

Ultrazvučno ispitivanje kompozitnih struktura zrakoplovnih konstrukcija

Mandarić, Bojan

Undergraduate thesis / Završni 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:235:455454>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE KOMPOZITNIH STRUKTURA ZRAKOPLOVNIH KONSTRUKCIJA

Mentor:
Prof. dr. sc. Damir Markučić

Student:
Bojan Mandarić 0035146824

Zagreb, 2009

Sadržaj:

1. Uvod	7
2. Kompozitni materijali	8
2.1. Kompoziti.....	8
2.1.1. Matrice.....	9
2.1.2. Ojačavala.....	9
2.2. Vrste kompozita koje najčešće primjenjujemo u praksi.....	10
2.2.1. Kompoziti ojačani vlaknima.....	10
2.2.2. Kompoziti ojačani česticama.....	10
2.2.3. Strukturni kompoziti.....	11
2.3. Granična površina između dvije faze u kompozitima.....	11
2.3.1. Granična površina u vlaknastim kompozitima.....	11
2.3.2. Međupovršina čestica/matrica.....	12
2.4. Dijelovi zrakoplova napravljeni od kompozitnih materijala.....	12
2.5. Strukture kompozita korištenih na zrakoplovima.....	15
3. Ultrazvučna metoda ispitivanja	16
3.1. Princip generiranja ultrazvučnog impulsa.....	16
2.6. Princip ispitivanja.....	16
2.7. Disperzija ultrazvučnih valova.....	17
2.8. Fresnel-ove zone i Fraunhofer-ove zone.....	17
4. Ispitivanje kompozitnih materijala pomoću ultrazvuka	18
4.1. Ultrazvučno ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji.....	18
4.1.2. Oprema za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji.....	18
4.1.3. Opis rada ispitnog sustava.....	20
4.2. Bez kontaktno ultrazvučno ispitivanje kompozitnih materijala.....	21
4.2.1. Rezultati mjerenja hibridnog bez kontaktnog ultrazvučnog ispitivanja.....	23
4.3. Primjena.....	24

5. Ispitivanje kompozitnih materijala u zrakoplovstvu pomoću ultrazvuka.....	25
5.1. Ispitna oprema.....	25
5.2. Prigušenje signala.....	26
5.3. Ispitivanje kompozitne kontrolne površine zrakoplova ultrazvukom.....	26
5.3.1. Priprema za ispitivanje.....	27
5.3.2. Kalibracija ispitne opreme.....	28
5.3.3. Ispitivanje.....	28
6. Rezultati ispitivanja.....	30
6.1. Ispitni uzorak.....	30
6.2. Oprema.....	31
6.3. Ispitivanje sa sondom od 2.25 MHz.....	32
6.3.1. Snimanje karakteristika sonde.....	32
6.3.2. Kalibracija uređaja za sondu od 2.25 MHz.....	33
6.3.3. Ispitivanje točke 1.....	34
6.3.4. Ispitivanje točke 2.....	35
6.3.5. Ispitivanje točke 3.....	36
6.3.6. Ispitivanje točke 4.....	37
6.4. Ispitivanje sa sondom od 5 MHz.....	38
6.4.1. Snimanje karakteristika sonde.....	38
6.4.2. Kalibracija uređaja za sondu od 5 MHz.....	39
6.4.3. Ispitivanje točke 1.....	40
6.4.4. Ispitivanje točke 2.....	40
6.4.5. Ispitivanje točke 3.....	41
6.4.6. Ispitivanje točke 4.....	41
6.5. Ispitivanje sa sondom od 10 MHz.....	42
6.5.1. Snimanje karakteristika sonde.....	42
6.5.2. Kalibracija uređaja za sondu od 10 MHz.....	43
6.5.3. Ispitivanje točke 1.....	44
6.5.4. Ispitivanje točke 2.....	44
6.5.5. Ispitivanje točke 3.....	45
6.5.6. Ispitivanje točke 4.....	46
7. Zaključak.....	47
8. Literatura.....	48

Popis slika:

- Slika 2.1. Faze kompozita [1]
Slika 2.2. Prikaz strukture kompozita [1]
Slika 2.3. Matrica kompozita [1]
Slika 2.4. Primjeri punila/ojačavala [1]
Slika 2.5. Skica raspodjele vlakana [1]
Slika 2.6. Primjer kompozita ojačanog česticama (automobilska guma) [1]
Slika 2.7. Primjer strukturnih kompozita [1]
Slika 2.8. Granična površina između dvije faze u kompozitima [1]
Slika 2.9. Dijelovi zrakoplova napravljeni od kompozita [2]
Slika 2.10. Prikaz i oznake dijelova napravljeni od kompozita [2]
Slika 2.11. Strukture kompozita korištenih u zrakoplovu [2]
- Slika 3.1. Dobiveni odzivi [2]
Slika 3.2. Intenzitet polja duž centralne osi [3]
- Slika 4.1. Oprema za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji [3]
Slika 4.2. a) Prikazuje propagaciju ultrazvučnih valova $81.6 \mu\text{s}$ nakon pulsa transmitera u materijalu bez defekata
b) Prikazuje propagaciju ultrazvučnih valova $96.8 \mu\text{s}$ nakon pulsa transmitera u materijalu bez defekata [4]
Slika 4.3. Prikazuje propagaciju ultrazvučnih valova $28.4 \mu\text{s}$ nakon pulsa transmitera u materijalu sa defektom [4]
Slika 4.4. Prikazuje propagaciju ultrazvučnih valova $37.6 \mu\text{s}$ nakon pulsa transmitera u materijalu kod kojeg je došlo do delaminacije [4]
Slika 4.5. Prikazuje ultrazvučnu opremu za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji [5]
Slika 4.6. Prikazuje smještaj piezo-električnih diskova na valjku [5]
Slika 4.7. Osjetljivost mikrofona po frekvencijama [5]
Slika 4.8. a) Prikazuje materijal bez defekta
b) Prikazuje materijal kod kojega imamo delaminaciju [5]
Slika 4.9. Usporedba klasičnog ultrazvučnog ispitivanja (u ovome slučaju sonda je odmaknuta od kompozita, zato koristimo mlaz vode) i bezkontaktnog ultrazvučnog ispitivanja [6]
Slika 4.10. Prikazuje komponente hibridnog bezkontaktnog ultrazvuka [6]
Slika 4.11. Primjena uređaja u pogonu [6]
Slika 4.12. Dijagram prikazuje širenje akustičnog vala u kompozitu bez defekta, lijepo se može vidjeti akustični puls [6]
Slika 4.13. Dijagram prikazuje širenje akustičnog vala u kompozitu sa defektom, akustični puls jedva se primjećuje [6]
- Slika 5.1. a) Karakteristični signali ultrazvučnih odziva u slučaju bez defekta
b) Karakteristični signali ultrazvučnih odziva u slučaju delaminacije [2]
Slika 5.2. Prigušenije signala [2]
Slika 5.3. Potrebna oprema i priručnici za ultrazvučno ispitivanje [2]
Slika 5.4. Poprečni presjek kompozitne kontrolne površine zrakoplova [2]
Slika 5.5. Kalibriranje ultrazvučne opreme [2]
Slika 5.6. Ispitivanje kontrolne površine zrakoplova [2]
Slika 5.7. Otkrivena delaminacija materijala [2]

Slika 6.1. Kompozitni dio zrakoplova na kojemu su vršena ispitivanja
Slika 6.2. lijepljeni dio na strukturi
Slika 6.3. Potrebna oprema za ispitivanje
Slika 6.4. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 2.25 MHz
Slika 6.5. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 2.25MHz
Slika 6.6. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 2.25MHz
Slika 6.7. Točka 1
Slika 6.8. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 2.25 MHz
Slika 6.9. Točka 2
Slika 6.10. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 2.25 MHz
Slika 6.11. Točka 3
Slika 6.12. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 2.25 MHz
Slika 6.13 Točka 4
Slika 6.14. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 2.25 MHz
Slika 6.15. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 5 MHz
Slika 6.16. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 5MHz
Slika 6.17. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 5MHz
Slika 6.18. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 5 MHz
Slika 6.19. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 5 MHz
Slika 6.20. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 5 MHz
Slika 6.21. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 5 MHz
Slika 6.22. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 10 MHz
Slika 6.23. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 10 MHz
Slika 6.24. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 10 MHz
Slika 6.25. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 10 MHz
Slika 6.26. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 10 MHz
Slika 6.27. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 10 MHz
Slika 6.28. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 10 MHz

Popis tablica:

Tablica 2.1. Popis dijelova napravljeni od kompozita [2]

Tablica 5.1. Potrebna oprema za ultrazvučno ispitivanje [2]

1. UVOD

Cilj ovoga rada jest elaborirati ultrazvučno ispitivanje kompozitnih struktura zrakoplovnih konstrukcija. Danas su kompozitni materijali, zbog svojih povoljnih svojstava vrlo zastupljeni u zrakoplovstvu, pa je tako trup zrakoplova Boeing 787 napravljen od kompozita. Negativna strana kompozita jest u tome što se dosta teško otkrivaju defekti i delaminacije. Kod metalnih konstrukcija u pravilu postoje neke naznake popuštanja, poput deformacija, promjena poprečnog presjeka ili pojava pukotina koje se mogu detektirati nerazornim (NDT) metodama. Kod kompozita nije takav slučaj, konstrukcija može izgledati besprijekorno, a nije u stanju nositi opterećenja za koja je predviđena. Drugi problem jest starenje konstrukcija. Za metalne konstrukcije postoje dugogodišnja iskustva i s priličnom sigurnošću se može odrediti ponašanje konstrukcije tijekom godina, što nije slučaj za kompozite.

Iz ovoga se zaključuje koliko je važno kvalitetno ispitivanje kompozita.

Postoji više ispitnih metoda koje se koriste za inspekciju kompozita, ovdje su nabrojane neke od njih, a u nastavku rada, opisivati će se samo ultrazvučna metoda.

Ispitivanje lupkanjem (eng. Tap test) - ova metoda ispitivanja zasniva se na tome da lupkanje s metalnim predmetom po kompozitu odaje karakterističan zvuk. U slučaju promjene tog zvuka, zaključuje se da je u materijalu defekt.

Ispitivanje X-zrakama - ova metoda ispitivanja načelno je ista kao i u medicini. Kompozitni materijal se postavi između izvora X-zraka i filma osjetljivog na X-zrake. Film se prvo eksponira (latentna slika), a po kemijskoj obradi filma (pomoću razvijaača i fiksira) razvije se slika u vidu različitih zacrnjena na radiogramu.

Ispitivanje infracrvenom kamerom – ovom metodom otkrivamo zarobljenu vodu u sačastoj strukturi kompozita. Ispitivanje se provodi tako da se snima temperaturna raspodjela na površini pomoću infracrvene kamere. Uz prirodne ili narinute procese grijanja ili hlađenja promatranog uzorka, na mjestima gdje se voda nalazi u uzorku pojaviti će se područja različite temperature na površini.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Kompoziti

Kompoziti (lat. compositus – sastavljen) - su kombinacije dva ili više istovrsnih ili različitih materijala sastavljenih radi postizanja:

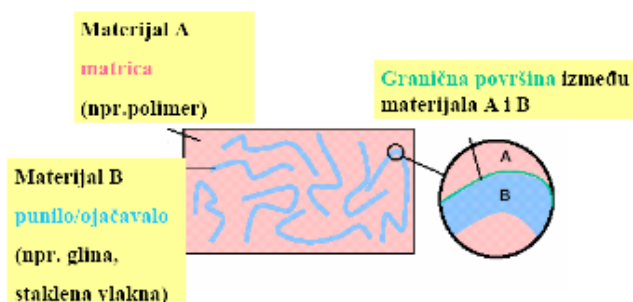
- nove vrijednosti postojećeg svojstva (npr. povećana žilavost, čvrstoća, otpornost na habanje, nepropusnost plinova ili kapljevine)
- nove vrste svojstva (koju svaki materijal za sebe ne posjeduje)
- željene promjene svojstava (npr. promjenom volumnog udjela pojedinog sastojka kompozitnog materijala može se kontinuirano mijenjati svojstvo kompozita i dobiti svojstvo identično svojstvu nekog drugog materijala) [1].



Slika 2.1. Faze kompozita [1]

Kompoziti su višefazni sustavi, s jasno izraženom, mikroskopski ili makroskopski vidljivom granicom faza. Svaki kompozit sastoji se od:

- kontinuirane faze - matrica
- diskontinuirane faze - ojačavalo
- granične površine između dvije faze
- međufaze [1]

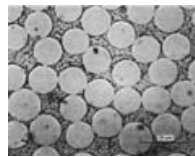


Slika 2.2. Prikaz strukture kompozita [1]

2.1.1. Matrice

Uloga matrice jest da raspodijeli i prenosi opterećenja između ojačavala (vlakana). Matrice se rade od različitih materijala, a mogu biti:

- metali (Al, Ti..)
- keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 ...)
- polimeri (epoksidi, poliesteri...) [1]



Slika 2.3. Matrica kompozita [1]

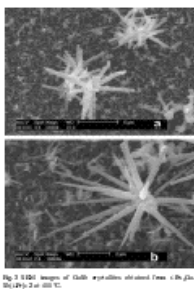
2.1.2. Ojačavala

Uloga ojačavala jest da prenose opterećenja, a napravljeni su od različitih materijala, ovisno o uvjetima primjene kompozita.

- vlakna:



- viskeri:



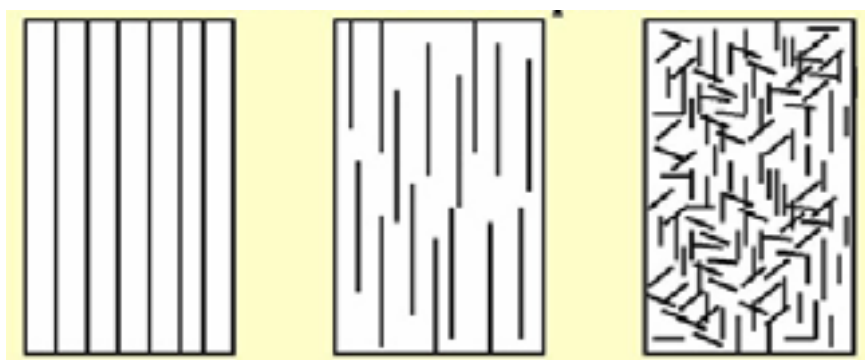
Slika 2.4. Primjeri ojačavala [1]

2.2. Vrste kompozita koje najčešće primjenjujemo u praksi

2.2.1. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima su tehnološki najvažniji i kao takvi najčešće se primjenjuju. Kod ovakvih kompozita poredak, orijentacija, koncentracija i raspodjela vlakana imaju značajan utjecaj na svojstva kompozita. Značajan utjecaj na svojstva kompozita imaju i materijali od kojih su sačinjena vlakna, pa tako mogu biti metalna, keramička, staklena, ugljikova, polietilenska (Spectra), aramidna (Kevlar) vlakna...

Nedostatci ovih kompozita su kompliciraniji postupci proizvodnje, ovdje se prije svega misli na homogenost strukture. Vrlo je teško postići jednoliku orijentaciju, koncentraciju i raspodjelu vlakana po presjeku.



Kontinuirana
jednosmjerno
poredana vlakna

Diskontinuirana (kratka),
jednosmjerno
poredana vlakna

Diskontinuirana
nasumično
orijentirana vlakna

Slika 2.5. Skica raspodjele vlakana [1]

Kod primjene kompozita mora se paziti na orijentaciju vlakana u odnosu na smjer djelovanja sile, zato jer vlakna imaju visoki modul elastičnosti uzduž njihove osi ali mali modul u smjeru okomitom na os.

2.2.2. Kompoziti ojačani česticama

Kompoziti se ojačavaju česticama kako bi postigli povećanje modula matrice, smanjenje propusnosti matrice, smanjenje rastezljivosti ili smanjenje cijene proizvodnje. Jedan od primjera kompozita ojačanih česticama su automobilske gume gdje se u polimernu matricu dodaju čestice čađe.



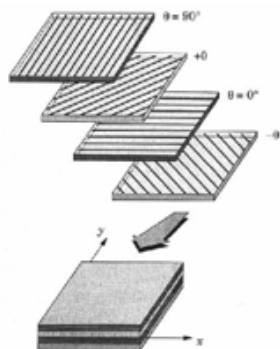
Slika 2.6. Primjer kompozita ojačanog česticama (automobilska guma) [1]

Materijal koji isto možemo nazvati kompozit ojačan česticama jest beton, gdje pijesak i šljunak dodajemo matrici cementa [1].

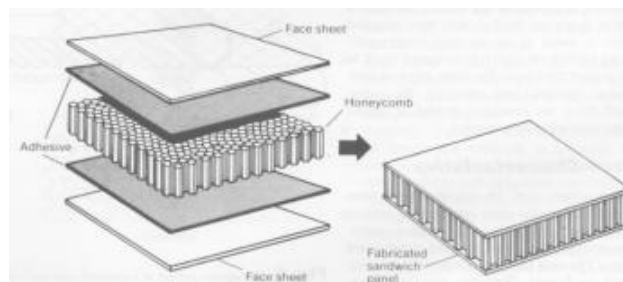
2.2.3 Strukturni kompoziti

Kompoziti koji su često zastupljeni u zrakoplovstvu su strukturni kompoziti. Ovi kompoziti se donekle razlikuju od do sada spomenutih, jer nemaju klasično pomiješanu matricu i ojačavala, već su složeni u određene strukture.

- laminati



- “sendvič” ploče



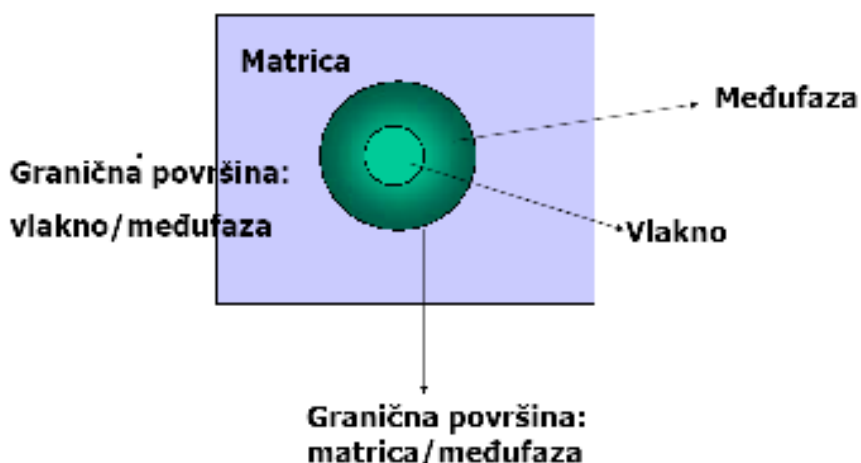
Slika 2.7.. Primjer strukturnih kompozita [1]

2.3. Granična površina između dvije faze u kompozitima

Granična površina između dvije faze može postojati u dva slučaja:

1. Površina između dvije međusobno netopljive i kemijski različite faze koje su u ravnoteži.
2. Površina između dvije mješljive komponente koje još nisu dostigle ravnotežu (npr. zbog velike viskoznosti).

- mehanička svojstva kompozita - odraz interakcija između različitih faza [1].



Slika 2.8. Granična površina između dvije faze u kompozitima [1]

2.3.1. Granična površina u vlaknastim kompozitima

Granična površina nastaje kontaktom vlakna (ojačala) i matrice, ona je veza između vlakna i matrice koja omogućava prijenos naprezanja (opterećenja). Njezina fizikalna i mehanička svojstva su jedinstvena i različita od svojstava bilo matrice bilo vlakana. Kod analize kompozita uzima se da je površina beskonačno tanka (debljina ili volumen ≈ 0).

Važno je za napomenuti da za dani volumni udio ojačala ukupna međufazna površina raste kako se promjer vlakana/veličina čestica smanjuje.

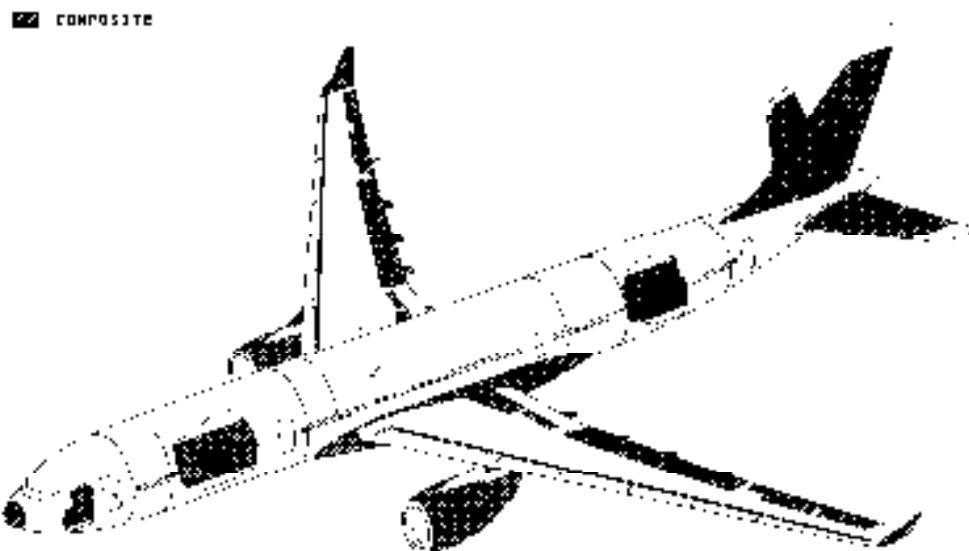
Za dani promjer i volumni udio ojačala kompozit s česticama ima veću međufaznu površinu od vlaknastog kompozita [1].

2.3.2. Međupovršina čestica/matrica

Međupovršina čestica je područje od kojeg se lokalna svojstva vlakana počinju mijenjati u odnosu na svojstva vlakana u masi, preko površine na granici faza do dijela matrice gdje su lokalna svojstva jednaka svojstvima u masi matrice [1].

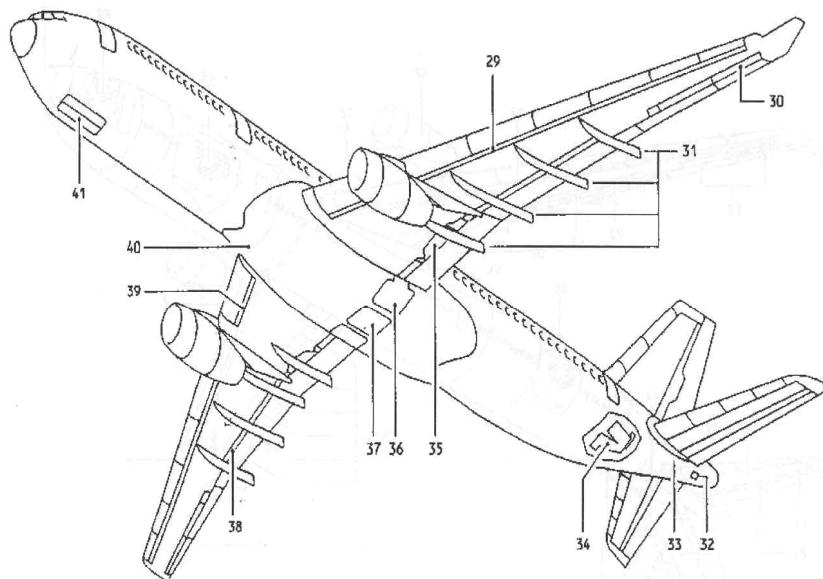
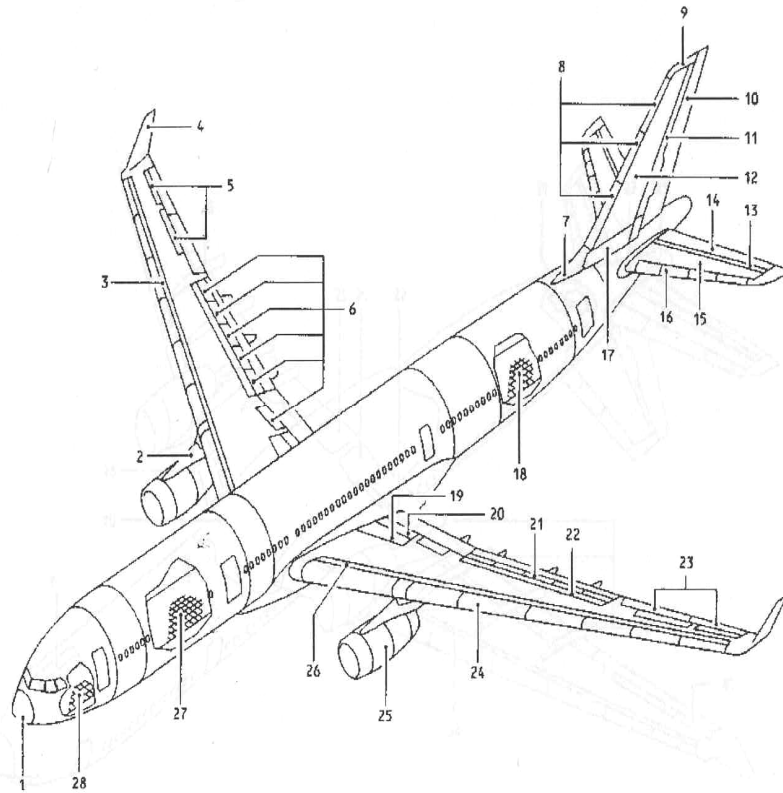
2.4. Dijelovi zrakoplova napravljeni od kompozitnih materijala

Kao što je već ranije navedeno u uvodu, danas je sve veći udio kompozitnih materijala u zrakoplovima. Na slici 2.9. vidi se koji su dijelovi napravljeni od kompozita i kao što se može primijetiti većina tih dijelova su kontrolne površine koje su izložene velikim opterećenjima.



Slika 2.9. Dijelovi zrakoplova napravljeni od kompozita [2]

Na slici 2.10. označeni su neki od kompozitnih dijelova na zrakoplovu Airbus A-330, odnosno dijelovi koji se ispituju NDT metodama.



Slika 2.10. Prikaz i oznake dijelova napravljeni od kompozita [2]

Tablica 2.1. Popis dijelova napravljeni od kompozita [2]

Broj	Dio zrakoplova	Kompozitni materijal
1.	Nos	AFRP
2.	Pilon motora	AFRP/GFRP
3.	Napadni rub	GFRP
4.	Vrhovi krila (wing tip)	CFRP/GFRP
5.	Paneli zakrilca	CFRP
6.	Spojler	CFRP
7.	Korijen vertikalnog stabilizatora	CFRP/GFRP
8.	Napadni rub vertikalnog stabilizatora	CFRP/GFRP
9.	Vrh vertikalnog stabilizatora	GFRP
10.	Kormilo smjera	CFRP/GFRP
11.	Stražnji rub vertikalnog stabilizatora	GFRP
12.	Trup vertikalnog stabilizatora	CFRP/GFRP
13.	Stražnji rub horizontalnog stabilizatora	CFRP
14.	Kormilo visine	CFRP
15.	Trup horizontalnog stabilizatora	CFRP/GFRP
16.	Napadni rub horizontalnog stabilizatora	CFRP
17.	Paneli vertikalnog stabilizatora	GFRP
18.	Podna ploča teretnog odjela	GFRP
19.	Paneli za pristup mehanizmu zakrilca	CFRP
20.	Paneli za pristup zakrilcu	CFRP
21.	Flaps	CFRP
22.	Stražnji rub krila	CFRP
23.	Zakrilce	CFRP
24.	Predkrilce	CFRP
25.	Kućište motora	CFRP
26.	Unutrašnji dio napadnog ruba krila	CFRP/GFRP
27.	Podna ploča putničkog odjeljka	GFRP
28.	Podna ploča odjeljka za avioniku	GFRP
29.	Paneli napadnog ruba krila	CFRP/GFRP
30.	Paneli stražnjeg ruba krila	CFRP
31.	Vodilice flapsova	CFRP
32.	Vrata pomoćnog motora (APU)	GFRP
33.	Korijen horizontalnog stabilizatora (Apron)	CFRP
34.	Paneli za pristup opremi	GFRP
35.	Paneli za pristup mehanizmu flapsova	CFRP
36.	Vrata glavnog stajnog trapa	CFRP
37.	Paneli za pristup stajnom trapu	CFRP/GFRP
38.	Paneli za pristup mehanizmu zakrilca	CFRP
39.	Paneli za pristup mehanizmu predkrilca	CFRP/GFRP
40.	Spoj krila i trupa	CFRP/GFRP
41.	Vrata prednjeg stajnog trapa	CFRP

CFRP (carbon fiber reinforced plastic) - kompozit od ugljičnih vlakana, koristi se za visoko opterećene konstrukcije, poput vertikalnog i horizontalnog stabilizatora

GFRP (glass fiber reinforced plastic) - kompozit od staklenih vlakana, koristi se za manje opterećene konstrukcije, poput inspeksijskih panela ili podnih ploča

2.5. Strukture kompozita korištenih na zrakoplovima

Na zrakoplovima se koriste dvije vrste struktura kompozita, a to su sendvič strukture (eng. sandwich design) i monolitne strukture (eng. monolithic design).

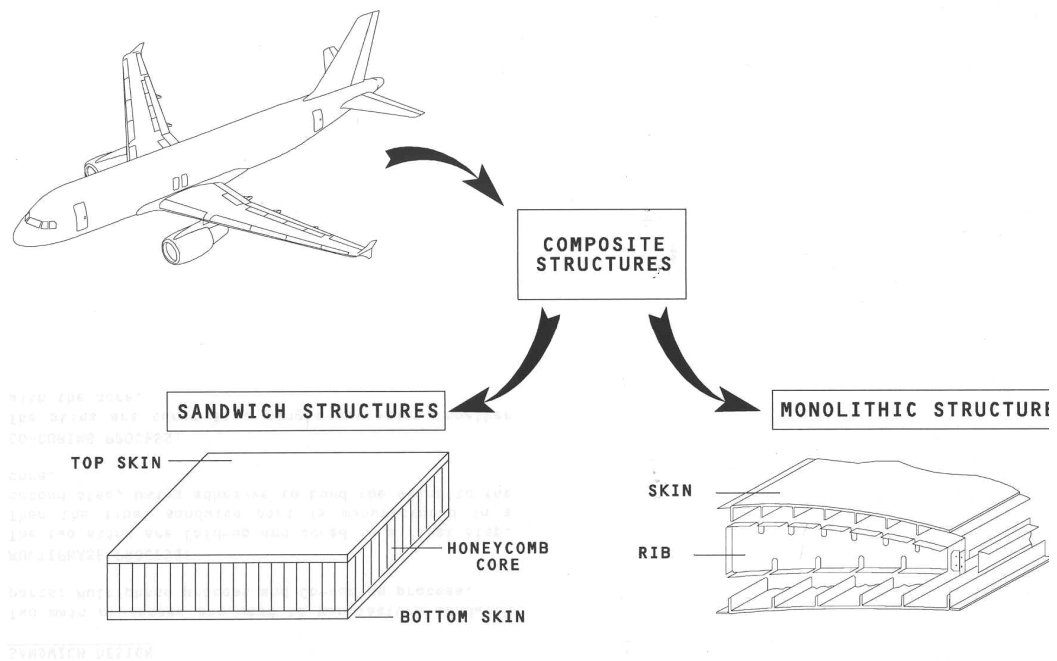
Sendvič strukture (eng. sandwich design)

- sastoje se od dvije tanke paralelne ploče s debelom jezgrom između njih. Ove strukture najčešće se upotrebljavaju tamo gdje je potrebna mala masa i dobra otpornost na savijanje, tako je na većini današnjih zrakoplova podna ploča sendvič struktura.

Monolitne strukture (eng. monolithic design)

- ove strukture su zapravo kompoziti ojačani vlaknima, a koriste se za visoko opterećene dijelove zrakoplova poput kontrolnih površina.

Primjer tih struktura je prikazan na slici 2.11.



Slika 2.11. Strukture kompozita korištenih u zrakoplovu [2]

3. ULTRAZVUČNA METODA ISPITIVANJA

3.1. Princip generiranja ultrazvučnog impulsa

Najrasprostranjeniji generator ultrazvuka je kvarcni generator, čiji je rad zasnovan na tzv. piezoelektričnom efektu. To je pojava kada se na nekim kristalima (kvarc, turmalin i dr.), pogodno odrezanima, javlja električna polarizacija kada se silom izvrši elastična deformacija. Umjesto da se djeluje silom, može se postići obrnut efekt stavljanjem pločica u izmjenično električno polje vrlo visoke frekvencije. Kada se frekvencija izmjeničnog napona poklopi sa svojstvenom (vlastitom) frekvencijom kvarcne pločice, nastupa rezonancija. Uslijed rezonancije, pločica titra i proizvodi ultrazvučne valove. Upotrebom turmalina mogu se dobiti ultrazvučne oscilacije i do nekoliko stotina MHz. U ultrazvučnoj nerazornoj metodi ispitivanja piezoelektrični generator, odnosno pretvornik u sondi ima primopredajničku ulogu.

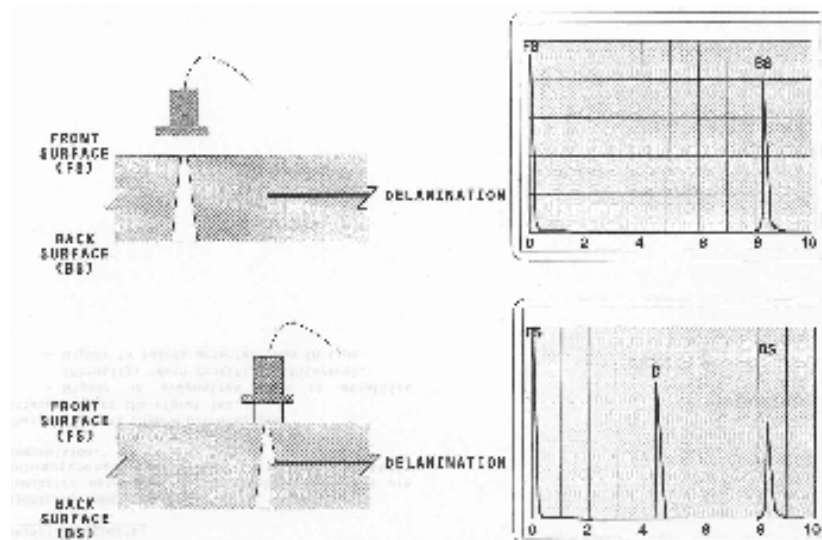
3.2. Princip ispitivanja

Kao što je već spomenuto u prethodnom poglavlju, ultrazvučni generator proizvodi izmjenično električno polje vrlo visoke frekvencije, koje se u sondi pretvara u mehaničku energiju, odnosno ultrazvučne valove.

Ultrazvučni valovi prenose se u ispitni materijal, gdje propagiraju određenom brzinom. Brzina ultrazvučnog vala u nekom materijalu ovisi o gustoći i elastičnosti tog materijala.

U slučaju materijala bez defekata, ultrazvučni valovi propagiraju do stražnje površine gdje se odbijaju i vraćaju u sondu, a na zaslonu uređaja s A prikazom se vidi samo odziv impulsa od stražnje površine.

Ako materijal ima neki defekt, odnosno delaminaciju, kako je prikazano na slici 3.1. većina ultrazvučnih valova se odbija od nje, tako da je refleksija od stražnje stjenke znatno slabijeg intenziteta.



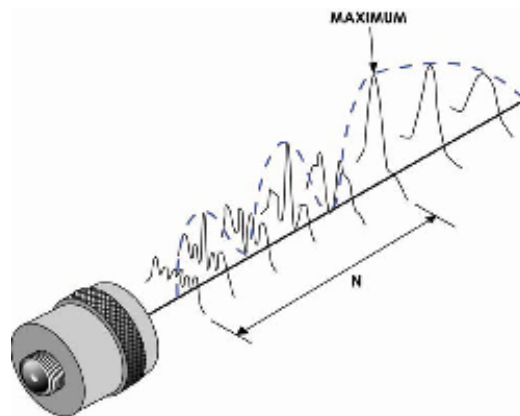
Slika 3.1. Dobiveni odzivi [2]

3.3. Disperzija ultrazvučnih valova

Disperzija ili raspršenje ultrazvučne energije u materijalu uzrokovano je nehomogenošću materijala. Ovaj podatak je vrlo važan za strukturne kompozite, jer kako je utvrđeno ispitivanjem, tamo gdje je sačasta struktura kompozita, nisu dobiveni odzivi impulsa koji bi nam ukazivali na određenu detekciju.

3.4. Fresnel-ove zone i Fraunhofer-ove zone

Izrazito jaka promjena zvučnog intenziteta se javlja u zoni neposredno ispred sonde. Ovo područje jako promjenljivog intenziteta se naziva blisko polje ili *Fresnel-ova* zona, na slici 3.2. označeno s N. Duljina bliskog polja N je udaljenost između odašiljačke plohe sonde i posljednjeg najjačeg maksimuma koji se formira na centralnoj liniji ultrazvučnog snopa [3].



Slika 3.2. Intenzitet polja duž centralne osi [3]

Izraz za izračunavanje duljine bliskog polja N ovisi o geometriji pretvarača. Za pretvarače kružnog oblika:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot v}$$

N – blisko polje ili Fresnelova zona

D_{ef} - efektivni promjer pretvarača (za praksu: $D_{ef} = 0.97 D_0$)

D_0 - nazivni promjer sonde

f – frekvencija

λ - valna duljina

v – brzina ultrazvuka

Na udaljenosti većoj od jedne duljine bliskog polja, ultrazvučni snop se širi. Razlika u fazi s kojom ultrazvučni valovi pristižu u točke prostora dalekog polja nije više tako velika pa se gubi izraziti utjecaj interferencije na intenzitet polja. Na udaljenosti približnoj 3N intenzitet ultrazvuka na centralnoj osi je reducirano proporcionalno recipročnoj linearnoj vrijednosti udaljenosti, a snop se širi uz konstantni kut divergencije. Ovo područje snopa naziva se daleko polje ili *Fraunhofer-ova* zona [3].

4. ISPITIVANJE KOMPOZITNIH MATERIJALA POMOĆU ULTRAZVUKA

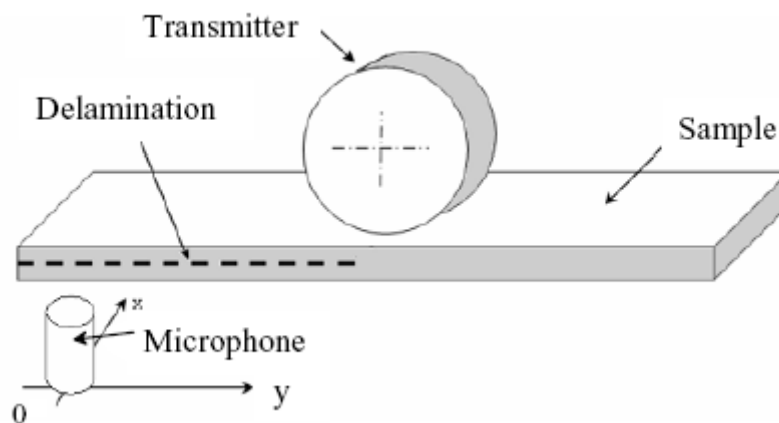
4.1. Ultrazvučno ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji

Kompozitne trake često se koriste kao elastični elementi, na primjer, opruge. Osim čvrstoće jedna od važnih karakteristika kompozitnih traka jest otpornost na dinamička opterećenja. Kako bi se zadovoljila ta svojstva u kompozitnoj traci ne smije doći do delaminacije slojeva.

Razvoj ultrazvučnog ispitivanja omogućio je ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji, što uvelike smanjuje troškove i vrijeme proizvodnje. Ultrazvučno ispitivanje na proizvodnoj liniji razlikuje se od ispitivanja provedenog u okviru ovoga rada po tome što se ne koristi klasična sonda, već je s jedne strane kompozitne trake kotač-sonda koji je odašiljač (transmitter) ultrazvučnih valova, a s druge strane trake je postavljena sonda prijemnik (microphone). Kotrljanjem sonde-kotača po kompozitnoj traci osiguran je kontinuirani kontakt sonde s ispitnom površinom, odnosno kontinuirano ispitivanje duž trake. Ovakvom postavkom ispitivanja primijenjena je tehnika ispitivanja prozvučivanjem, a mikrofonom je na površini stražnje stjenke trake detektirana raspodjela amplituda osciliranja kao odziv pobudnog ultrazvučnog impulsa koji je odaslala sonda-kotač.

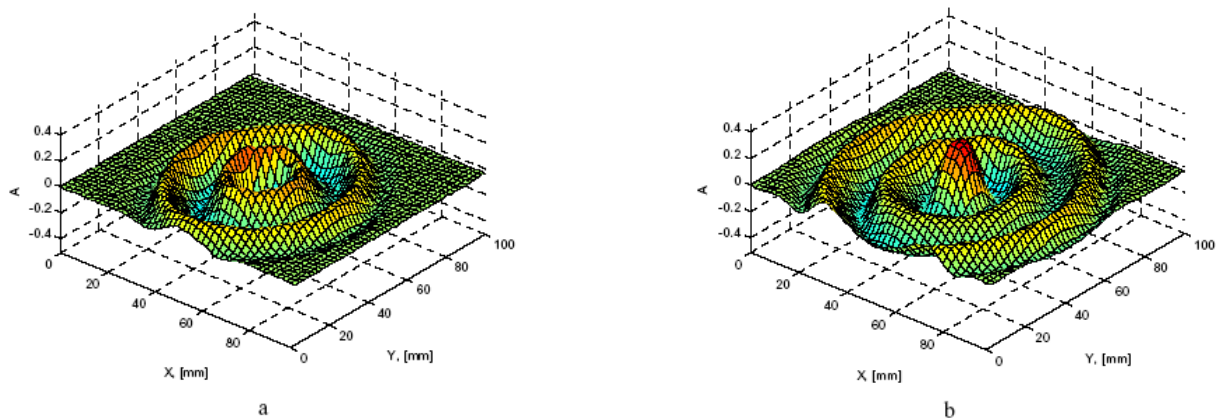
4.1.2. Oprema za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji

Kotač od piezo-električnog kristala generira ultrazvučne impulse nazivne frekvencije 40 kHz, koji prolaze kroz kompozitnu traku i s druge strane trake te impulse detektira mikrofonski za veliki raspon frekvencija.



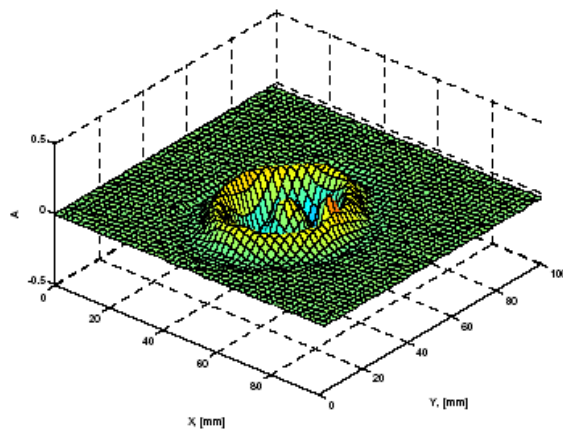
Slika 4.1. Oprema za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji [4]

Na slici 4.2. prikazan je odziv ultrazvučnih impulsa na površini stražnje stjenke trake nakon propagacije impulsa kroz materijal bez defekta i kroz materijal s defektom.



Slika 4.2. a) Prikazuje odziv ultrazvučnih impulsa 81.6 μs nakon odašiljanja u materijalu bez defekata
b) Prikazuje odziv ultrazvučnih impulsa 96.8 μs nakon odašiljanja u materijalu bez defekata [4]

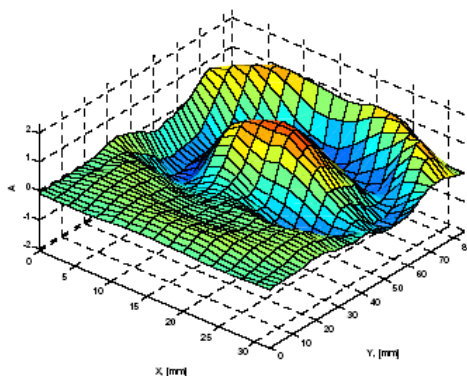
Kao što se vidi u materijalu bez defekata propagacija impulsa i površinska raspodjela amplituda je neometana, što nije slučaj u sljedećem primjeru gdje se u materijalu nalazi defekt.



Slika 4.3. Prikazuje odziv ultrazvučnih impulsa 28.4 μs nakon odašiljanja u materijalu s defektom [4]

U ovome slučaju propagacija valova je ometana defektom (uvrt promjera 2 mm), što se vidi na slici 4.3.

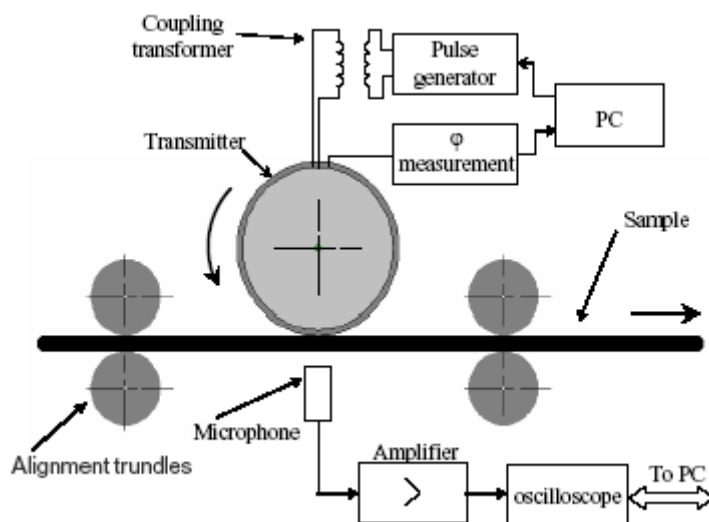
U slučaju delaminacije propagacija valova znatno je više ometana nego u slučaju uvrta, što je prikazano na slici 4.4.



Slika 4.4. Prikazuje odziv ultrazvučnih impulsa 37.6 μ s nakon odašiljanja impulsa u materijal u kojem postoji delaminacija [4]

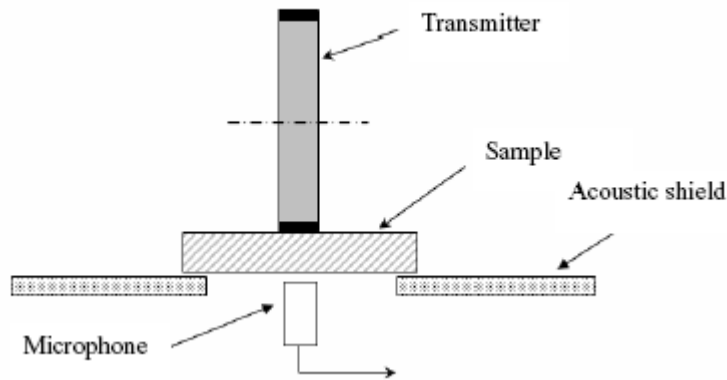
4.1.3. Opis rada ispitnog sustava

U ovome poglavlju upoznat ćemo se sa ultrazvučnom opremom, i detaljnije ćemo pogledati kakve odzive dobivamo na osciloskopu, prije nego što ih obradimo na računalu.



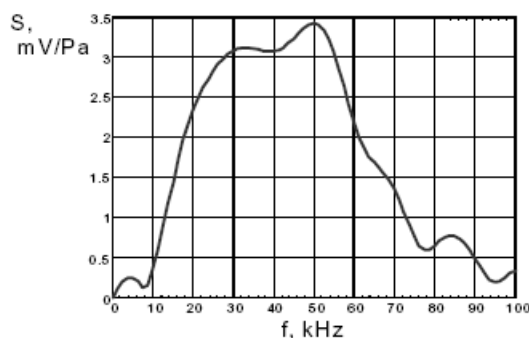
Slika 4.5. Prikazuje ultrazvučnu opremu za ispitivanje kompozitnih traka na proizvodnoj liniji [5]

Za potrebe ovog ispitivanja sonda-kotač je dizajnirana kao aluminijski valjak promjera 60 mm i debljinom stijenke 4 mm. Na baze valjka nalijepljeni su piezo-električni pretvornici (transmitter), a preko tarne površine valjka nalijepljena je guma, kako bi se pretvornici zaštitili od trošenja. Odašiljački pretvornici izrađeni su od piezo-električnog materijala s malim rasponom frekvencija, kojemu je središnja (nazivna) frekvencija otprilike 40 kHz. [5].



Slika 4.6. Smještaj mikrofona i piezo-električnih pretvornika na valjku [5]

S druge strane kompozitne trake nalazi se prijemnik mikrofona. Područje rada mikrofona je od 20 kHz do 60 kHz. Ovakav, široki raspon frekvencija osigurava pouzdaniji prijem signala za odabrani transmitter. Na slici 4.7. prikazana je frekvencijska odzivna karakteristika mikrofona.

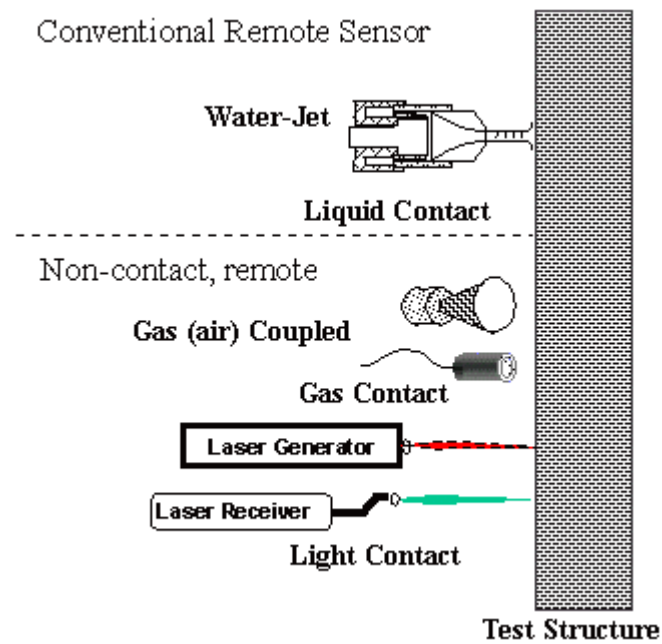


Slika 4.7. Osjetljivost mikrofona po frekvencijama [5]

4.2. Bez kontaktno ultrazvučno ispitivanje kompozitnih materijala

Relativno nova metoda za ultrazvučno ispitivanje kompozitnih materijala je bez kontaktno ultrazvučno ispitivanje [6]. Nalazi se još u eksperimentalnoj fazi i kao takva nije u široj komercijalnoj primjeni, no prema rezultatima ispitivanja prednosti ove metode pred klasičnom metodom ispitivanja su značajne.

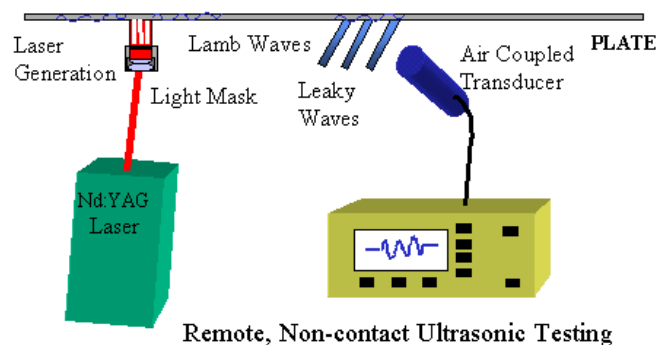
Najveća prednost ove metode je to što ne treba biti ostvaren fizički kontakt između ultrazvučne sonde i površine ispitnog objekta, npr. kompozita, već se sonda nalazi na određenoj udaljenosti od kompozita. To je posebno pogodno na proizvodnim linijama, gdje se stoga može ispitivati kompozitna struktura bez zaustavljanja proizvodnog procesa, odnosno bez postavljanja kompleksnog uređaja spomenutog u poglavlju prije. Problem bez kontaktnog ultrazvučnog ispitivanja je zvučna impedancija ispitnog materijala. Temeljem vrijednosti zvučne impedancije ispitnog materijala proizlazi koliki će biti udio prolazne (transmitirane) i reflektirane energije ultrazvuka pri prijelazu iz prvog sredstva (zrak) u drugo sredstvo podvrgnuto ispitivanju. U slučaju kada bi akustična impedancija dvaju materijala bila jednaka, na granici između njih ne bi došlo do refleksije ultrazvuka. Suprotno ovome, na granici npr. čelika prema zraku javljat će se maksimalna refleksija radi velike razlike akustičnih impedancija čelika i zraka. Ovisno o primijenjenoj tehnici ultrazvučne metode detekcija nepravilnosti se može temeljiti na detekciji refleksije ili transmisije promatranih ultrazvučnih impulsa.



Slika 4.9. Usporedba konvencionalnog ultrazvučnog ispitivanja i ("bez kontaktno" kroz stupac vode - mlaz vode) i bez kontaktnog ultrazvučnog ispitivanja [6]

Laserski bez kontaktni ultrazvuk sastoji se od dva uređaja [6]. Laser (eng. ultrasound laser) odašiljanjem laserskih impulsa prema ispitnoj površini pobuđuje ultrazvučne impulse u ispitnom materijalu. Ocjenjivanje i analiza ispitivane strukture temelji se na praćenju odziva ultrazvučnih impulsa na površini materijala također pomoću laserskog sustava (prijemnika), odnosno "svjetlosnih" impulsa.

Kod hibridnog sustava ultrazvučni odzivi se prate, umjesto laserom, ultrazvučnom sondom, ali također bez kontaktno prilagođene akustične impedancije tako da se prijem može provoditi kroz zrak, dakle sonda je odmaknuta od ispitnog objekta tj. nije u kontaktu. Radna frekvencija je 1.3 MHz. Ovakav uređaj zbog svojih malih dimenzija i mase vrlo je pogodan za ispitivanje u pogonu i u zrakoplovnim hangarima.



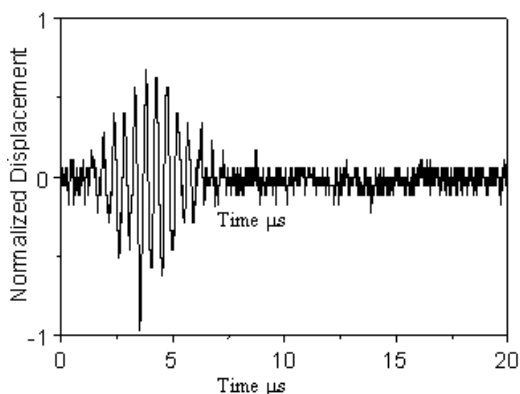
Slika 4.10. Prikazuje komponente hibridnog bez kontaktnog ultrazvuka [6]



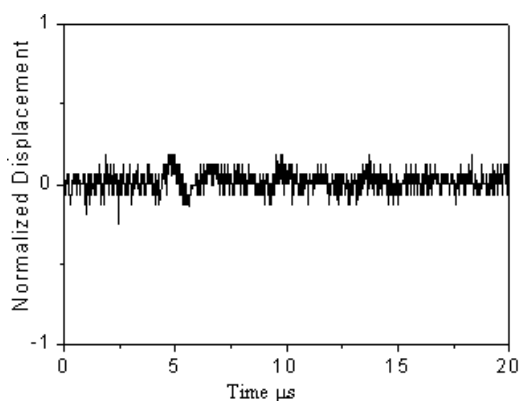
Slika 4.11. Primjena uređaja u pogonu [6]

4.2.1. Rezultati hibridnog bez kontaktnog ultrazvučnog ispitivanja

Na slikama 4.12. i 4.13. prikazan je odziv površine u vremenskoj domeni, odnosno širenje površinskog akustičnog vala u jedinici vremena. U prvom dijagramu prikazan je rezultat ispitivanja kompozita bez defekata, odnosno prikaz akustičnog impulsa za slučaj nesmetanog normalnog širenja površinskog vala. Drugi dijagram prikazuje širenje valova u slučaju delaminacije kompozita. Kao što se vidi u kompozitu s defektom akustični impuls se jedva primjećuje.



Slika. 4.12. Dijagram prikazuje širenje površinskog akustičnog vala po kompozitu bez defekta, lijepo se može vidjeti akustični puls [6]



Slika. 4.13. Dijagram prikazuje širenje površinskog akustičnog vala u kompozitu sa defektom, akustični puls jedva se primjećuje [6]

4.3. Primjena

Hibridni bez kontaktni ultrazvuk koristi površinske valove za podpovršinsku detekciju defekata u kompozitu. Sistem se bazira na ultrazvučnom laseru (laser ultrasonic generator) i ultrazvučnoj sondi (air coupled transducer) nazivne frekvencije 1.3 MHz, kako bi se postiglo bezkontaktno ispitivanje. Prednost ovoga načina ispitivanja je mogućnost ispitivanja veće površine materijala bez potrebe za skeniranjem. Ova metoda ispitivanja primjenjuje se u zrakoplovstvu, jer se može brže nego konvencionalnim ručnim ultrazvučnim ispitivanjem, ispitati površine kompozita na zrakoplovu, bez posebne pripreme materijala za inspekciju. Kod svake inspekcije zrakoplova također se mora uzeti u obzir da se pregledi provode u hangaru u kojem uvjeti nisu istovjetni laboratorijskim uvjetima što zahtijeva jednostavnost i robusnost primijenjene metode ili tehnike nerazornog ispitivanja.

5. ISPITIVANJE KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVSTVU POMOĆU ULTRAZVUKA

5.1. Ispitna oprema

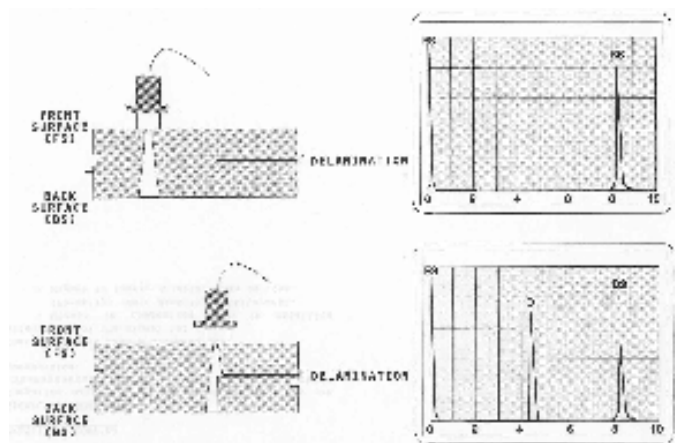
Ultrazvučno ispitivanje se uglavnom primjenjuje na monolitne kompozitne strukture, zato jer sačaste strukture nisu pogodne za propagaciju ultrazvučnih valova. Kod monolitnih struktura uz odgovarajuće ultrazvučne parametre ispitivanje je relativno jednostavno. Potrebno je poznavati debljinu i geometriju ispitnog uzorka, te brzinu propagacije ultrazvučnog vala i koeficijent prigušenija ultrazvuka u promatranoj kompozitnoj strukturi.

U slučaju zdravog materijala bez delaminacija, na zaslonu uređaja s A prikazom, uz pobudni signal (FS) biti će prisutan jedan odziv, tj. signal detektiranog ultrazvučnog impulsa (BS). Tako detektirani signal predstavlja odjek (refleksiju) ultrazvuka od stražnje površine i prikazan je na slici 5.1.a). U materijalu u kojem je došlo do delaminacije, a kada je sonda na rubu detektirane delaminacije, pojavit će se još jedan signal odziva (D) u skladu s prikazom na slici 5.1.b). Razlog tomu je što se dio ultrazvučnog impulsa reflektira s površine delaminacije i vraća u sondu. Kako bi se ispitivanje provelo korektno, koristi se odgovarajuća oprema, za koju vrijede zahtjevi opisani u tablici 5.1.

Oprema	Zahtjevi
Ultrazvučni detektor	Visoka energija (GAIN).
Ultrazvučne sonde	Sonde promjera 12.7mm. 20 mm podložak (delay shoe). Najmanja frekvencija 5 MHz.
Uzorci za kalibriranje	Za kontinuirano jednosmjerno orijentirana vlakna kompozita, koristimo etalon debljine od 1 do 7mm. Za tkana vlakna kompozita (fabric materijal), koristimo etalon debljine od 1 do 19mm.
Kontaktno sredstvo	Za obojane površine koristimo vodu, ulje, mast. Za neobojane površine koristimo samo vodu.

Tablica 5.1. Potrebna oprema za ultrazvučno ispitivanje [2]

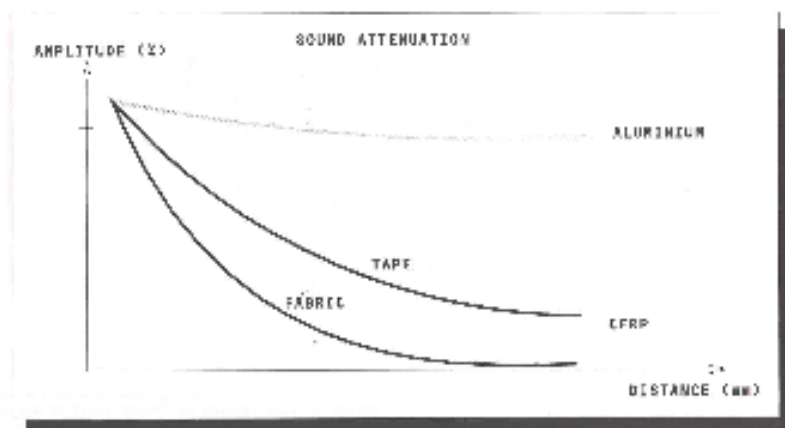
U slučaju kada je detektiran odziv od delaminacije signal odjeka od stražnje strane kompozitne strukture slabijeg je intenziteta tj. amplitude. Kod materijala s delaminacijom veće površine amplituda signala odjeka od delaminacije biti će još veća, a signal odjeka od stražnje strane znatno slabijeg intenziteta ili može u potpunosti izostati, kao što je prikazano na slici 5.1.



Slika 5.1.a) Karakteristični signali ultrazvučnih odziva u slučaju bez defekta
b) Karakteristični signali ultrazvučnih odziva u slučaju delaminacije [2]

5.2. Prigušenije signala

Kompozitni materijali zbog svoje nehomogene strukture znatnije prigušuju signal od metala. Na slici 5.2. imamo usporedbu prigušenja signala kod ispitivanja kompozita i aluminijskog signala kod ispitivanja kompozita i aluminijskog.

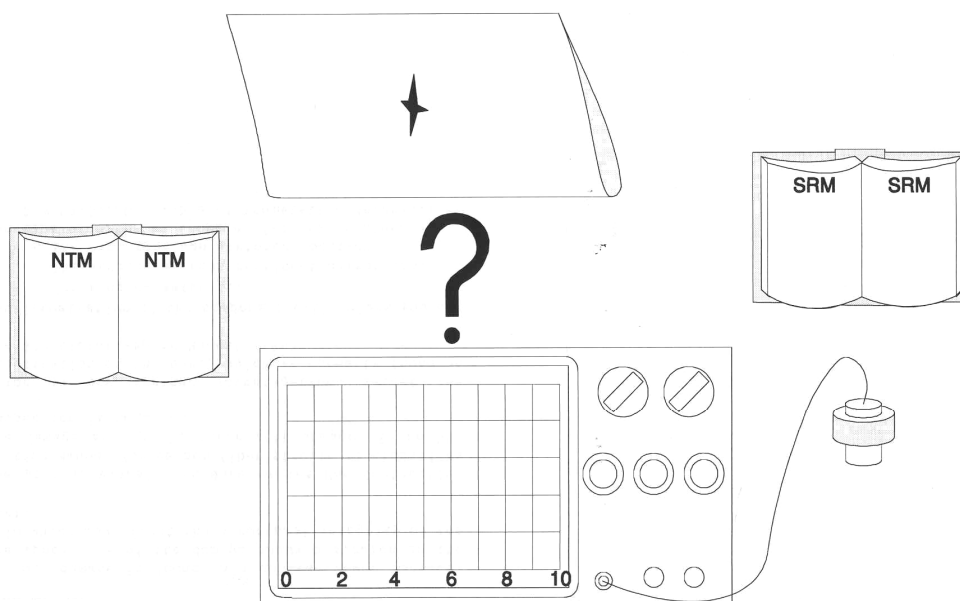


Slika 5.2. Prigušenije signala [2]

5.3. Ispitivanje kompozitne kontrolne površine zrakoplova ultrazvukom

Karakteristične nepravilnosti i pogreške koje mogu biti ili rezultat proizvodnog postupka ili posljedica uvjeta eksploatacije zrakoplova, su delaminacije kompozitnih materijala. Problem kompozitnih materijala jest u tome što kod delaminacije površina izgleda besprijekorno, no unutar strukture je došlo do raslojavanja.

Kako bi se ispitivanje korektno provelo mora se slijediti postupak ispitivanja koji je propisao proizvođač zrakoplova i opisao u odgovarajućim priručnicima.



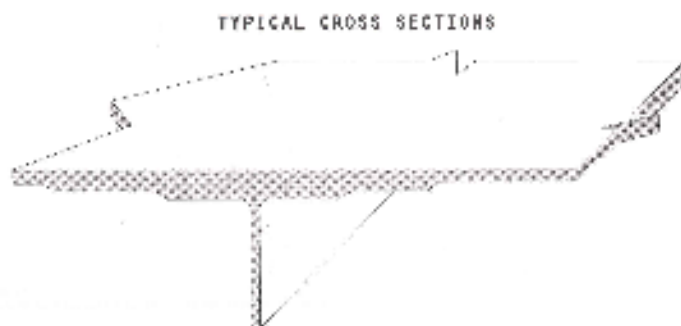
Slika 5.3. Potrebna oprema i priručnici za ultrazvučno ispitivanje [2]

Dva neophodna priručnika za ispitivanje su:

- NTM (non destructive testing manual) – priručnik za nerazorno ispitivanje
- SRM (structural repair manual) – priručnik za popravak strukture

5.3.1. Priprema za ispitivanje

Kod ispitivanja se mora posebna pozornost posvetiti geometriji komponente, odnosno promjenljivoj debljini poprečnog presjeka kako se ne bi protumačila kao nepravilnost. Promjena poprečnog presjeka kompozitne kontrolne površine zrakoplova prikazana je na slici 5.4.



Slika 5.4. Poprečni presjek kompozitne kontrolne površine zrakoplova [2]

5.3.2. Kalibracija ispitne opreme

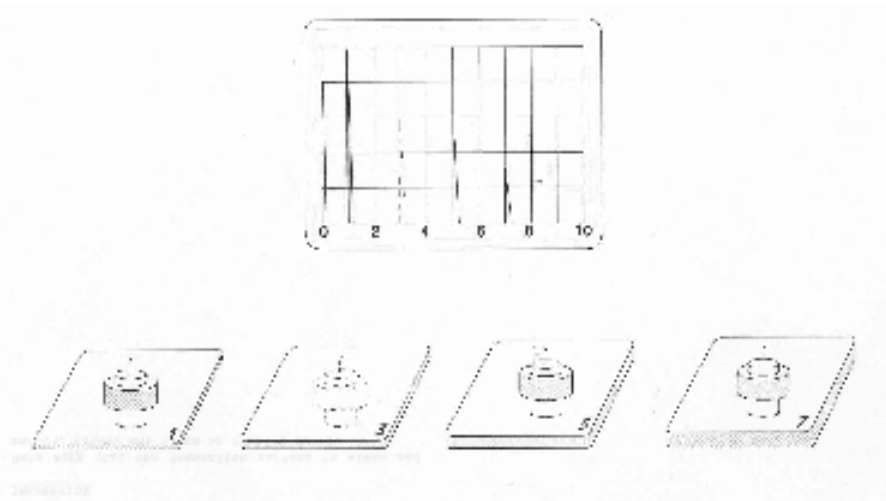
Kako bi se dobili valjani rezultati ispitivanja potrebno je provesti kalibraciju uređaja na etalonima koji su od istog materijala kao i ispitna struktura.

U zrakoplovstvu se koriste dvije vrste etalona za kalibraciju opreme:

- etalon debljine od 1 do 7 mm s kontinuirano jednosmjerno orijentiranim vlaknima
- etalon debljine od 1 do 19 mm s tkanim vlaknima (fabric material)

Kalibracija se provodi tako da se na ultrazvučnom uređaju podesi odgovarajuće ispitno područje za debljinu ispitne strukture i korištenih etalona.

Na slici 5.5. je prikazan postupak kalibracije mjernog područja na različitim debljinama etalona i vidi se smanjenje amplituda za signale odjeka od stražnje strane na etalonima većih debljina kao posljedica prigušenija ultrazvuka.

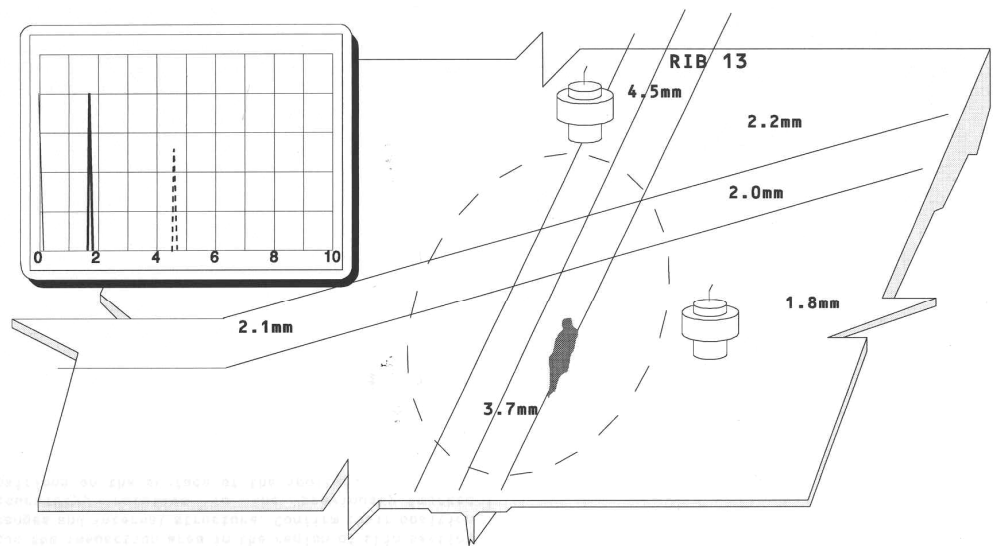


Slika 5.5. Kalibriranje ultrazvučne opreme [2]

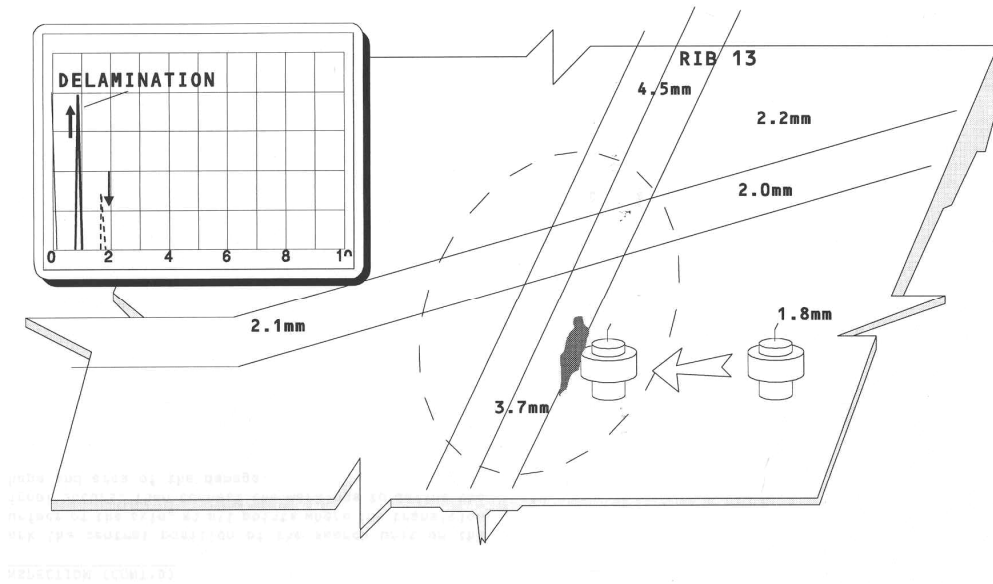
5.3.3. Ispitivanje

Prije samog ispitivanja odredi se opseg ispitivanja na ispitnoj površini, odnosno područje gdje se sumnja da postoje nepravilnosti. Vrlo je važno poznavati geometriju ispitivane komponente ispod ispitne površine te stoga proizvođač za primjer daje skice s označenim područjima različitih debljina kao što je to prikazano na slici 5.6.

Nakon određivanja ispitnog područja, sonda se stavlja na ispitni materijal (komponentu) i amplituda signala odjeka od stražnje stjenke, na poziciji nazivne debljine materijala koji je u ovome slučaju 1.8 mm, podešava se na 80% visine ekrana. Kada se sve to podesi provodi se samo ispitivanje, odnosno sa sondom se po ispitnoj površini provodi pretraživanje (skeniranje) i na zaslonu ultrazvučnog uređaja se prati hoće li doći do promjene signala. U slučaju nailaska na delaminaciju doći će do promjene prikaza signala kao što je to prikazano na slici 5.7.



Slika 5.6. Ispitivanje kontrolne površine zrakoplova [2]



Slika 5.7. Otkrivena delaminacija materijala [2]

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1. Ispitni uzorak

Za potrebe ovoga rada, provedena su ispitivanja kompozitnog uzorka ultrazvukom u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Postupak ispitivanja proveden je na kompozitnom dijelu zrakoplova. Rub i stjenke kompozitnog dijela napravljene su od monolitne strukture, dok je jezgra saćasta aluminijska struktura. Ovaj podatak važno je znati kako bi se kasnije ispravno protumačili rezultati ispitivanja.



Slika 6.1. Kompozitni dio zrakoplova na kojemu su provedena ispitivanja

Na slici 6.1 vidi se rub od monolitne strukture i strukturni kompozit sa saćastom strukturom. Osim saćaste strukture, problem kod ispitivanja stvaraju i lijepljeni dijelovi, koji ultrazvučne valove reflektiraju od svoje stražnje površine, tako da se ispitivanje ne provodi po cijelome presjeku kompozita. Na slici 6.2 je prikazana mjerna točka na lijepljenom dijelu ispitivanog uzorka.



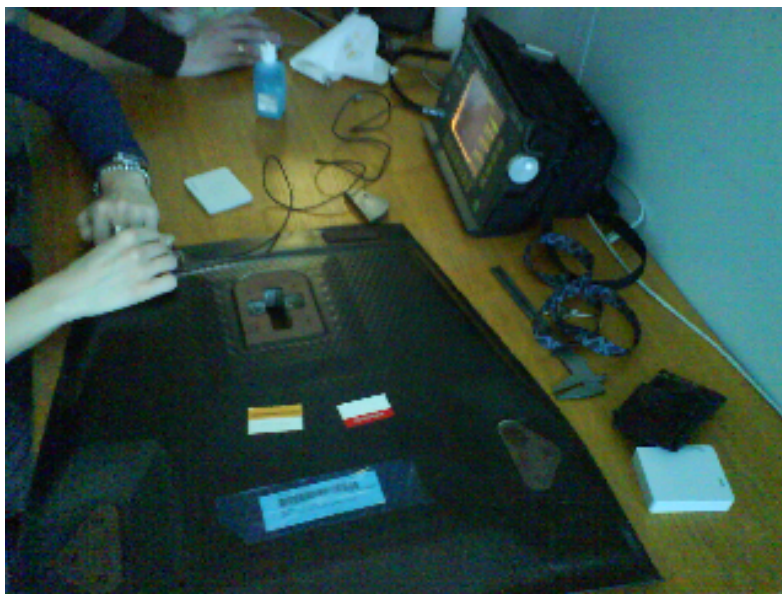
Slika 6.2. Ijepljeni dio na strukturi

6.2. Oprema

Oprema potrebna za ispitivanje je:

- ultrazvučni uređaj
- ultrazvučne sonde (koristili smo tri sonde nazivnih frekvencija 2.25, 5 i 10 MHz)
- čelični etalon za kalibraciju
- kompozitni etalon za kalibraciju
- gel kao kontaktno sredstvo
- pomično mjerilo za mjerenje nazivne debljine stjenke

Na slici 6.3. vidi se sva potrebna oprema za ispitivanje.

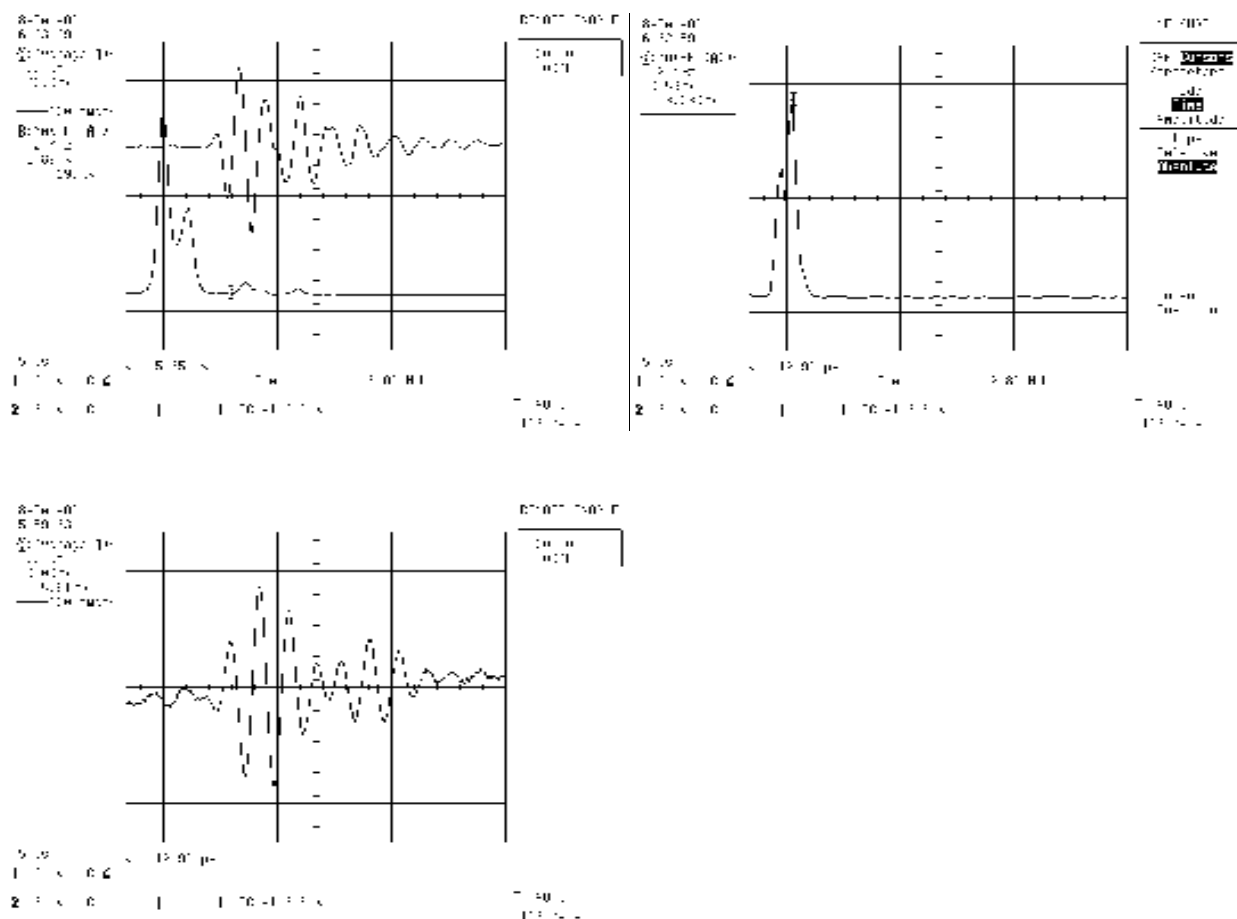


Slika 6.3. Oprema za ispitivanje

6.3. Ispitivanje sa sondom od 2.25 MHz

6.3.1. Snimanje karakteristika sonde

Na početku ispitivanja provedeno je snimanje karakteristika sonde, kako bi se dokazalo da sonda radi s predviđenim parametrima. Rezultati snimanja karakteristika sonde nazivne frekvencije 2.25MHz prikazani su na slici 6.4.



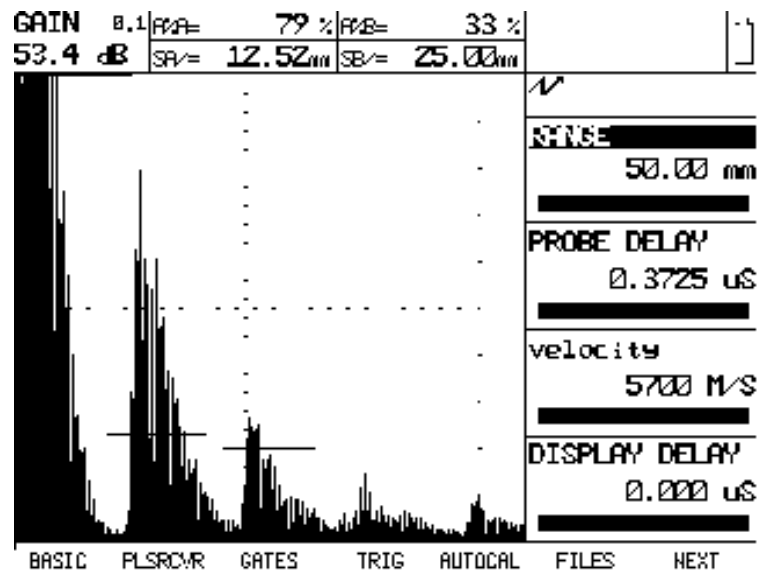
Slika 6.4. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 2.25 MHz

Sa slike 6.4. možemo iščitati slijedeće podatke:

- pojasna širina 1.05 MHz
- gornja frekvencija 3.2 MHz
- vršna frekvencija 2.8 MHz
- donja frekvencija 1.97 MHz
- trajanje signala 290 ns

6.3.2. Kalibracija uređaja za sondu od 2.25 MHz

Prije početka ispitivanja kompozitnog dijela, kalibrira se uređaj na čeličnom etalonu i dobivaju se odzivi koji su prikazan na slici 6.5.

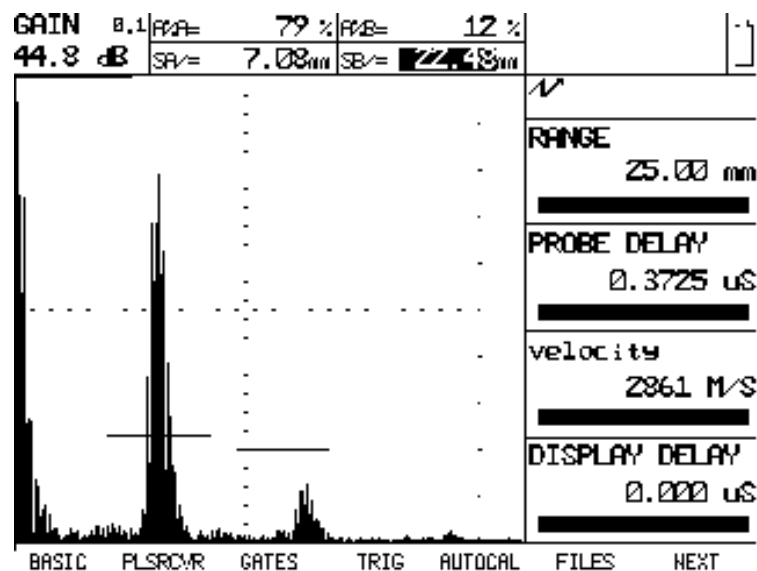


Slika 6.5. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 2.25MHz

Na slici 6.5. vidi se da je brzina propagacije valova podešena na 5700 m/s, odnosno tolika je brzina propagacije ultrazvučnih valova u čeliku.

Kod kalibracije uređaja na čeličnom etalonu, ispitno područje podešeno je na 50 mm. U nastavku gdje se ispitivanje vrši isključivo na kompozitnim materijalima, ispitno područje podešeno je na 25 mm, kako bi se povećala razlučivost odziva.

Nakon kalibracije na čeliku vrši se kalibracija na kompozitnom etalonu i dobiva se odziv prikazan na slici 6.6.



Slika 6.6. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 2.25MHz

Brzina propagacije valova podešena je na 2861 m/s, zbog znatno manje brzine propagacije valova nego u metalnim strukturama.

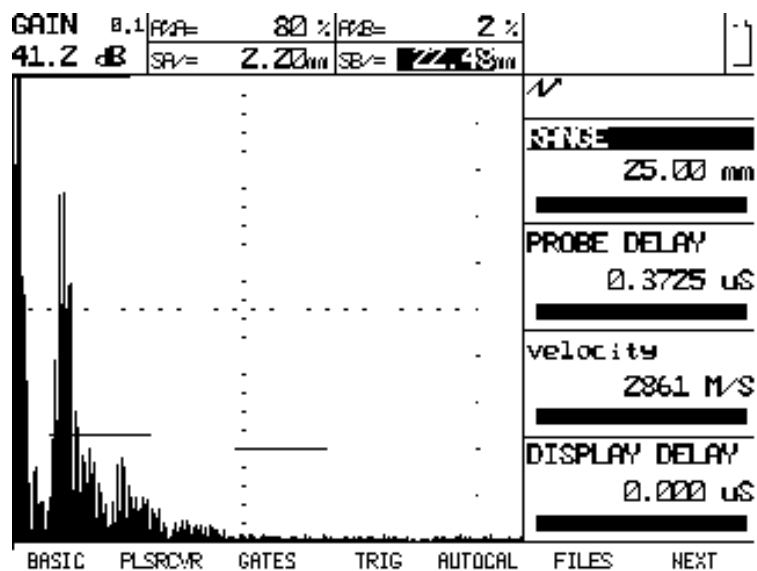
6.3.3. Ispitivanje točke 1

Nakon kalibracije uređaja provedeno je ispitivanje točke 1. Točka 1, koja je prikazana na slici 6.7. nalazi se na rubu kompozitnog dijela gdje je samo monolitna struktura (označena crvenom točkom).



Slika 6.7. Točka 1

Rezultati ispitivanja točke 1 prikazani su na slici 6.8..

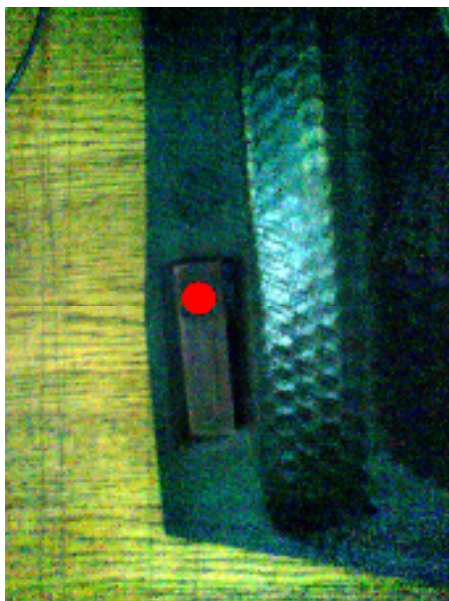


Slika 6.8. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 2.25 MHz

Na slici 6.8. vidi se refleksija od stražnje stjenke i šumovi.

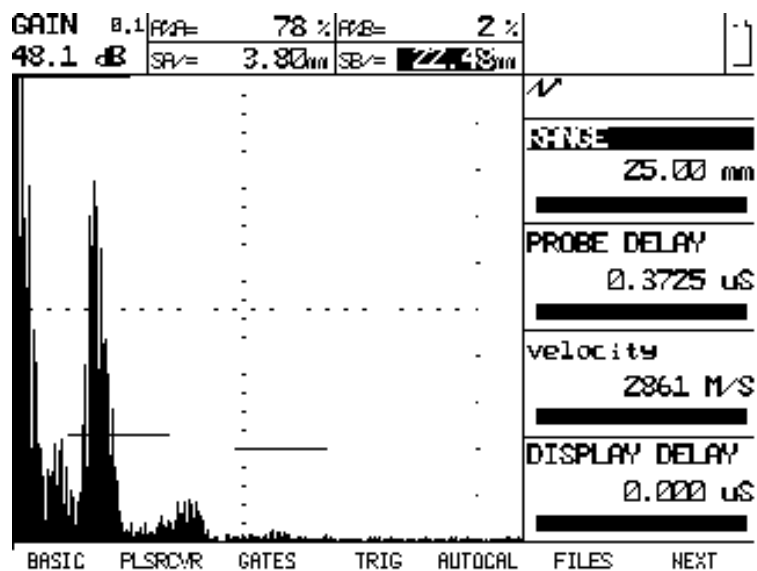
6.3.4. Ispitivanje točke 2

Nakon završenog ispitivanja točke 1, slijedi ispitivanje točke 2. Točka 2 prikazana na slici 6.9. nalazi se na zadebljanom dijelu gdje je također samo monolitna struktura.



Slika 6.9. Točka 2

Rezultati ispitivanja točke 2 prikazani su na slici 6.10..



Slika 6.10. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 2.25 MHz

Na slici 6.10. vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke i šumovi.

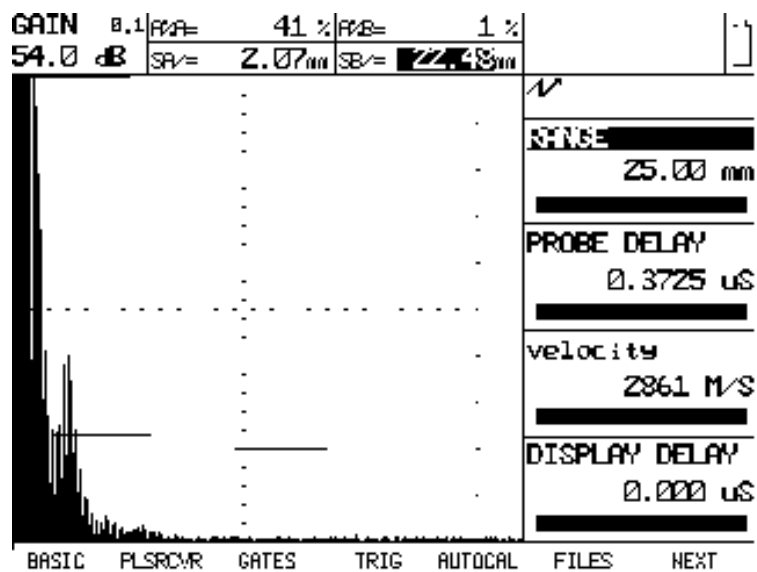
6.3.5. Ispitivanje točke 3

Slika 6.11. prikazuje mjesto točke 3. Točka 3 nalazi se na trokutastom dijelu, koji je zalijepljen na ostatak strukture.



Slika 6.11. Točka 3

Rezultati ispitivanja točke 3 prikazani su na slici 6.12.



Slika 6.12. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 2.25 MHz

Na slici 6.12. vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke lijepljenog dijela, tako da ispitivanje nije provedeno po cijelome presjeku.

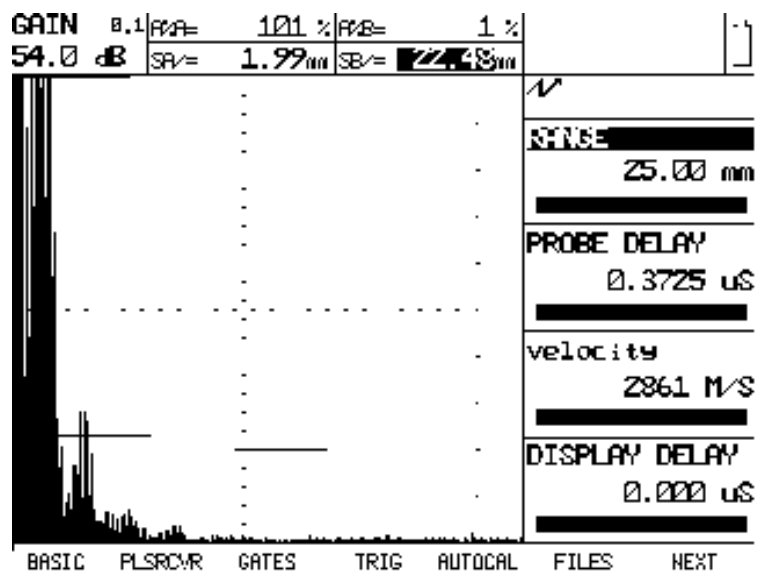
6.3.6. Ispitivanje točke 4

Točka 4, prikazana na slici 6.13. nalazi se desno od trokutastog lijepljenog dijela, na samoj saćastoj strukturi.



Slika 6.13 Točka 4

Rezultati ispitivanja točke 4 prikazani su na slici 6.14.



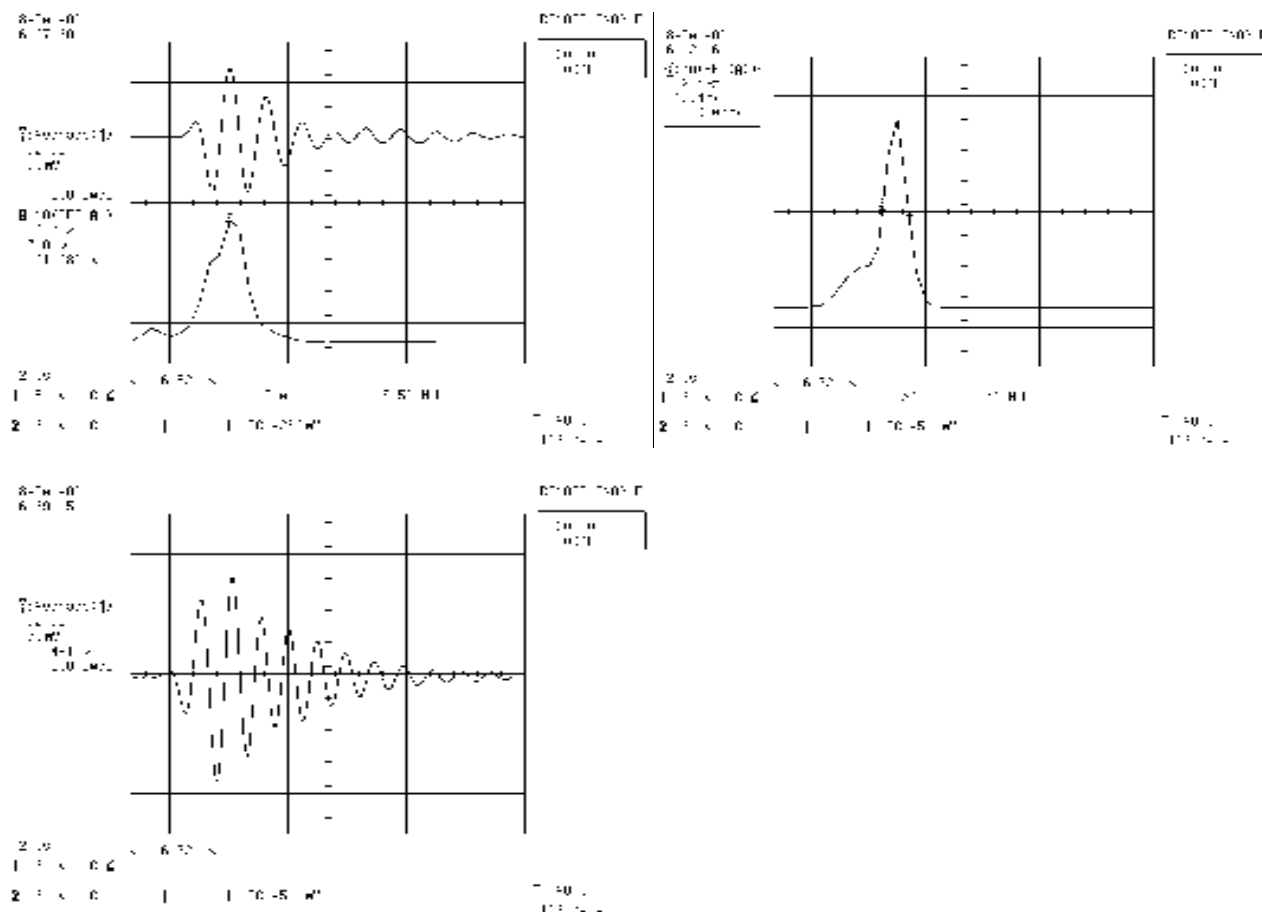
Slika 6.14. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 2.25 MHz

Na slici 6.14. vidi se samo šumovi. Razlog tomu je saćasta struktura gdje se ultrazvučni valovi prigušuju.

6.4. Ispitivanje sa sondom od 5 MHz

6.4.1. Snimanje karakteristika sonde

Kao i u prethodnom slučaju prvo se provodi snimanje karakteristika sonde. Rezultati snimanja prikazani su na slici 6.15.



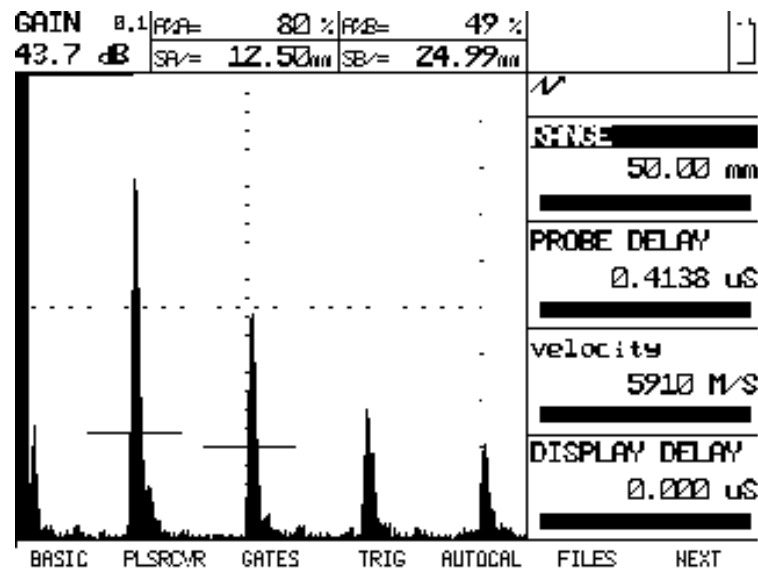
Slika 6.15. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 5 MHz

Sa slike 6.15 možemo iščitati sljedeće podatke:

- pojasna širina 1.4 MHz
- gornja frekvencija 7.59 MHz
- vršna frekvencija 7 MHz
- donja frekvencija 6.19 MHz
- trajanje signala 129 ns

6.4.2. Kalibracija uređaja za sondu od 5 MHz

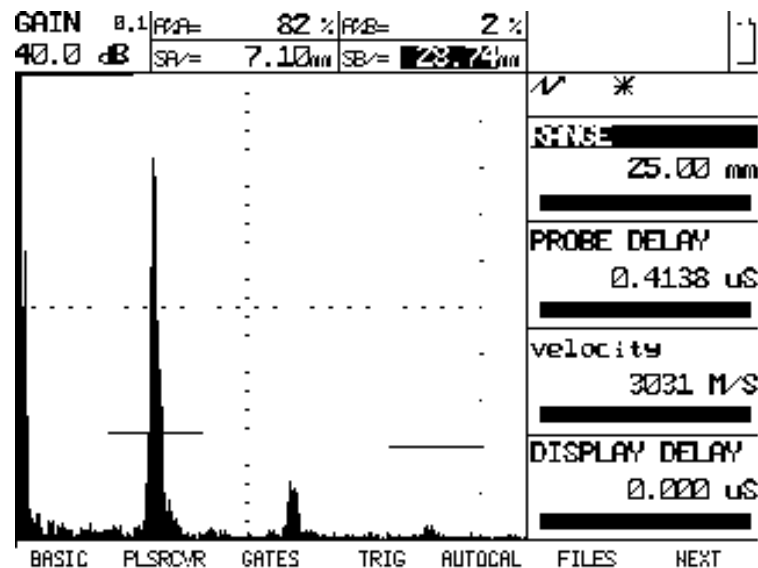
Prije početka ispitivanja kompozitnog dijela, kalibrira se uređaj na čeličnom etalonu i dobivaju se odzivi koji su prikazani na slici 6.16.



Slika 6.16. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 5MHz

Na slici 6.16. može se vidjeti da je brzina propagacije valova podešena na 5900 m/s, razlog tomu je velika brzina propagacije valova kroz metalnu strukturu.

Nakon kalibracije uređaja na čeliku slijedi kalibracija na kompozitnom etalonu i dobiva se odziv prikazan na slici 6.17.

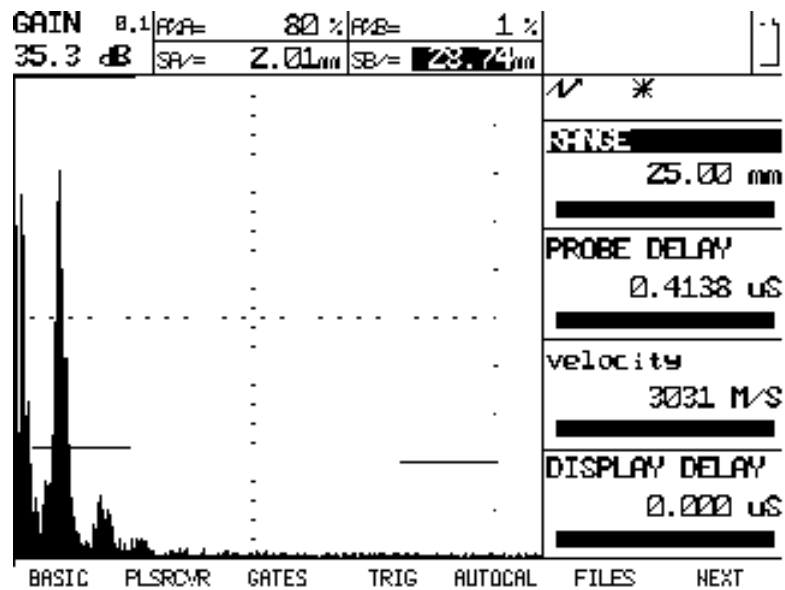


Slika 6.17. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 5MHz

Na slici 6.17. vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke.

6.4.3. Ispitivanje točke 1

Kada se završi kalibracija, slijedi ispitivanje točke 1. Rezultati ispitivanja točke 1 prikazani su na slici 6.18.

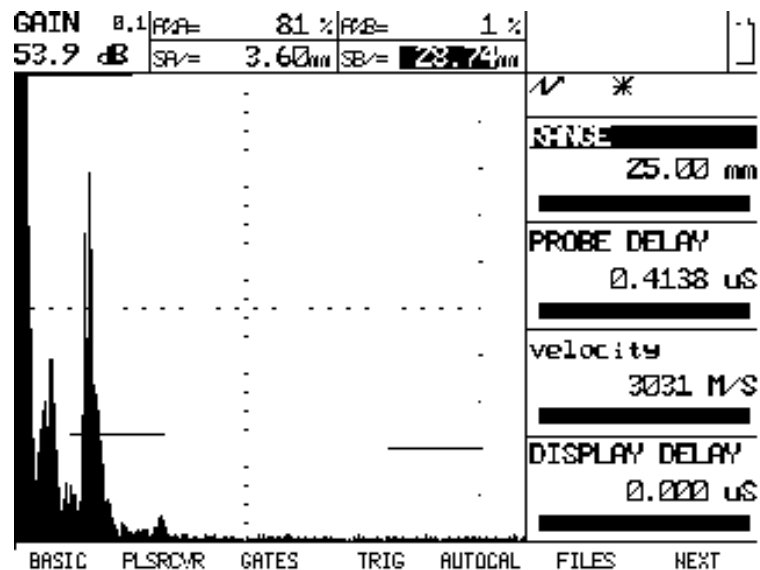


Slika 6.18. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 5 MHz

Ispitivanjem sondom nazivne frekvencije 5 MHz dobivaju se rezultati prikazani na slici 6.18, gdje se vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke.

6.4.4. Ispitivanje točke 2

Nakon završenog ispitivanja točke 1, slijedi ispitivanje točke 2. Točka 2 nalazi se na zadebljanom dijelu ispod točke 1, gdje je također samo monolitna struktura.

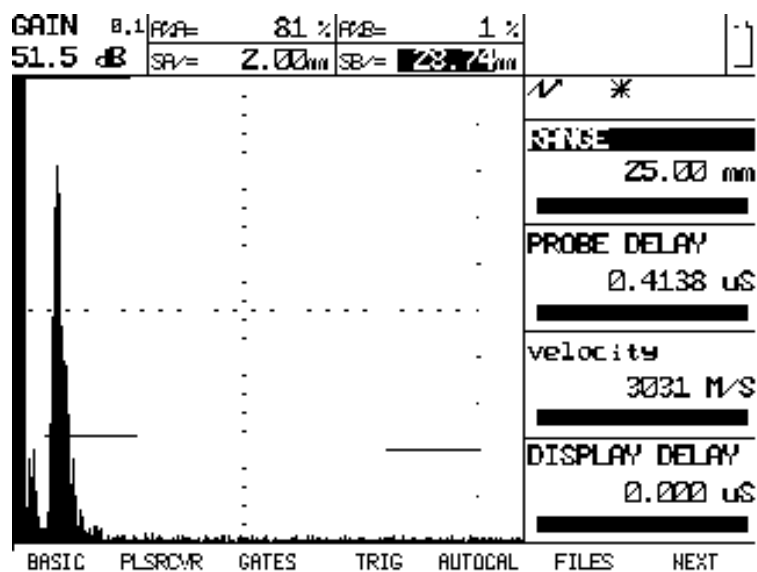


Slika 6.19. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 5 MHz

Ispitivanjem točke 2 sa sondom od 5 MHz, primijećuju se šumovi i refleksija impulsa od stražnje stjenke.

6.4.5. Ispitivanje točke 3

Rezultati ispitivanja točke 3 prikazani su na slici 6.20.

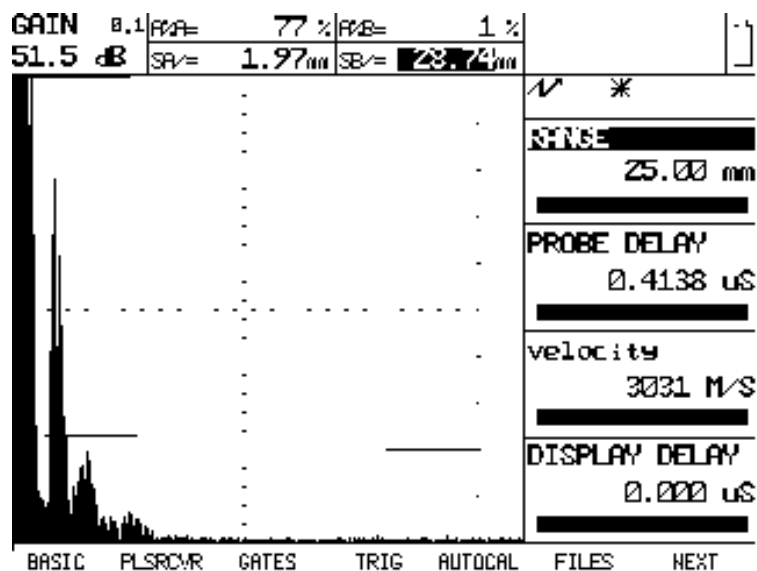


Slika 6.20. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 5 MHz

Na slici 6.20. vidi se da refleksija impulsa od stražnje stjenke.

6.4.6. Ispitivanje točke 4

Rezultati ispitivanja točke 4 prikazani su na slici 6.21.



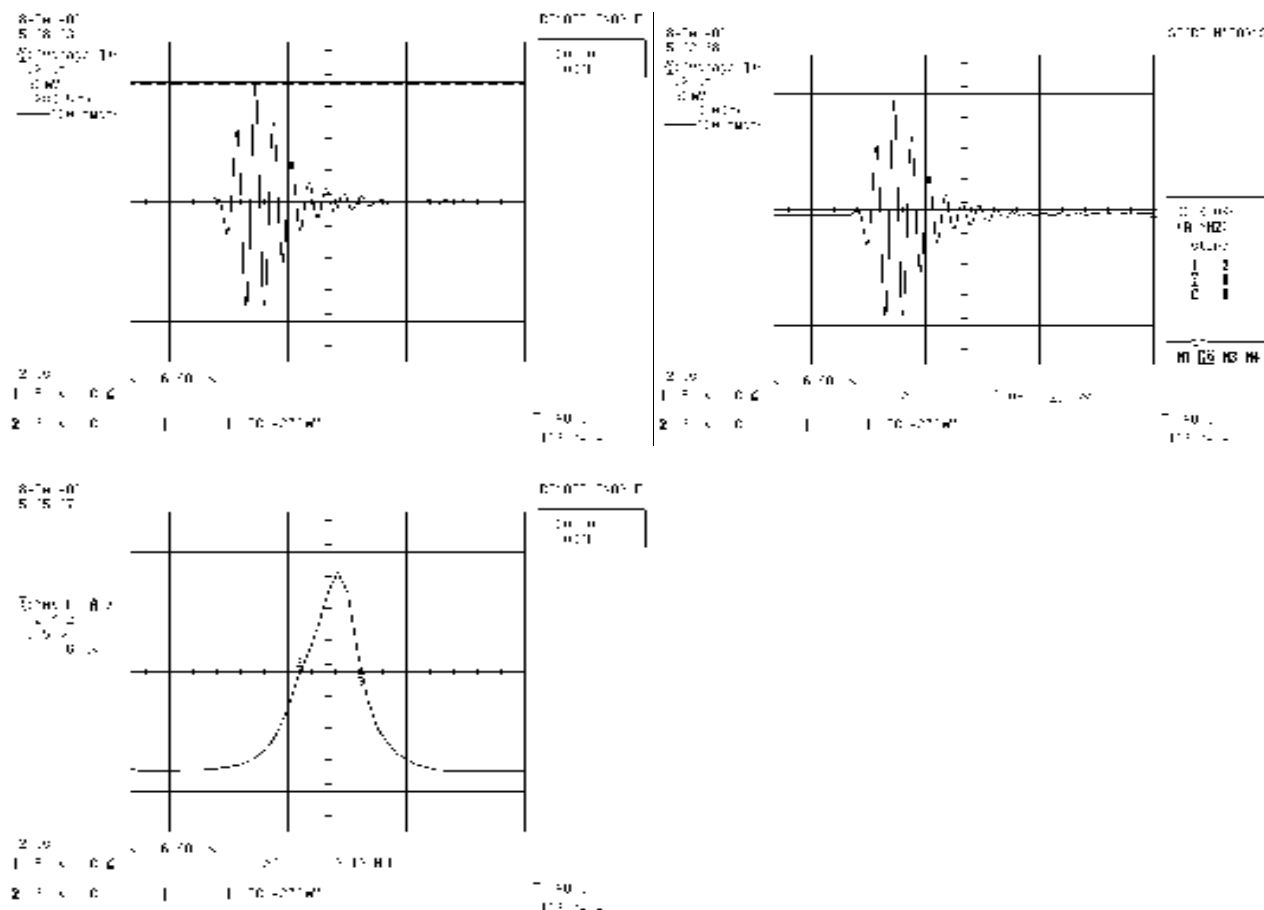
Slika 6.21. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 5 MHz

Na slici 6.21 vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke, ali važno je napomenuti da u ovom slučaju postoji sačasta struktura, što znatno prigušuje ultrazvučne valove.

6.5. Ispitivanje sa sondom od 10 MHz

6.5.1. Snimanje karakteristika sonde

Kao i u prethodna dva slučaja, prvo se provodi snimanje karakteristika sonde. Rezultati snimanja prikazani su na slici 6.22.



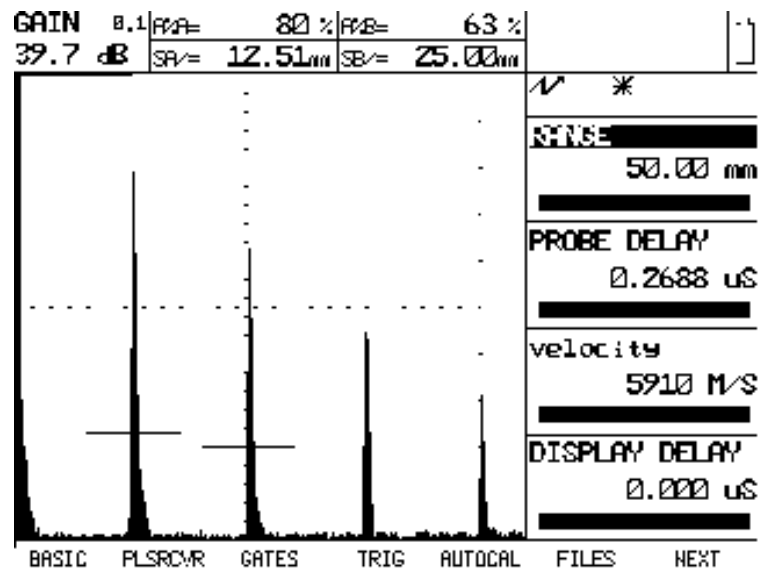
Slika 6.22. Karakteristike sonde nazivne frekvencije 10 MHz

Sa slike 6.22. možemo iščitati slijedeće podatke:

- pojasna širina 3.13 MHz
- gornja frekvencija 10.5 MHz
- vršna frekvencija 7 MHz
- donja frekvencija 9.13 MHz
- trajanje signala 691 ns

6.5.2. Kalibracija uređaja za sondu od 10 MHz

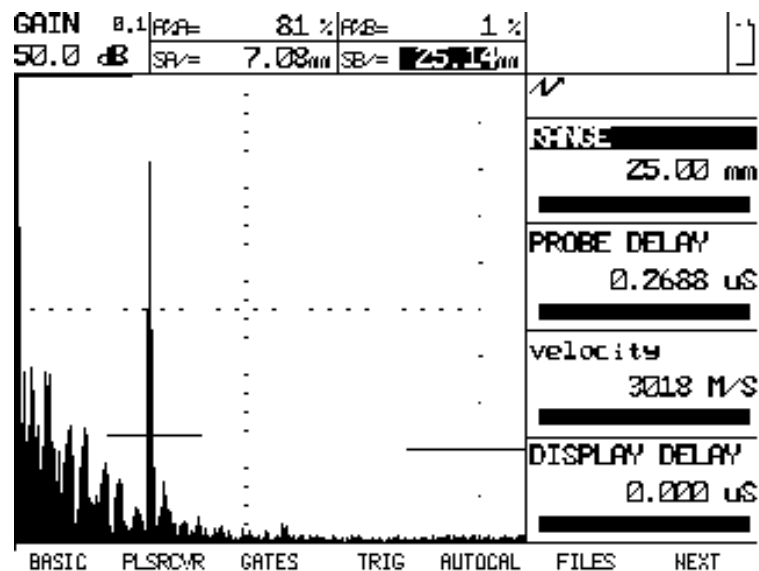
Prije početka ispitivanja kompozitnog dijela, kalibrira se uređaj na čeličnom etalonu i dobivaju se odzivi od stražnje stjenke koji su prikazan na slici 6.23.



Slika 6.23. Kalibracija uređaja na čeličnom etalonu sa sondom od 10 MHz

Iz slike 6.23 mogu se vidjeti rezultati koje daje sonda od 10 MHz, između odziva gotovo da i nema šumova.

Nakon kalibracije na čeliku provodi se kalibracija na kompozitnom etalonu i dobiva se odziv prikazan na slici 6.24.

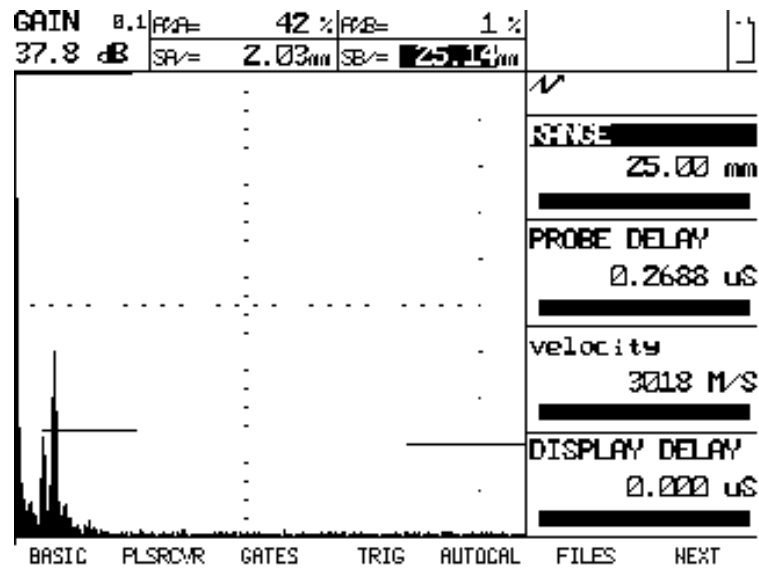


Slika 6.24. Kalibracija uređaja na kompozitnom etalonu sa sondom od 10 MHz

Ovdje se vidi refleksija impulsa od stražnje stjenke, ali postoje i značajni šumovi.

6.5.3. Ispitivanje točke 1

Kada se završi kalibracija, slijedi ispitivanje točke 1. Rezultati ispitivanja točke 1 prikazani su na slici 6.25.

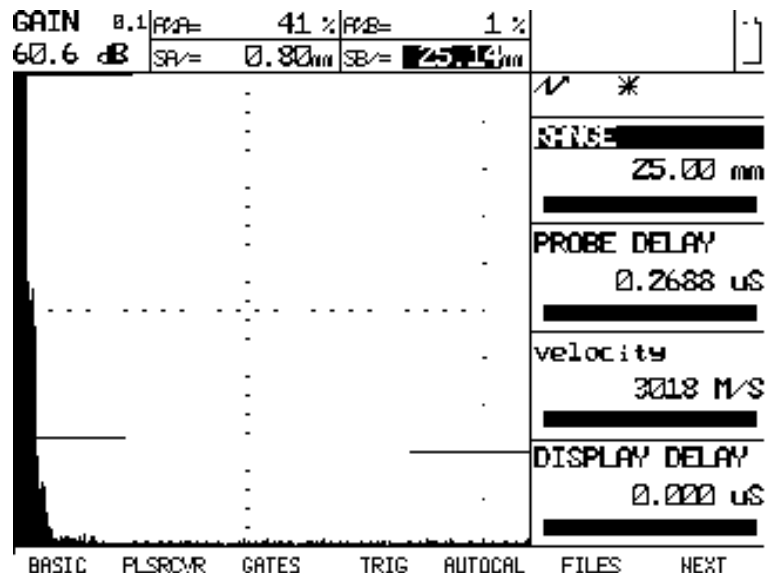


Slika 6.25. Ispitivanje točke 1 sa sondom od 10 MHz

Na slici 6.25 vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke i šumovi.

6.5.4. Ispitivanje točke 2

Nakon završenog ispitivanja točke 1, provodi se ispitivanje točke 2. Točka 2 nalazi se na zadebljanom dijelu ispod točke 1, gdje je također samo monolitna struktura. Rezultati ispitivanja točke 2 prikazani su na slici 6.26.

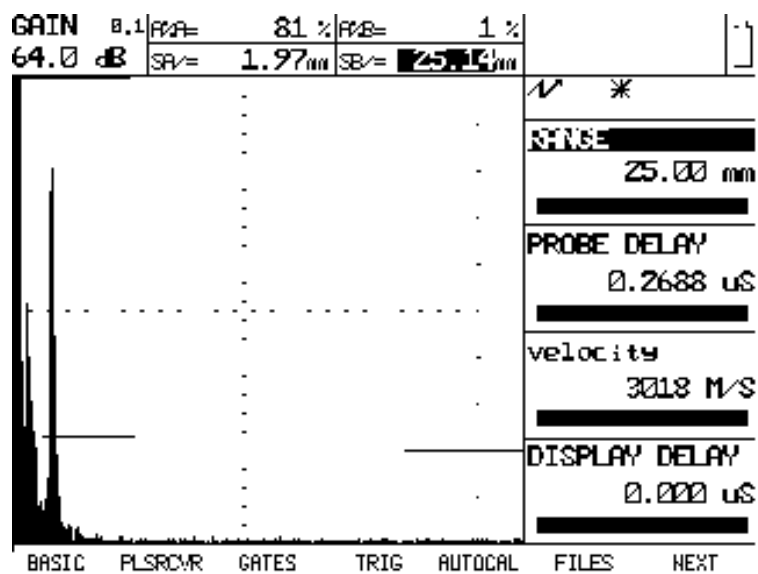


Slika 6.26. Ispitivanje točke 2 sa sondom od 10 MHz

Ispitivanjem točke 2 sa sondom od 10 MHz dobivaju se ovi rezultati, problem je u tome što se ne vidi refleksija impulsa od stražnje stjenke.

6.5.5. Ispitivanje točke 3

Rezultati ispitivanja točke 3 prikazani su na slici 6.27.

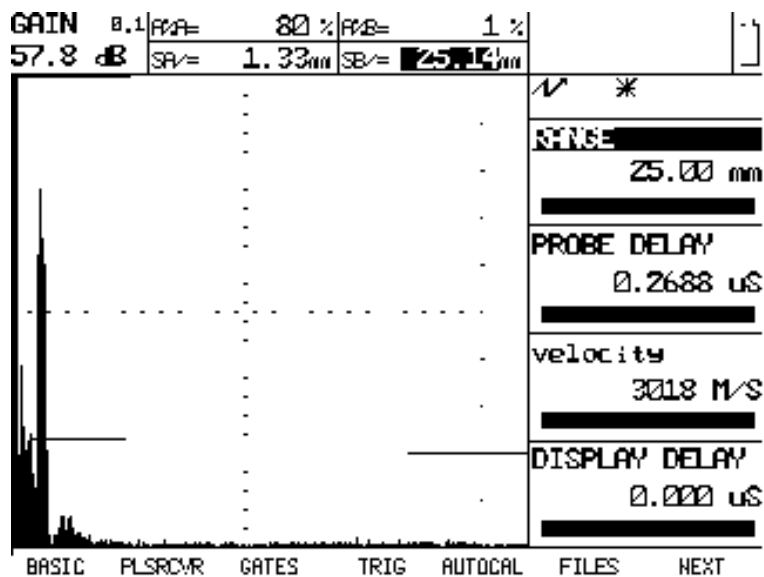


Slika 6.27. Ispitivanje točke 3 sa sondom od 10 MHz

U ovome mjerenju raspoznaje se refleksije impulsa od stražnje stjenke.

6.5.6. Ispitivanje točke 4

Rezultati ispitivanja točke 4 prikazani su na slici 6.28.



Slika 6.28. Ispitivanje točke 4 sa sondom od 10 MHz

Na slici 6.28. vidi se refleksija impulsa od stražnje stjenke i šumovi.

7. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je elaborirati ultrazvučno ispitivanje kompozitnih struktura zrakoplovnih konstrukcija. Kod svake inspekcije zrakoplova mora se uzeti u obzir da se pregledi provode u hangaru gdje uvjeti ispitivanja nisu istovjetni laboratorijskim uvjetima.

Prije trideset godina, kada su zrakoplovi gotovo u potpunosti bili napravljeni od metala, poput Boeing-a 707, DC-9 i drugih, nerazornim metodama ispitivanja nepravilnosti su se nešto lakše detektirale. No danas kada je udio kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama sve veći, javlja se problem brzog i kvalitetnog nerazornog ispitivanja.

Jedna od metoda nerazornog ispitivanja koja se danas koristi za ispitivanje kompozita u zrakoplovstvu jest ispitivanje lupkanjem (eng. Tap test), što dugo traje, a i pouzdanost je upitna, jer kako nakon više satnog ispitivanja inspektoru pada koncentracija postoji mogućnost ne detekcije defekata.

Za pregled vanjskih površina kompozitnih komponenti konstrukcije zrakoplova koristi se termovizija. Prednost termovizije jest u tome što se relativno brzo mogu pregledati velike kompozitne površine, no s termovizijom se ne mogu otkriti delaminacije u materijalu.

Za otkrivanje delaminacija u materijalu primjenjuje se ultrazvučno ispitivanje kompozitnih materijala. Ultrazvučno ispitivanje se uglavnom primjenjuje na monolitne kompozitne strukture.

Kod monolitnih struktura uz odgovarajuće ultrazvučne parametre ispitivanje je relativno jednostavno. Potrebno je poznavati debljinu i geometriju ispitnog uzorka, te brzinu propagacije ultrazvučnog vala i koeficijent prigušenja ultrazvuka u promatranoj kompozitnoj strukturi.

Nepravilnosti koje očekujemo detektirati ultrazvučnom metodom ispitivanja su delaminacije.

Negativna strana ultrazvučnog ispitivanja jest u tome što se ne mogu ispitati sve vrste kompozitnih materijala. Strukturni kompoziti zbog svoje nehomogenosti, prepreka su propagaciji ultrazvuka kakva nam treba za detekciju mikronepravilnosti u strukturi materijala.

Na kraju može se zaključiti da za kvalitetnu inspekciju zrakoplovne konstrukcije potrebno je provesti više metoda nerazornog ispitivanja.

8. LITERATURA:

1. Prof. dr. sc. Marica Invanković: Kompozitni materijali, nastavni materijal, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, www.fkit.hr
2. AIRBUS INDUSTRIE, Training & operations support division, 1995
3. Dino Novosel, diplomski rad: Konstrukcija modula za ispitivanje stjenke vodilica u kapi reaktora, Zagreb, 12. listopada 2005.
4. V. Augutis, D. Gailius, G. Balčiūnas: The online ultrasonic testing system for composite strips, Institute of Metrology, Kaunas University of Technology,
5. S. Hari Krishna, N. Narayanankutty and V.K. Ravindran: Studies on Air Coupled Ultrasonic Testing of Composite Structures,
6. B. Boro Djordjevic: Remote Non-Contact Ultrasonic Testing of Composite Materials, Center for Nondestructive Evaluation, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, 1998.