2)$$

Svaki elementarni strujni krug proizvodi magnetsko polje  $\vec{b}$  koje je proporcionalno toku  $S$ . Inducirano magnetsko polje jednako je zbroju magnetskih polja elementarnih krugova. Mjerena  $z$  komponenta magnetskog polja prema tome se može zapisati:

$$B_z(x, y) = b_z \cdot S \quad [6] \quad (3)$$

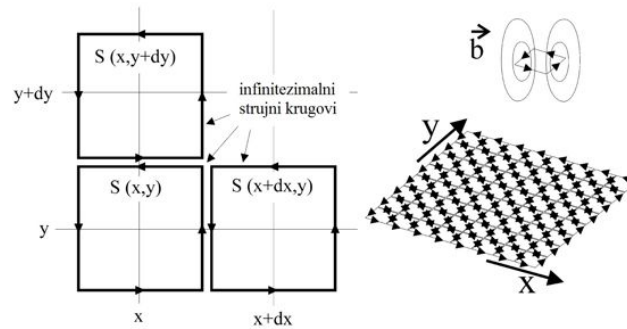
Zamjenom  $b_z$  dobivamo:

$$B_z(x, y) = C \cdot S(x, y) \quad [6] \quad (4)$$

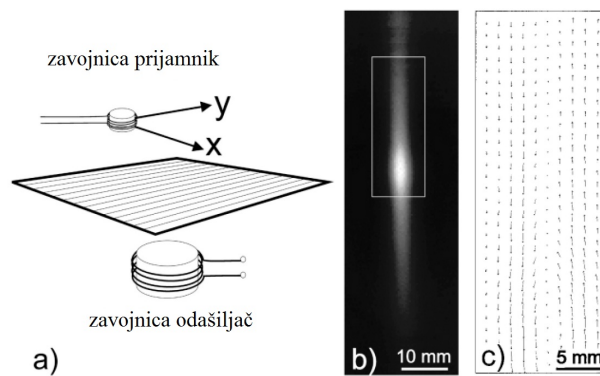
gdje je  $C$  konstanta proporcionalnosti. Na taj način se gustoća struje može direktno dobiti iz parcijalnih derivacija od  $B_z$  [6].

Vrtložne struje unutar CFRP-a induciraju se pomoću zavojnice odašiljača. Zavojnica sadrži feritnu jezgru promjera 3 mm i duljine 5 mm. Magnetsko polje se mjeri u blizini površine materijala pomoću male prijamne zavojnice (slika 17a) [6].

Ova metoda se prvo primjenila na ispitivanje raspodjele struje u unidirekcijskom CFRP-u. Slika 17b prikazuje  $z$  komponentu magnetskog polja. Veličina slike odgovara veličini ispitivanog područja 24 mm x 76 mm. Slika 17c prikazuje raspodjelu struje izračunatu pomoću jednadžbe (2) i (4). Kako

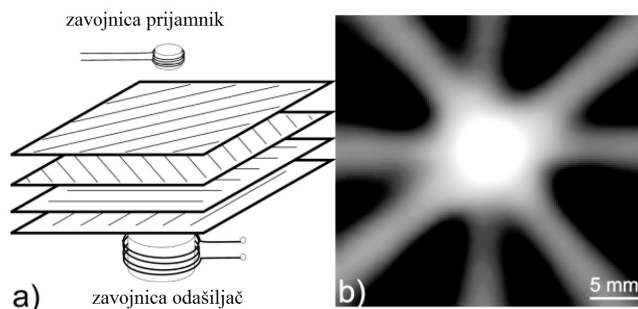


Slika 16: Model relacije između distribucije struje i magnetskog polja [6]



Slika 17: Procjena raspodjele vrtložnih struja u unidirekcijskom CFRP uzorku: a) mjerenje magnetskog polja, b) prikaz  $z$  komponente magnetskog polja u skeniranom području, c) raspodjela struje izračunata iz magnetskog polja [6]





Slika 18: Magnetsko polje u multidirekcijskom CFRP uzorku: a) mjerenje magnetskog polja, b) prikaz  $z$  komponente magnetskog polja u skeniranom području [6]

se i pretpostavljalo, struje inducirane u smjeru vlakana su dominantne zbog neizotropnog svojstva vodljivosti CFRP materijala [6].

U dodatnom eksperimentu ispitivan je četveroslojni CFRP s različito orijentiranim vlaknima (slika 18a). Slika 18b prikazuje izmjereno magnetsko polje. Veličina slike odgovara veličini ispitivanog područja 28 mm x 30 mm [6].

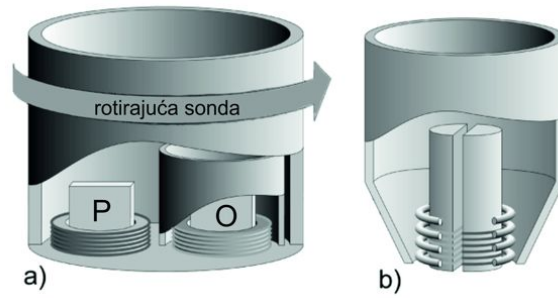
U oba eksperimenta uspješno je napravljen prikaz raspodjele vrtložnih struja unutar CFRP materijala pa se moglo krenuti s konkretnijim ispitivanjima u svrhu karakterizacije materijala.

#### 4.2.1 Oprema za karakterizaciju

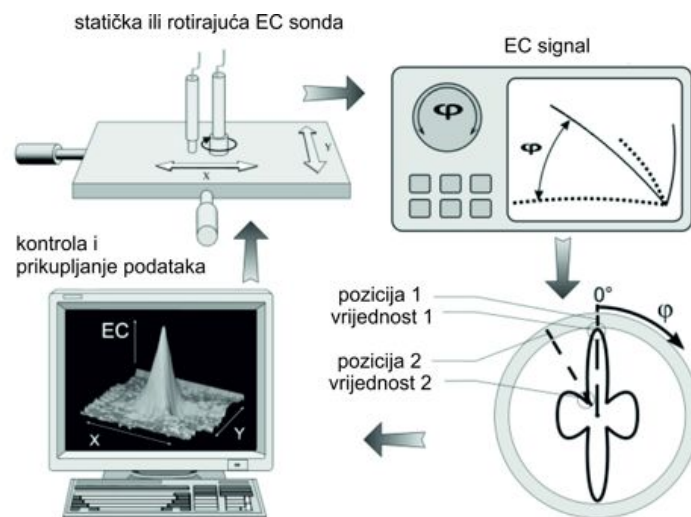
Za daljnje ispitivanje razvijene su posebne sonde. Jedna od njih sastavljena je od zavojnice odašiljača i zavojnice prijarnika s feritnim jezgrama (slika 19a). Zbog neizotropnosti električne vodljivosti, raspodjela vrtložnih struja će ovisiti o kutnoj poziciji rotirajuće sonde [6].

Rotiranjem sonde iznad ispitnog uzorka dobivamo polarne dijagrame iz kojih se može očitati vodljivost materijala u različitim smjerovima. Na slici 19b prikazana je statička sonda koja je jako osjetljiva na lokalne nepravilnosti [6].

Cjelokupni sustav za mjerenje prikazan je na slici 20. Sastoji se od automatiziranog skenera kontroliranog pomoću računala, EC uređaja s maksimalnom frekvencijom od 10 MHz, pretvarača pravokutnog u polarni koordinatni sustav i računala za prikupljanje podataka [6].



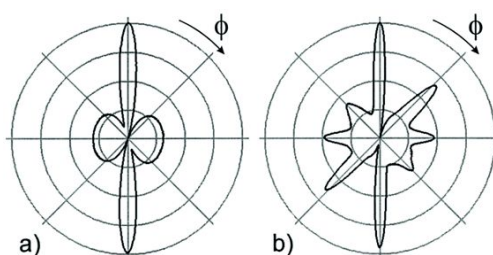
Slika 19: EC sonde za karakterizaciju CFRP-a: a) rotirajuća apsolutna sonda, b) statička diferencijalna sonda [6]



Slika 20: Sustav za mjerenje [6]

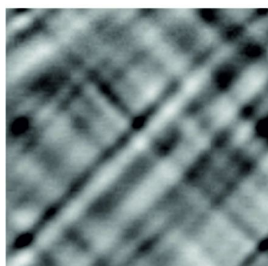
### 4.2.2 Određivanje orijentacije vlakana

Za detekciju orijentacije vlakana mogu se koristiti rotirajuće sonde. Na slici 21 prikazane su amplitude signala kao funkcije kutnog položaja sonde. Na slici 21a prikazan je odziv unidirekcijskog CFRP-a, a na slici 21b odziv višeslojnog CFRP-a sa slojevima raspoređenim pod kutovima  $[90_2, +45_2, 0_2, -45_2]$ . Lokalni maksimum označava orijentaciju vlakana [6]. Na slici se također vidi da je signal dobiven od slojeva na većim dubinama slabiji (manje amplitude) pa se ovom metodom može točno odrediti raspored slojeva s različito orijentiranim vlaknima.



Slika 21: Rezultati dobiveni rotirajućom sondom. Polarni dijagrami označuju orijentaciju vlakana: a) unidirekcijski CFRP, b) multidirekcijski CFRP [6]

Statičkom sondom se također može odrediti orijentacija vlakana. Na slici 22 dobivenoj statičkom sondom, vidi se usmjerenost vlakana, ali i varijacija debljine vlakana. Uzdužna promjenjivost poprečnog presjeka vlakana bitno utječe i na električnu vodljivost vlakana pa se EC metodom lako mogu detektirati ovakve nepravilnosti [6].



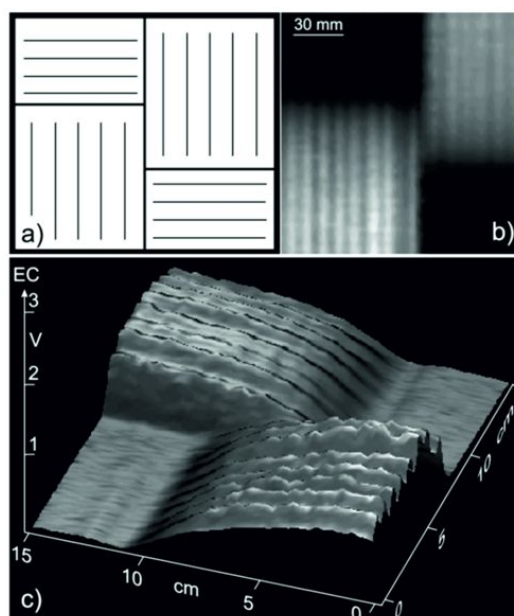
Slika 22: Rezultati dobiveni statičkom sondom: dvosmjerni CFRP uzorak [6]

### 4.2.3 Lokalne nepravilnosti

Za detektiranje i analizu lokalnih nepravilnosti koristi se rotirajuća sonda. Dobiveni signal se direktno prikazuje na ekranu ili se postprocesira preko

polarnog koordinatnog sustava.

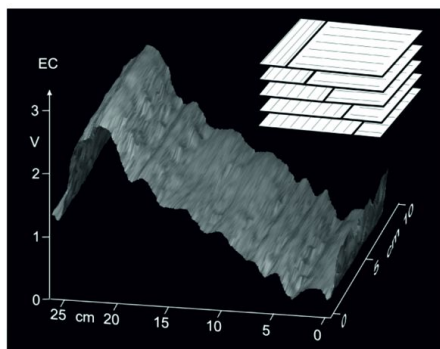
Slika 23a prikazuje sloj debljine 1 mm s različito orijentiranim vlaknima. Taj sloj prekriven je unidirekcijskim materijalom s horizontalno orijentiranim vlaknima duplo veće debljine od sloja koji se ispituje. Cilj je procijeniti do koje dubine je EC metodom moguće uspješno odrediti orijentaciju vlakana. Slika 23b prikazuje izmjereni signal. Područje s promjenjivom orijentacijom vlakana može se prepoznati kao skupina svjetlih pruga. Svjetla boja ukazuje na nepodudaranje orijentacije vlakana, a također se može vidjeti i promjenjiva debljina vlakana. Na slici 23c rezultat je prikazan kao reljef. Ovdje je promjenjiva debljina vlakana još očitija i detekcija promjenjive orijentacije vlakana moguća je do dubine od 3 mm [6].



Slika 23: Detekcija sloja s različito orijentiranim vlaknima: a) shematski prikaz slojeva, b) prikaz dobiven rotirajućom sondom, c) reljefni prikaz područja s promjenjivom orijentacijom vlakana [6]

Nakon toga ispitan je CFRP uzorak sa stepeničasto poredanim slojevima različite orijentacije vlakana (slika 24). Iz slike se može zaključiti da je EC metoda jako osjetljiva čak i na unutarnje slojeve CFRP-a, ali se također može zamijetiti smanjenje osjetljivosti s povećanjem dubine materijala [6].

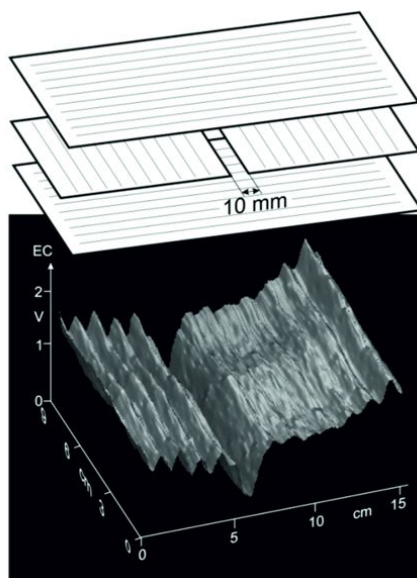
Kako se CFRP komponente izrađuju od traka ugljičnih pletiva, u proizvodnji se razmak između susjednih traka teško može izbjeći, što rezultira područjima bogatijim polimernom matricom. Kako ta područja imaju veliki utjecaj na mehaničke karakteristike materijala bitno je da se takva mjesta



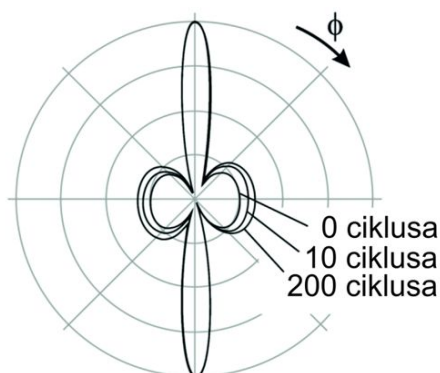
Slika 24: EC prikaz CFRP-a sa stepeničastom promjenom orijentacije vlakana [6]

lociraju. Na slici 25 prikazan je odziv područja bogatog polimernom matricom [6].

Vidljivo je da se EC metodom uspješno detektiralo i područje s većom količinom polimerne matrice. Na tom se mjestu vodljivost smanjila, te je izmjeren niži napon.



Slika 25: EC prikaz područja s većom količinom polimerne matrice [6]



Slika 26: EC signali dobiveni rotirajućom sondom prije toplinskih ciklusa, nakon 10 i nakon 200 toplinskih ciklusa [6]

#### 4.2.4 Procjena starosti CFRP materijala

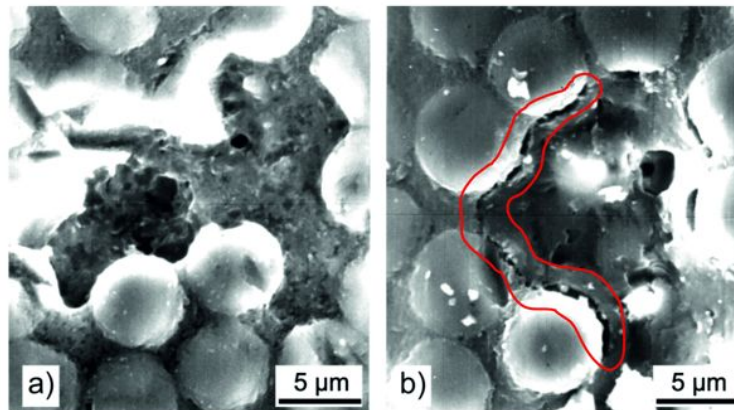
Kako materijal stari tako se mijenja i njegovo svojstvo vodljivosti električne struje. Kod CFRP materijala se podvrgavanjem materijala različitim temperaturama promjena vodljivosti najviše očituje u smjeru okomitom na vlakna [6].

Za ispitivanje je uzeto nekoliko uzoraka CFRP materijala koji su podvrgnuti ciklusima promjene temperature od  $-160^{\circ}\text{C}$  do  $+120^{\circ}\text{C}$  kako bi se simuliralo starenje materijala. Proces je prekinut nakon 10 i 200 ciklusa i materijal je ispitivan EC metodom. Na slici 26 može se vidjeti povećanje kružnih dijelova polarnog dijagrama s brojem ciklusa. Porast vodljivosti u smjeru okomitom na vlakna uzrokovana je međusobnim približavanjem ugljičnih vlakana, tj. smanjenjem količine matrice između vlakana [6].

Slika 27a prikazuje mikrostrukturu područja oko mjehurića zraka odmah nakon proizvodnje i vidi se da nigdje nema odljepljivanja vlakana. Na slici 27b vidi se odljepljivanje vlakana u blizini mjehurića zraka nakon 200 toplinskih ciklusa [6].

### 4.3 Detekcija delaminacije EC metodom

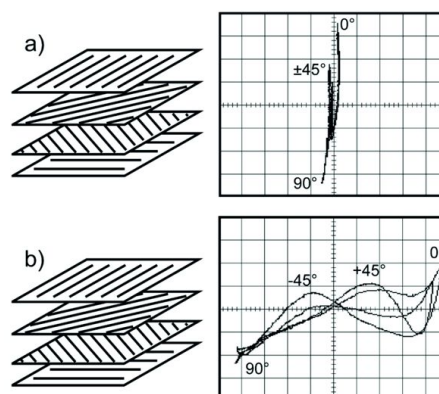
Kako inducirane vrtložne struje u materijalu teku paralelno s površinom ispitnog uzorka, čini se nemogućim detektirati oštećenja poput delaminacije. No, u CFRP materijalu se između pojedinih slojeva i između vlakana u pojedinom sloju pojavljuju otpornički i kapacitivni parovi. Ti međuslojni i međuvlaknasti parovi su rezultat električnog međudjelovanja pojedinih slojeva i pojedinih vlakana i upravo oni omogućavaju stvaranje međuslojnih i međuvlaknastih vrtložnih struja, pa se EC metodom može otkriti i delami-



Slika 27: Mikrostruktura mjehurića zraka: a) prije ciklusa i b) nakon 200 toplinskih ciklusa [6]

nacija unutar CFRP materijala [6].

Na slici 28 prikazani su rezultati ispitivanja dva uzorka multidirekcijskog CFRP-a strukture  $[90_2, -45_2, +45_2, 0_2]$ . Uzorak na slici 28a sastoji se od pojedinačno napravljenih slojeva s različito usmjerenim vlaknima naslaganih jedan na drugi, čime je simulirana delaminacija. Kod tog uzorka onemogućeno je stvaranje vrtložnih struja između slojeva. Slika 28b prikazuje cjeloviti CFRP uzorak s orijentacijom vlakana istom kao i kod uzorka pod 28a. Kako su ovdje slojevi međusobno spojeni omogućeno je stvaranje međuslojnih parova koji će provoditi vrtložne struje [6].



Slika 28: EC signal a) višedjelnog CFRP-a, b) cjelovitog CFRP-a dobiven rotirajućom sondom [6]

Uzorci su ispitivani rotirajućom sondom. Vidi se da u uzorku u ko-

jem nema međuslojnih parova, signal nema horizontalnu komponentu. U cjelovitom uzorku dobiveni su raznoliki signali kao rezultat električnog spari-  
vanja pojedinih slojeva. Može se zaključiti da se EC metodom može uspješno  
detektirati delaminacija između različito orijentiranih slojeva [6].



## 5 Ispitivanje CFRP materijala SQUID tehnologijom

SQUID je skraćenica za Superconductive QUantum Interference Device. To je posebna vrsta EC sonde koja se od klasične razlikuje po svojoj visokoj osjetljivosti na magnetski tok što omogućava detekciju nepravilnosti u materijalima s jako niskom električnom vodljivošću. Kako je SQUID supervodič, potrebo je detaljnije objasniti njegova svojstva kako bismo razumjeli njegov način rada.

Supervodič je materijal koji ohlađen ispod određene temperature (kritične temperature  $T_C$ ) provodi električnu struju bez ikakvog električnog otpora. Materijali korišteni za SQUID su nobij i legura  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Nobij je niskotemperaturni metalni supervodič (LTS) s kritičnom temperaturom 9,25 K. Drugo je keramički supervodič i pripada klasi supervodiča s visokom kritičnom temperaturom (HTS) od 93 K. Uobičajeno su LTS SQUID-ovi hlađeni uranjanjem u tekući helij čija je točka vrelišta 4,2 K, dok se HTS SQUID-ovi hlade tekućim dušikom čije je vrelište na 77 K. U nerazornim ispitivanjima se uglavnom koristi HTS SQUID zbog niže cijene tekućeg dušika i relativno lakše uporabe naspram tekućeg helija [7].

### 5.1 Detekcija oštećenja uslijed udara

Zbog niske čvrstoće u smjeru okomitom na slojeve, CFRP materijali su sklони delaminaciji. Delaminacija CFRP zrakoplovnih konstrukcija može biti rezultat udara raznih krhotina s piste, tuče, alata za održavanje ili udara ptice. Delaminacija se uglavnom pojavljuje bez površinskih naznaka pa ju je teško detektirati. Postojanje delaminacije u materijalu može uzrokovati smanjenje krutosti koje može dovesti do katastrofalnih kvarova [8].

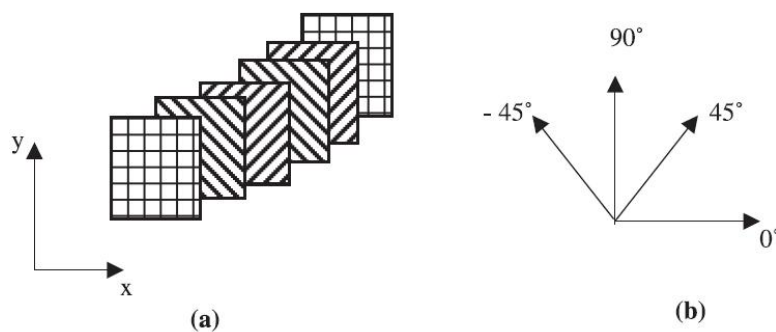
Stupanj oštećenja uslijed udara ovisi o mnogo parametara, npr. o energiji udara, debljini materijala i o usmjerenju vlakana unutar materijala te je električni otpor CFRP materijala direktno povezan sa stupnjem mehaničke deformacije materijala. Niska električna vodljivost i velika neizotropnost CFRP materijala generalno smanjuje detektibilnost oštećenja koja se nalaze na većim dubinama materijala, pa je s klasičnim EC sondama teže detektirati dublja oštećenja. Zbog toga je efektivnije pri EC ispitivanju CFRP materijala koristiti SQUID magnetometre zbog njihove velike osjetljivosti na magnetsko polje. U ovom radu pokazano je da HTS SQUID magnetometar može detektirati oštećenja nastala udarom već u ranoj fazi, odmah nakon udara energije od 2 J u CFRP kompozit debljine 4 mm [8].

### 5.1.1 Oprema i materijal

Vrtložne struje su u materijalu inducirane pomoću zavojnice promjera 5 mm smještene 6 mm ispod zavojnice prijamnika. Kroz zavojnicu se puštala struja jakosti 5 mA i frekvencije 15 kHz. Zavojnica je orijentirana tako da detektira komponentu vrtložnih struja paralelnu s površinom materijala. Uzorci su smješteni 2 mm ispod zavojnice i pomicali su brzinom od 3 mm/s [8].

Testirani CFRP je multidirekcijski kompozit dimenzija 70 mm x 70 mm baziran na epoksidnoj matrici ojačanoj ugljičnim vlaknima i proizveden je ručnim polaganjem i stvrdnjavanjem u autoklavi. Volumenski udio vlakana u kompozitu bio je 55%. Svaki je uzorak napravljen od šest blokova naslaganih jedan na drugi i u svakome se bloku nalazi određeni broj slojeva ugljičnih vlakana koji su jednako usmjereni (slika 29). Broj slojeva u svakom bloku ovisi o ukupnoj debljini uzorka koji variraju od 2 mm do 4 mm [8].

Multidirekcijski uzorci su opterećeni na središnjem dijelu polukugličnim čeličnim udaračem, promjera 12,7 mm, koji je pušten da padne s različitih visina na uzorak. Uzorci debljine 2 mm su udarani energijama do 12 J, a uzorci debljine 3 mm i 4 mm su udarani energijama do 25 J. Najviše je pažnje posvećeno uzorku debljine 2 mm udaranom s 2,4 J, 7,8 J i 12 J i uzorku debljine 4 mm udaranom energijom 1,8 J. Udubine na površini oštećenih uzoraka mjerene su mikrometrom [8].



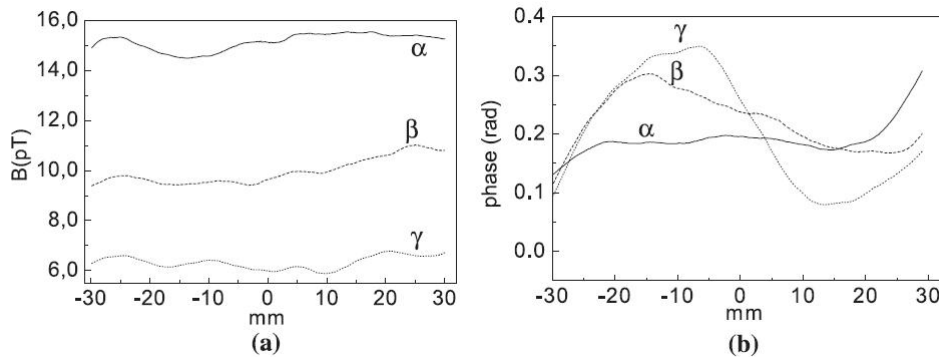
Slika 29: a) raspored blokova u ispitivanim uzorcima, b) orijentacija vlakana unutar blokova [8]

### 5.1.2 Rezultati

Glavni parametri s kojima je povezan integritet strukture CFRP-a su jakost magnetskog polja vrtložnih struja i faza magnetskog polja koja prikazuje promjenu jakosti magnetskog polja. Veća je pažnja dana fazi, a ne jakosti

magnetskog polja jer je iz faze bilo moguće dobiti više informacija o oštećenjima u materijalu [8].

Na slici 30 je prikazana jakost magnetskog polja i faza za neoštećeni ( $\alpha$ ) i oštećeni ( $\beta$  i  $\gamma$ ) uzorak debljine 2 mm.  $\beta$  i  $\gamma$  linije su dobivene pomicanjem magnetometra iznad oštećenja nastalog udarom energija od 2,4 J i 12 J. Svaka linija predstavlja skeniranje područja duljine 60 mm uzorka. Jakost magnetskog polja za oštećeni uzorak u blizini centra oštećenja (0 mm) ne pokazuje značajne varijacije. Iz tog razloga, promjena jakosti po skeniranom području izgleda slično promjeni jakosti dobivenoj skeniranjem neoštećenog uzorka. Jedina razlika je ta što je jakost magnetskog polja u oštećenom uzorku manja nego jakost magnetskog polja u neoštećenom uzorku. Dakle, što je veće oštećenje, to je manja amplituda jakosti magnetskog polja. Uzimajući u obzir samo jakost magnetskog polja, prisutnost oštećenja nije očita. Takvo mjerenje daje samo kvalitativnu informaciju o vodljivosti unutar uzorka i rezultati pokazuju samo da postojanje oštećenja smanjuje vodljivost materijala. Ograničena prostorna rezolucija SQUID sustava ne omogućava nam dobivanje lokalnih varijacija električne vodljivosti unutar materijala. Iz tog razloga jakost magnetskog polja samo nam daje informaciju o prosječnoj vodljivosti unutar uzorka [8].

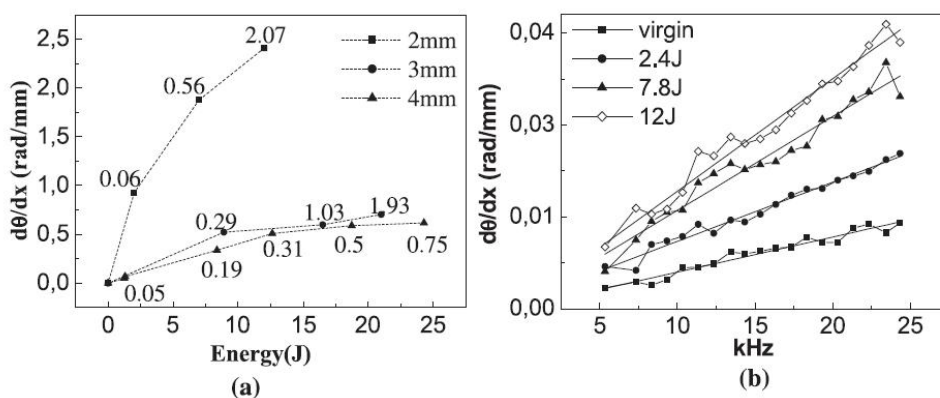


Slika 30: a) i b) prikazuju jakost magnetskog polja i fazu u uzorku debljine 2 mm. ( $\alpha$ ) je odziv dobiven iz neoštećenog uzorka, a ( $\beta$ ) i ( $\gamma$ ) su odzivi dobiveni iz uzorka udarenih s 2,4 J i 12 J [8]

S druge strane, faza pokazuje značajne varijacije po području skeniranja. Razlika između signala s neoštećenog i oštećenog uzorka vidi se po padu faze na području udara (0 mm). Infleksija ukazuje na postojanje oštećenja. Nadalje, vidi se da je varijacija faze povezana s lokacijom oštećenja. U ovom primjeru provjereno je da središte oštećenja odgovara centru infleksije linije faze. Rezultati pokazuju da je pad faze ( $d\phi/dx$ ) povezan s težinom oštećenja.

Drugim riječima, moguće je razlikovati razna oštećenja pomoću vrijednosti pada faze; što je veći pad faze, to je veće oštećenje i veća dubina oštećenja [8].

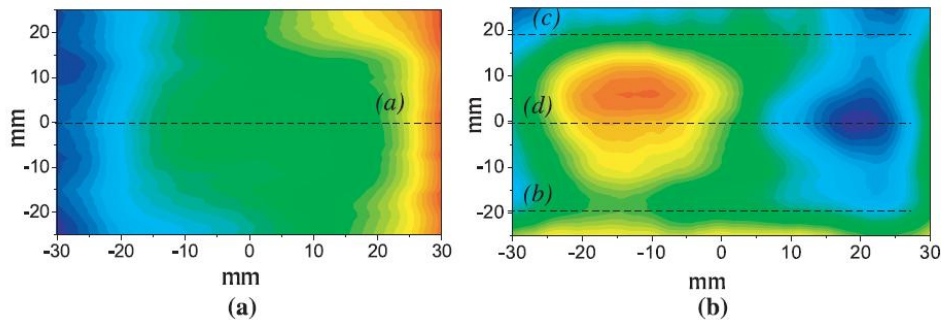
Na slici 31a je prikazan pad faze za različite energije udara. Kod svake debljine, povećanjem energije udara povećava se i pad faze. U slučaju uzorka debljine 2 mm ne postoji razlika u padu faze za energije udara veće od 12 J, jer su uzorci pri tim udarima probijeni što je ustanovljeno naknadnom inspekcijom uzoraka. Uspoređujući padove faza za svaku energiju udara, vrijednosti pada za uzorak debljine 2 mm su uvijek veće nego kod uzoraka debljine 3 mm i 4 mm. To se podrazumijeva jer su tanji uzorci puno krhkiji od uzoraka veće debljine. Također treba spomenuti da eksperimentalni rezultati ne ovise o frekvenciji struje koja je izabrana za zavojnicu magnetometra. Na slici 31b je prikazano da je promjena pada faze s frekvencijom ispitivanja linearnog karaktera u intervalu od 5kHz do 25kHz [8].



Slika 31: a) pad faze u ovisnosti o energijama udara za uzorke debljina 2 mm, 3 mm i 4 mm. Duž linija pada faze naznačene su i izmjerene udubine (u mm) nastale udarom na površini uzoraka, b) pad faze u odnosu na frekvenciju struje u zavojnici magnetometra za uzorak debljine 2 mm za različite energije udara [8]

Od velike je važnosti detektirati početak delaminacije jer se već tada pojavljuje smanjenje krutosti i čvrstoće CFRP kompozita. Očito je da količina energije potrebna za nastajanje oštećenja ovisi o debljini materijala. Mehaničkim i optičkim testovima ustanovljeno je da je uzorak debljine 4 mm udaren energijom od 1,6 J podložan nastajanju delaminacije. Iz tog je razloga u daljnjem istraživanju uzorak debljine 4 mm podvrgnut udaru energije od 1,8 J. Na slici 32a i 32b prikazana je faza za neoštećeni i oštećeni (udar od 1,8 J) uzorak debljine 4 mm. Iako je energija udara relativno mala, odziv prikazuje

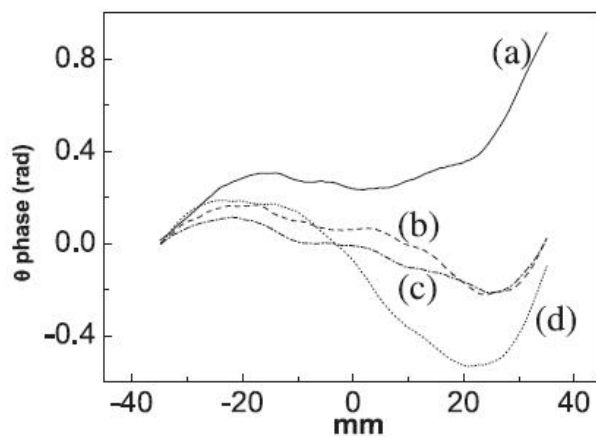
prisutnost oštećenja čak i kad ono nije vidljivo golim okom. Dipolna priroda odziva rezultat je nehomogene raspodjele vrtložnih struja unutar uzorka [8].



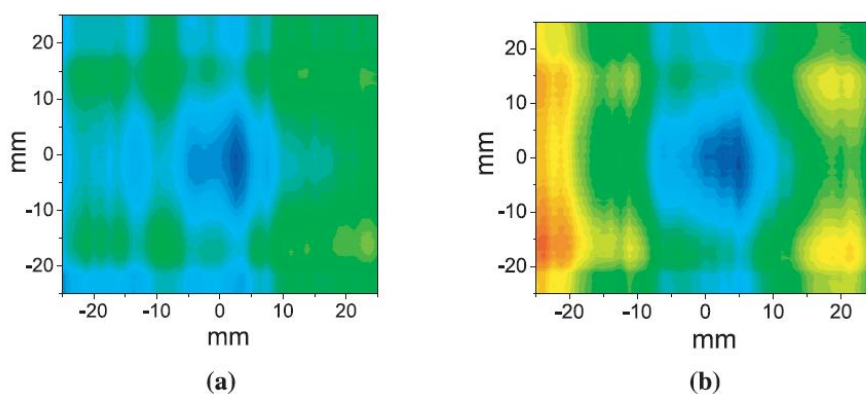
Slika 32: Prikaz faze za a) neoštećeni uzorak debljine 4 mm i b) uzorak debljine 4 mm udaren energijom od 1,8 J [8]

Na slici 33 uspoređeni su odzivi dobiveni linijskim skeniranjem kroz sredinu neoštećenog uzorka (linija a), linijskim skeniranjem na području  $\pm 20$  mm od sredine oštećenog uzorka (linije b i c) i linijskim skeniranjem područja koje prolazi središtem udara oštećenog uzorka (linija d). Razlika u padu faze između linije a i d znači da, iako se površine uzorka čine nedirnutе, oštećeni uzorak ima unutarnje oštećenja poput delaminacije. Nadalje uspoređujemo odziv neoštećenog uzorka i odziv dobiven na  $\pm 20$  mm od središta udara. Iako je uzorak debljine 4 mm udaren relativno malom energijom (1,8 J), vidljivo je da oštećenje propagira na udaljenost 20 mm od središta udara. To znači da je varijacija faze po duljini skeniranja ( $d\phi/dx$ ) pogodan parametar za ispitivanje jačine oštećenja, ali i za ispitivanje udaljenosti na koju se oštećenje proteže od središta udara [8].

Vrijedno je spomenuti da konvencionalnom EC metodom nije bilo moguće detektirati oštećenja nastala ovako malim energijama. To je pokazano na slici 34. EC ispitivanje prikazano na slici 34 napravljeno je EC instrumentom Elotest B300. Rezultati su dobiveni apsolutnom feritnom sondom pri frekvenciji struje 580 kHz. Važno je za primjetiti da konvencionalna EC metoda nije mogla razlikovati neoštećeni uzorak od uzorka oštećenog udarom od 1,8 J. To ukazuje na poteškoće pri detektiranju udara niskih energija (manjih od 2 J) konvencionalnom EC metodom [8].



Slika 33: Odzivi uzeti iz slike 32. a) odziv neoštećenog uzorka debljine 4 mm, b) i c) su odzivi dobiveni iz oštećenog uzorka na području  $\pm 20$  mm od linije koja prolazi kroz središte udara, d) je odziv dobiven na središtu udara [8]



Slika 34: Prikaz gustoće vrtložnih struja u a) neoštećenom uzorku debljine 4 mm i b) uzorku debljine 4 mm udarenom energijom od 1,8 J [8]

## 6 Zaključak

U ovom je radu prikazana primjena NDT metode vrtložnih struja na CFRP materijal. Metoda se pokazala uspješna u ispitivanju metalnih dijelova konstrukcije zrakoplova, ali i u ispitivanju materijala sa slabijim električnim svojstvima kao što je CFRP. Metodom vrtložnih struja uspješno je karakteriziran CFRP materijal u pogledu određivanja orijentacije vlakana u pojedinom sloju kao i određivanje dubine na kojoj se nalazi pojedini orijentirani sloj. EC metodom također je uspješno određena starost CFRP materijala koja je simulirana periodičkim ciklusima grijanja i hlađenja. Što se tiče unutarnjih oštećenja CFRP materijala kao npr. delaminacije, EC metodom se uspješno detektirala i takva vrsta oštećenja, ali je ipak bolje rezultate pokazala SQUID tehnologija koja je puno osjetljivija od konvencionalne EC metode. Njome su se mogla detektirati puno manja oštećenja nastala udarima relativno malih energija.

Ukupno gledajući EC metoda je podobna za ispitivanje materijala s niskom električnom vodljivošću kao CFRP. Iako je svoju primjenu već našla u redovitom održavanju metalnih dijelova konstrukcije zrakoplova, u području održavanja CFRP konstrukcija ima još mjesta za napredak. Blagu prednost ima SQUID tehnologija kojom je moguće detektirati tek nastala oštećenja uslijed udara koja nisu vidljiva golim okom, a koja se mogu djelovanjem cikličkog opterećenja povećati i rezultirati katastrofalnim posljedicama. Kako se CFRP materijal sve više koristi u proizvodnji zrakoplova sigurno će se u budućnosti sve više pažnje posvećivati ispitivanju CFRP konstrukcija metodom vrtložnih struja što će omogućiti i njen daljnji napredak.

## Literatura

- [1] <http://www.ndt-ed.org>
- [2] <ftp://ftp.technofour.com/pub/catalogs/SDPC.pdf>
- [3] Godbole, U. i Gokhale, A. (2006). Eddy Current Inspection in Aircraft Industry. Dostupno na: <http://www.ndt.net/article/nde-india2006/files/tp-59-pap.pdf>
- [4] Savin, A., Steigmann, R., Iftimie, N., Bruma, A., Rosu, D. i Grimberg, R. (2007). Eddy Current Sensor Array. Application to Non-destructive Evaluation of Carbon-epoxy Composites. Dostupno na: [http://212.8.206.21/article/ENDTdays2007/nde\\_for\\_safety/26.pdf](http://212.8.206.21/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/26.pdf)
- [5] <http://www.seattlepi.com/dayart/20070629/787materials.gif>
- [6] Mook, G., Lange, R. i Koeser, O. (2000). Non-destructive Characterisation of Carbon-fibre-reinforced Plastics by Means of Eddy-currents. Dostupno na: <http://www.sciencedirect.com>
- [7] Bonavolonta, C., Valentino, M. i Peluso, G. (2006). Nondestructive Evaluation Using HTS SQUID Magnetometer to Detect Impact Damage in Carbon Fiber Reinforced Polymers with Different Fiber Orientation. Dostupno na: <http://www.sciencedirect.com>
- [8] Bonavolta, C., Peluso, G. i Valentino, M. (2005). Detection of early stage damage in carbon fiber reinforced polymers for aeronautical applications using an HTS SQUID magnetometer. Dostupno na: <http://www.springerlink.com>