Usporedba konvencionalne i računalne radiografije kod ispitivanja ramenjača krila zrakoplova

Badurina-Žakan, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:235:371535

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ivan Badurina Žakan

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Damir Markučić **Ivan Badurina Žakan**

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiću na svim savjetima i vodstvu prilikom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se i laborantu Tomislavu Kezeleu na pomoći prilikom radiografskog ispitivanja, te djelatnicima Zrakoplovnog tehničkog centra u Velikoj Gorici g.Marijanu Mirkoviću i g.Dariju Muharu na svim dobivenim korisnim informacijama i literaturi.

Ivan Badurina Žakan

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: **Ivan Badurina-Žakan** Mat. br.: 0035182069

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba konvencionalne i računalne radiografije kod ispitivanja ramenjača krila zrakoplova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Computed vs. Convential Radiography for Aircraft Wing Spar Inspection**

Opis zadatka:

Radiografska metoda jedna je od najzastupljenijih nerazornih metoda koja se redovito provodi prilikom održavanja zrakoplova posebice kod ispitivanja integriteta krila. Prilikom ispitivanja nerazornim metodama, posebnu pažnju potrebno je obratiti na ramenjače kao osnovni konstrukcijski element krila zrakoplova čije otkazivanje može dovesti do katastrofalnih posljedica.

Uslijed veće osjetljivosti fosfornih slikovnih ploča na nešto niže energije ionizirajućeg zračenja koje se koriste kod ispitivanja aluminijskih legura te mogućnosti računalne analize digitalnog radiografskog zapisa, računalna radiografija (CR, Computed Radiography) nameće se kao alternativa konvencionalnoj radiografiji na film prilikom radiografskog ispitivanja krila. U tu svrhu, u radu je potrebno:

- slijedom postojećih spoznaja sistematizirati i usporedno prikazati mogućnosti i ograničenja računalne radiografije u odnosu na konvencionalnu film radiografiju prilikom ispitivanja ramenjače od aluminijske legure,
- u skladu s danim prikazom planirati i provesti usporedno laboratorijsko ispitivanje odabranog uzorka ramenjače s umjetno izrađenim nepravilnostima,
- dobivene rezultate prikazati i komentirati s obzirom na postignutu osjetljivost ispitivanja,
- utvrditi najznačajnije utjecajne faktore na kvalitetu radiografske slike prilikom provedbe ispitivanja.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Đamir Markučič

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1

2. FIZIKALNE OSNOVE RADIOGRAFIJE 2

2.1. Rendgenske zrake 2

2.2. Interakcija rendgenskog zračenja s materijom 2
2.2.1. Fotoelektrični efekt 4
2.2.2. Comptonov efekt 4
2.2.3. Tvorba parova 4

3. KONVENCIONALNA RADIOGRAFIJA 6

3.1. Struktura filma 6

3.2. Obrada filma 6
3.2.1. Tamna komora 7

3.3. Kvaliteta radiograma 7
3.3.1. Kontrast 7
3.3.1.1. Kontrast objekta 7
3.3.1.2. Kontrast detektora 8
3.3.1.3. Karakteristična krivulja 9
3.3.2. Oštrina slike 10
3.3.2.1. Granulacija filma 11

4. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA 12

4.1. Slikovne ploče 13
4.1.1. Podjela slikovnih ploča 15

4.2. Laserski skener 16

5.NORME U ZRAKOPLOVSTVU 17

5.1. Zacrnjenje 17

5.2. Izbor napona cijevi 18

5.3. Indikatori kvalitete radiograma 19

5.4. Norme za računalnu radiografiju 20
5.4.1. Odnos signal-šum SNR_N 20
5.4.2. Prostorna razlučivost SR_b 21

6. ISPITIVANJE ZRAKOPLOVNIH KONSTRUKCIJA 22

7. PRAKTIČNI DIO 25

7.1. Ispitni uzorak 1. 25

7.2. Ispitni uzorak 2. 26

7.3. Eksperimentalni postav 27

7.4. Digitalizacija slike 29

7.5. Analiza snimke s GP slikovnom pločom 30

7.5.1. Određivanje prostorne razlučivosti 31

7.5.2. Određivanje odnosa signal-šum 32

7.6. Analiza snimke s XL Blue slikovnom pločom 33

7.6.1. Određivanje prostorne razlučivosti 34

7.5.2. Određivanje odnosa signal-šum 35

7.7. Usporedba rezultata 36

8. ZAKLJUČAK 38

9. LITERATURA 39

POPIS SLIKA

Slika 1.Pad fotona kroz materijal ... 3
Slika 2. Struktura filma [4] ... 6
Slika 3. Transmisija na različitim energijama [5] ... 8
Slika 4. Karakteristična krivulja filma [3] ... 10
Slika 5. Razlike u radiogramskim oštrinama [5] ... 11
Slika 6. Presjek slikovne ploče [7] ... 13
Slika 7. Usporedba karakterističnih krivulja [3] ... 14
Slika 8. Odnos apsorpcije fotona i energija zračenja [8] ... 15
Slika 9. Shema rada laserskog skenera [3] ... 16
Slika 10. Odnos napona cijevi i debljine materijala [9] ... 18
Slika 11. Sustav žičanih indikatora kvalitete [10] ... 19
Slika 12. Indikator kvalitete s dvostrukim žicama [13] ... 21
Slika 13. Prostorne razlučivosti s obzirom na energiju zračenja i debljinu stijenke [12] ... 21
Slika 14. Radiogram ramenjače zrakoplova ... 23
Slika 15. Indikatori kvalitete i identifikacijske oznake radiograma ... 23
Slika 16. Utjecaj orijentacije i veličine pukotine na kvalitetu radiograma [11] ... 24
Slika 17. Ispitni uzorak 1. [14] ... 25
Slika 18. Ispitni uzorak 2. [14] ... 27
Slika 19. Rendgenska cijev ... 28
Slika 20. Postav ispitnih uzoraka ... 28
Slika 21. Postav Indikatora kvalitete ... 28
Slika 22. Skener VMI 5100MS i monitor visoke rezolucije [15] ... 29
Slika 23. Radiogram dobiven GP pločom ... 30
Slika 24. Prikaz određivanja prostorne razlučivosti ... 31
Slika 25. Uzorci za određivanje odnosa signal-šum ... 33
Slika 26. Radiogram dobiven XL Blue pločom ... 34
Slika 27. Prikaz određivanja prostorne razlučivosti ... 35
Slika 28. Usporedba dobivenih osjetljivosti ... 36
Slika 29. Usporedba prostornih razlučivosti ploča sa zadanim normama ... 36
Slika 30. Usporedba dobivenih SNR vrijednosti ... 36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odnos propuštenog svjetla kroz film i radiogramskog zacrnjenja 9
Tablica 2. Tehničke karakteristike slikovnih ploča [8] 15
Tablica 3. Zacrnjenje radiograma[9] 18
Tablica 4. Normirane minimalne SNR vrijednosti za pojedine klase filmova [12] 20
Tablica 5. Klasifikacija simuliranih oštećenja na Uzorku 1. 26
Tablica 6. Klasifikacija simuliranih oštećenja na Uzorku 2. 26
Tablica 7. Plan provedbe snimanja uzoraka 29
Tablica 8. Tehničke karakteristike skenera VMI 5100MS 29
Tablica 9. Odgovarajuća prostorna razlučivost za odgovarajući žičani element 32
Tablica 10. Izračunate SNR vrijednosti za GP ploču 33
Tablica 11. Izračunate SNR vrijednosti za XL Blue ploču 35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
I	Intenzitet zračenja pri ulazu u materijal
I_0	Intenzitet zračenja pri izlazu iz materijala
e	Prirodni logaritam
μ	Linearni koeficijent prigušenja
w	Debljina materijala
E_γ	Ukupna energija fotona
W	Energija oslobađanja elektrona
E_{kin}	Kinetička energija fotona
h	Planckova konstanta
f	Frekvencija
τ	Prigušenje zbog fotoelektričnog efekta
σ_S	Prigušenje zbog Comptonovog efekta
π	Prigušenje zbog efekta stvaranja parova
D	Zacrnjenje radiograma
l_0	Intenzitet svjetlosti kojemu je izložen film
l_t	Intenzitet svjetlosti koja prodire kroz film
E	Ekspozicija
t	Vrijeme
U	Napon

SAŽETAK

Radiografska metoda jedna je od najzastupljenijih nerazornih metoda ispitivanja materijala prilikom održavanja zrakoplova, posebice kod ispitivanja integriteta krila. Ramenjača kao osnovni konstrukcijski element krila zahtijeva posebnu pažnju prilikom ispitivanja jer njezino otkazivanje može dovesti do katastrofalnih posljedica. Nasuprot konvencionalnoj metodi koja koristi film, kao alternativa nameće se računalna radiografija (eng. CR, Computed Radiography) koja umjesto filma koristi fosforne slikovne ploče. Njihova veća osjetljivost pri nižim energijama ionizirajućeg zračenja daje veliku prednost pri ispitivanju aluminijskih legura, te će se slijedom toga provesti ispitivanje odabranog uzorka ramenjače pomoću računalne radiografije, a dobivene rezultate prikazati i komentirati.

SUMMARY

Radiographic method is one of the most commonly used nondestructive methods of material testing in the process of aircraft maintenance, especially when testing the wing integrity. Wing spar – as the fundamental construction element of the wing, requires special attention during testing because the failure of this element can lead to catastrophic effects. Computed radiography uses phosphoric imaging plates for testing, unlike traditional methods where a film is used. Higher sensitivity of the plates in the low level area of ionizing energy radiation gives them a substantial advantage in aluminium alloy testing. For that reason, we will use computed radiography for testing of a chosen wing spar sample. The results will be shown and commented.

1. UVOD

Radiografska metoda ispitivanja nalazi veliku primjenu u skoro svim industrijskim sektorima, pa tako i na području održavanja zrakoplova. Uobičajena procedura za proizvodnju radiografa je postojanje izvora ionizirajućeg zračenja s jedne strane ispitnog objekta, a s druge strane se postavlja detektor radijacije. Razina energije radijacije mora biti pomno odabrana kako bi dovoljna količina uspjela proći kroz objekt, što dovodi do jednog od glavnih ograničenja ove metode, a to je štetnost ionizirajućeg zračenja na ljudsko zdravlje. Zato je potrebno da radiografskom opremom rukuju za to osposobljeno osoblje pridržavajući se propisanih pravila i ograničenja.

Radiografsko ispitivanje materijala se zasniva na prozračivanju materijala i registraciji promjena u intenzitetu ionizirajućeg zračenja pri prolasku kroz materijal i analizi promjena koje daju informaciju o homogenosti prozračenog materijala. Ionizirajuće zračenje predstavlja temelj ove metode, stoga će se u prvome dijelu ovog rada prikazati njegove fizikalne osnove, kako ono nastaje i njegove podjele. Detekcija zračenja predstavlja suštinsku razliku između konvencionalne i računalne radiografije. Zato će se u ovome radu prikazati njihove prednosti i mane, a praktičnim dijelom donijeti konkretne zaključke.

2. FIZIKALNE OSNOVE RADIOGRAFIJE

2.1. Rendgenske zrake

Rendgenske zrake područje su elektromagnetskog zračenja s valnim duljinama između 10 i 0,01 nm. Generiraju se u rendgenskim cijevima, to je vakuumska cijev u kojoj elektroni udaraju u metalnu anodu pri čemu dolazi do njihovog naglog usporavanja i izbijanja elektrona iz unutarnjih ljuski atoma metala. Usporavanjem elektrona ili njegovim spuštanjem na niži energetski nivo popunjavanjem praznih elektronskih ljuski nastaju rendgenske zrake [1].

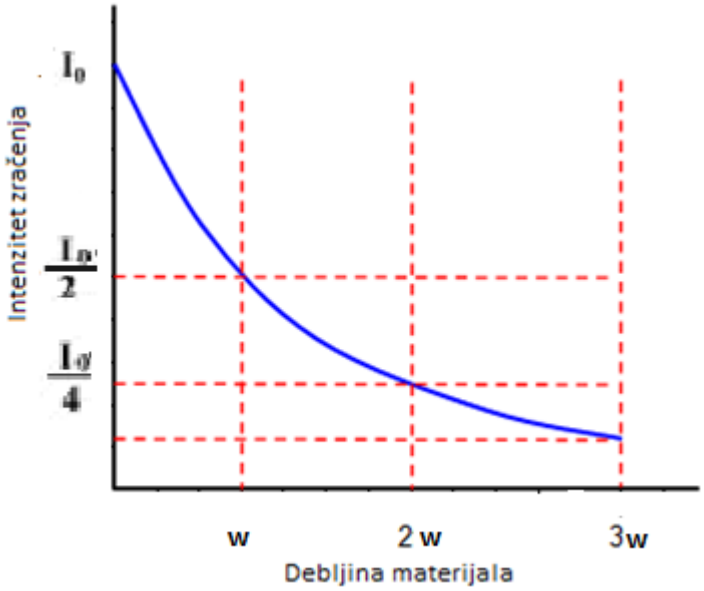
Ostala svojstva rendgenskih zraka:

- Ne može ih se otkriti ljudskim osjetilima
- Na putanju im ne utječu električna i magnetska polja
- Podliježu malom stupnju difrakcije na spoju dva različita materijala
- Prolaze kroz materiju dok ne naiđu na atomsku česticu
- Dubina penetracije ovisi im o energiji i svojstvima materije kroz koju prolaze
- Imaju dovoljno energije da ioniziraju tvar i unište žive stanice

2.2. Interakcija rendgenskog zračenja s materijom

Prolaskom rendgenskog zračenja kroz tvar, zračenje se guši (njegov intenzitet opada) jer dio fotona dolazi u interakciju sa atomima ispitnog materijala , dok drugi dio fotona nesmetano prolazi kroz materiju. Koliko će daleko foton doći o tome odlučuju statistički procesi, odnosno vjerojatnost interakcije s materijom po jedinici prevaljenog puta. Pri njoj foton može biti apsorbiran ili raspršen mijenjajući svoj smjer s ili bez gubitka energije. Broj fotona koji će proći kroz materijal ovisi o njegovoj debljini, atomskom broju i gustoći. Prolaskom kroz nehomogeno tijelo zračenje će se više upiti na mjestima veće gustoće i kod materijala većeg atomskog broja. Naravno hoće li doći do interakcije uvelike ovisi i o energiji individualnih fotona i njihovoj valnoj duljini, prema tome zračenje će biti prodornije kod kraćih valnih duljina. Kako vjerojatnost interakcije s povećanjem udaljenosti koju foton prijeđe raste, tako se broj fotona koji dođu do određene udaljenosti u materijalu

eksponencijalno smanjuje s prijeđenom udaljenošću [2]. Prikaz „pada“ fotona kroz materijal možemo vidjeti na Slici 1.



Slika 1.Pad fotona kroz materijal

Intenzitet ionizirajućeg zračenja koje prolazi kroz materijal se opisuje kroz zakon prigušenja:

$$I = I_0 \times e^{-\mu w} \tag{1}$$

Gdje je:

I – intenzitet zračenja pri ulazu u materijal
I_0 – intenzitet zračena pri izlazu iz materijala
e – prirodni logaritam
μ – linearni koeficijent prigušenja
w – debljina materijala

Primjeri raspršivanja fotona u materijalu su Thomsonovo i Rayleighevo raspršivanje u kojima ne dolazi do znatnijeg gubitka energije fotona. U Thomsonovu raspršenju, na elektronu dolazi samo do promjene smjera fotona (elastično raspršenje) i znatnija mu je vjerojatnost samo za najniže energije fotona. Kod Rayleighevog raspršenja gubitak energije je vrlo malen kao i kut raspršenja [2]. Kako je gubitak energije kod Thomsonovog i Rayleghevog raspršenja malen zanemarit će se u daljnjoj analizi. Glavni mehanizmi gubitka energije fotona su fotoelektrični efekt, Comptonovo raspršenje i tvorba parova, pa su oni detaljnije opisani u nastavku.

2.2.1. Fotoelektrični efekt [2]

Kada rendgensko zračenje relativno kratkih valnih duljina prolazi kroz materijal postoji mogućnost sudara fotona s atomom materijala. Tada se cjelokupna energija fotona iskoristi za izbijanje elektrona iz unutarnjih ljuski, ovaj fenomen se naziva fotoelektrični efekt. Zračenje s valnom duljinom većom od granične ne izbija elektrone jer elektroni ne mogu dobiti dovoljno energije za raskidanje veze s atomom.

Prilikom sudara fotona sa elektronom jedan dio energije se troši na oslobađanje elektrona iz materijala, a drugi dio energije daje kinetičku energiju elektronu. To je prikazano u jednadžbi (2) gdje je energija fotona E_γ, energija oslobađanja elektrona W, te kinetička energija elektrona E_{kin}.

$$E_\gamma = W + E_{kin} \tag{2}$$

Energija fotona jednaka E_γ jednaka je produktu Planckove konstante h i frekvencije f:

$$E_\gamma = h * f \tag{3}$$

2.2.2. Comptonov efekt [3]

Kod većih energija rendgenskog zračenja (od 100 keV do 10 MeV), prilikom interakcije fotona sa slobodnim ili slabo vezanim elektronom u vanjskim ljuskama atoma dolazi do prijelaza energije s fotona na izbačeni elektron, a foton se raspršuje pod nekim kutem s umanjenom energijom. Foton se može raspršiti pod bilo kojim kutem pa tako postoji mogućnost vraćanja fotona iz smjera iz kojeg je došao (eng. *backscatter*), što se koristi na primjer kod električnog pretražnog mikroskopa.

2.2.3. Tvorba parova [3]

Ova pojava prigušivanja zračenja je karakteristična samo za zračenja visokih energija (iznad 1 MeV). Prilikom interakcije takvog fotona visoke energije s jezgrom atoma materijala, cjelokupna energija fotona se pretvara u elektron i pozitron (čestice antimaterije). S obzirom na prirodu antimaterije, ovakav par nakon 10^{-9} sekunde doživi uništenje koje rezultira emitiranjem dvije gama zrake energije 511 keV, suprotnih smjerova.

Koji će od mehanizam gubitka energije dominirati ovisi kao što je napomenuto o energiji zračenja, ali i o vrsti prozračivanog materijala. Upravo ta apsorpcija nam omogućuje dobivanje slike na radiogramu. Prigušenje možemo prikazati i preko linearnog koeficijenta prigušenja:

$$\mu = \tau + \sigma_S + \pi \quad (4)$$

Gdje je:

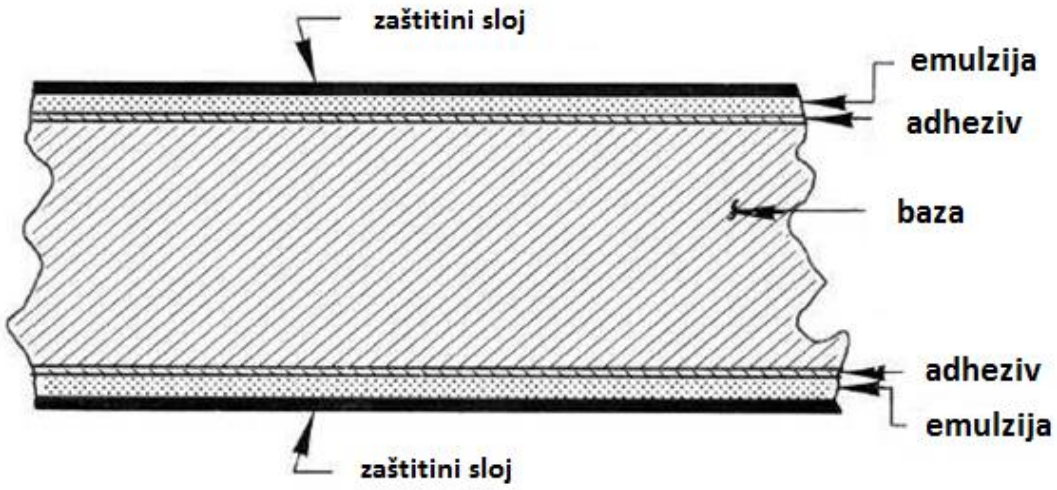
μ – linearni koeficijent prigušenja
τ – prigušenje zbog fotoelektričnog efekta
σ_S – prigušenje zbog Comptonovog efekta
π – prigušenje zbog efekta stvaranja parova

Ukupna apsorpcija zračenja kod radiografskog ispitivanja predstavljat će kombinaciju fotoelektričnog i Comptonovog efekta; tvorba parova se događa kod visokih energija koje se ne primjenjuju prilikom radiografskog ispitivanja materijala.

3. KONVENCIONALNA RADIOGRAFIJA

3.1. Struktura filma

Konvencionalna radiografija označuje metodu radiografskog snimanja pri kojem se koristi fotomaterijal osjetljiv na rendgensko zračenje u obliku filma. Uobičajena debljina filma je oko 0.5 mm i napravljen je od sedam slojeva, kako je vidljivo na Slici 2.



Slika 2. Struktura filma [4]

Baza filma daje strukturalnu čvrstoću filmu, mora biti fleksibilna, neophodno transparentna za svjetlost i dimenzionalno stabilna tijekom vremena, a izrađuje od celuloznog triacetata ili poliestera. Na bazu se zatim stavlja tanki sloj adheziva koji veže sloj fotosenzitivne emulzije. Radiografski film može biti jednoslojan ili dvoslojan, ovisno o tome ima li jedan ili dva sloja emulzije. Dvoslojni film se koristi jer se time udvostručuje osjetljivost filma na zračenje. Sama emulzija je ta koja je osjetljiva na ionizirajuće zračenje i svjetlost, a se sastoji od mikroskopskih kristala srebrnog bromida smještenih u želatini. [4]

3.2. Obrada filma

Razvijanje filma je znanost sama za sebe i slijede ju stroga pravila vezana za razvijanje, od koncentracije kemijskih sredstava, temperature, redoslijedu i vremenu razvijanja. Glavni cilj obrade filma je proizvesti radiogram pogodan za pregled i pripremiti ga za skladištenje. Hoće

li se razvijanje filma obaviti ručnim ili automatskim procesom, dobivanje kvalitetnog radiograma zahtjeva visoki stupanj kontrole kvalitete i konzistenciju.

Kada se izloži zračenju, film se zatim procesuira u tamnoj komori pomoći nekoliko različitih kemijskih procesa u kontroliranim periodima vremena.

3.2.1. Tamna komora [3]

Zbog praktičnih razloga potrebno je da se tamna komora nalazi što bliže mjestu gdje se odvila ekspozicija filma. Također poželjno je ta se tamna komora podijeli na „mokri“ i „suhi“ dio, gdje će se u „suhom“ odvijati sav onaj rad s filmom gdje on ne smije biti u doticaju s bilo kakvom vlagom. Na „mokroj“ strani se nalazi pet kupki, posloženih u sljedećem nizu:

- kupka za razvijanje
- kupka za zaustavljanje razvijanja
- kupka za fiksiranje
- kupka za pranje

3.3. Kvaliteta radiograma

Dobivanje visoke razine detalja na slici predstavlja jedan od glavnih zadataka u radiografiji, da da bi se to dobilo mora se zadovoljiti niz različitih varijabli. Radiografska osjetljivost predstavlja mjeru kvalitete dobivene slike, tj. mogućnost detekcije što manjih nepravilnosti ili detalja. Ona ovisi o dva različita seta varijabli, kontrastu i oštrini slike.

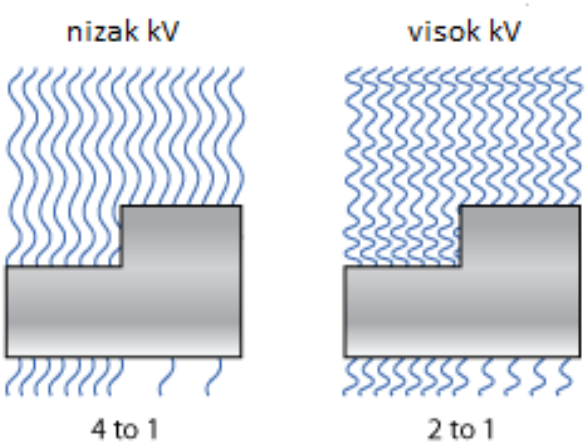
3.3.1*. Kontrast*

Radiografski kontrast predstavlja stupanj različitosti u zacrnjenju između dva područja na radiogramu. Kontrast između dva područja na slici je upravo ono što tvori samu sliku, te što je on veći razne značajke na radiogramu postaju vidljivije. Dva su faktora koja utječu na kontrast radiograma; kontrast objekta i detektora.

3.3.1.1. *Kontrast objekta*

Kontrast objekta se odnosi na promjenu intenziteta zračenja dok ono prolazi kroz različita područja ispitnog materijala. Ono ovisi o razlikama u apsorpciji zračenja na različitim mjestima u materijalu, valnoj duljini primarne radijacije, te o intenzitetu i distribuciji

sekundarnog zračenja nastalog raspršivanjem snopa. Što je veća razlika u debljini ili gustoći materijala bit će veća razlika u kontrastu samog radiograma. Također korištenje manjih energija zračenja rezultirat će većim kontrastom, a to se objašnjava činjenicom da će se zračenje manjih energija lakše prigušiti u materijalu. Omjer između fotona koji prolaze kroz deblji dio materijala i onih koji prolaze kroz tanji bit će veći kod manjih energija što rezultira time da će film na nekim mjestima biti izložen manjem stupnju zračenja od drugih područja. Međutim, treba imati na umu da se s povećanjem kontrasta smanjuje opseg prikaza različitih debljina materijala na radiogramu. Zato je potrebno balansirati kontrast do te mjere da imamo mogućnost razlučivanja različitih debljina materijala uz zadovoljavajući kontrast. [5]



Slika 3. Transmisija na različitim energijama [5]

3.3.1.2. *Kontrast detektora*

Kada radiografski film stavimo na iluminator primjećuju se područja s različitom razinom zacrnjenja. Ono se definira izrazom (5), a vrijednosti koje se javljaju u industrijskoj radiografiji protežu se u rasponu od 0 do 4.

$$D = log\frac{l_0}{l_t} \tag{5}$$

Gdje je:

- D- zacrnjenje
- l_0- upadna svjetlost,
- l_t - svjetlost propuštena kroz film

Tablica 1. Odnos propuštenog svjetla kroz film i radiogramskog zacrnjenja

Propuštanje (I_t/I_0)	**Postotak propuštanja**	**Inverznost Propuštanja** (I_0/I_t)	**Radiogramsko Zacrnjenje** (D)
1,0	100%	1	0
0,1	10%	10	1
0,01	1%	100	2
0,001	0,1%	1000	3
0,0001	0,01%	10000	4
0,00001	0,001%	100000	5
0,000001	0,0001%	1000000	6
0,0000001	0,00001%	10000000	7

Tablica 1. nam prikazuje odnos između količine propuštenog svjetla kroz film i izračunatog zacrnjenja filma. Može se uočiti da kod izračunatog zacrnjenja od 2.0 samo 1% upadnog svjetla prolazi kroz film, dok je kod zacrnjenja od 4.0 taj postotak svega 0.01%. Zacrnjenja veća od 4.0 se ne preporučuju jer za čitanje takvih radiograma je potrebna puno jača svjetlina iluminatora od uobičajenih. Zacrnjenje radiograma se mjeri pomoću denzitometra. On se sastoji od fotoelektričnog senzora koji mjeri količinu svjetla propuštenog kroz film. Film se smješta između izvora svjetla i senzora, a rezultat zacrnjenja se prikazuje na ekranu denzitometra. [5]

Kontrast filma se odnosi na razlike u zacrnjenju između dva različita područja na dobivenom radiogramu, D_1 i D_2, koje su posljedica vrste korištenog filma, načinu ekspozicije i obrade filma. Ekspozirajući film na taj način da dobijemo veće radiografsko zacrnjenje rezultirat će i povećanjem kontrasta radiograma.

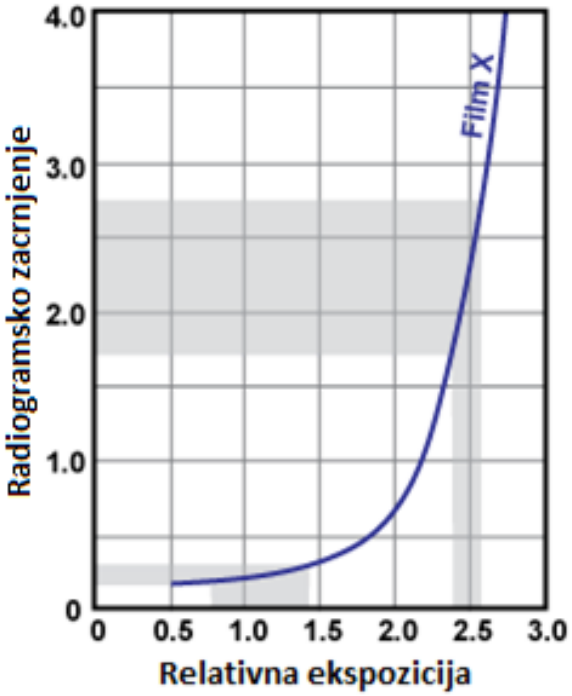
3.3.1.3. *Karakteristična krivulja*

Karakteristična krivulja ili krivulja zacrnjenja filma prikazuje odnos između povećanja ekspozicije filma i dobivenog radiogramskog zacrnjenja. Ekspozicija (E) predstavlja dozu radijacije primijenjenu na emulziju filma i produkt je intenziteta radijacije (I_0) i vremena ekspozicije (t):

$$E = I_0 * t \tag{6}$$

Iz oblika krivulje, na Slici 5., možemo vidjeti da kada film prikazuje slabu interakciju fotona s materijalom (što rezultira manjim zacrnjenjem) nagib krivulje je mali. U tom području potrebne su velike promjene u ekspoziciji da bi se dobile male promjene u radiogramskom

zacrnjenju, što predstavlja malu osjetljivost filma. Velika osjetljivost se dobiva kada logaritam ekspozicije prijeđe vrijednost 2.0, gdje je nagib krivulje velik. U ovom području i najmanja promjena u duljini ekspozicije rezultira velikom promjenom radiogramskog zacrnjenja. [3]



Slika 4. Karakteristična krivulja filma [3]

3.3.2. *Oštrina slike*

Oštrina slike predstavlja strmost prijelaza s jednog područja određenog zacrnjenja na drugo područje. Kao i kod kontrasta, veća oštrina slike nam olakšava očitavanje radiograma i pronalaženje eventualnih defekata u materijalu. Na Slici 6. gornji radiogram posjeduje veću oštrinu od donjeg, te je na njemu je strmost promjene zacrnjenja puno veća nego na donjem radiogramu kod koje je taj prijelaz zamagljen, tj.postepen. Također je vidljivo da su detalji na gornjem radiogramu lakše uočljiviji, primjer je mala točkica koja je na donjem slučaju potpuno zamagljena. Može se reći da većom oštrinom slike dobivamo vjerniji prikaz ispitnog uzorka. Kolika će biti oštrina slike ovisi o raznim geometrijskim faktorima i o svojstvima filma.



Slika 5. Razlike u radiogramskim oštrinama [5]

Da bi oštrina slike bila što veća veličina izvora zračenja mora biti što manja, tj. mora težiti točci. Također oštrina se može povećati i povećanjem udaljenosti izvora zračenja od objekta snimanja. Međutim povećanjem te udaljenosti pada intenzitet zračenja koje prolazi kroz objekt, što onda zahtjeva dulje ekspozicije. Udaljenost filma od objekta snimanja uvijek mora biti što je manja moguća radi povećanja oštrine. [5]

3.3.2.1. Granulacija filma [3]

Kada radiograf stavimo na iluminator primjećuje se da su sićušne razlike u zacrnjenju filma prikazane zrnatom strukturom. Takav vizualni prikaz stupnjevanja zacrnjenja na radiogramu nazivamo granulacijom. Valna duljina zračenja će utjecati na tu prividnu zrnatost, jer kako se valna duljina smanjuje penetracija zračenja se povećava, što rezultira u povećanju granulacije filma. Također produljenje vremena razvijanja filma pridonosi povećanju granulacije krajnjeg radiograma. Uvijek treba težiti dobivanju filma što finije granulacije jer oni omogućavaju dobivanje visoko oštrih radiograma.

4. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA

Tijekom posljednjih dvadesetak godina intenzivno se tražila zamjena za radiografski film. Za zamjenu radiografskog filma kao medija za dobivanje slike u radiografiji postoji više razloga, kao npr. nepraktičnost u rukovanju (velike i ne funkcionalne arhive), podložnost različitim oštećenjima, nemogućnost naknadne obrade slike (eng. *post-processing*) i velika izloženost zračenju. U uklanjanju ovih nedostataka najviše se nametnula računalna radiografija (eng. CR-*Computed Radiography*) koja danas u sve većoj mjeri pronalazi primjenu u raznim granama industrije, uspješno zamjenjujući konvencionalnu radiografiju.

Sustavi računalne radiografije u osnovi imaju isti princip rada kao u konvencionalnoj radiografiji. Rendgenska cijev emitira ionizirajuće zračenje koje penetrira kroz ispitni uzorak i u njemu izaziva fluorescenciju. Detekcija tog zračenja predstavlja glavnu razliku ovih dviju metoda, hoćemo li sliku pohraniti na film ili slikovnu ploču. Računalna radiografija u kojoj slikovne ploče (eng.*imaging plates*) zamjenjuju radiografski film, ima mogućnost primjene u svim slučajevima u kojima je do sada korišten film, uz brže dobivanje rezultata bez kemijske obrade za dobivanje slike. Radiogrami dobiveni tim slikovnim pločama se čitaju i spremaju u digitalnom obliku za daljnje pregledavanje i arhiviranje. Zbog toga što se u zrakoplovnom održavanju i industriji moraju trajno čuvati zapisi ovo predstavlja veliku prednost u smanjenju potrebnih postrojenja.

Snimanje radiograma sustavima računalne radiografije je proces koji se sastoji od dva koraka. Slika se ne formira direktno, već kroz međukorak, kako je slučaj i kod klasičnog filma. Slika se kasnije pretvara u svjetlost stimulacijom na laserskom skeneru te se tako dobiva slika u digitalnom formatu. Za razliku od klasičnog filma, gdje se latentna slika sprema u kristale srebro-bromida te se razvija kemijskim putem, kod sustava za računalnu radiografiju se latentna slika sprema u fotosenzitivni sloj fosfora. Digitalni zapis radiograma moguće je pohraniti i analizirati na računalu te prikazati na monitoru visoke rezolucije. Ovakvi sustavi imaju vrlo velik dinamički raspon u odnosu na klasični film i zahtijevaju mnogo manje doze zračenja što je velika prednost s aspekta sigurnosti i vremena ekspozicije.

Iako ne daje rezultate jednake rezolucije kao film najfinije granulacije, računalna radiografija je alternativa za film srednje do grube finoće.[3] Važnost računalne radiografije nazire se u činjenici da omogućava kvalitetniju obradu radiograma. Računalo se koristi kako bi se

digitalni zapis radiograma obradio na način koji omogućava najvišu kvalitetu prikaza što ranije kod uobičajenih pregleda radiograma na iluminatoru nije bilo moguće.

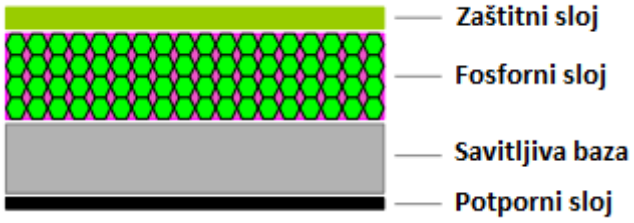
Zbog navedenih prednosti, računalna radiografija je otvorila nove mogućnosti u detekciji i analizi defekata u ispitnim uzorcima. Zato su u nastavku detaljnije obrađeni dijelovi koji čine sustav računalne radiografije cjelinom.

4.1. Slikovne ploče

Računalna radiografija koristi slikovne ploče kao detektor ionizirajućeg zračenja. One u sebi sadrže fotosenzitivni sloj fosfora koji zadržava latentnu sliku. Latentna slika se zatim skenira pomoću laserskog skenera , te informacija sadržana u njoj se otpušta kao vidljiva svjetlost, a jačina svjetlosti će ovisiti o stupnju ionizacije fosfornog sloja. Svjetlost se zatim detektira i pretvara u digitalni zapis na monitoru visoke rezolucije. [6]

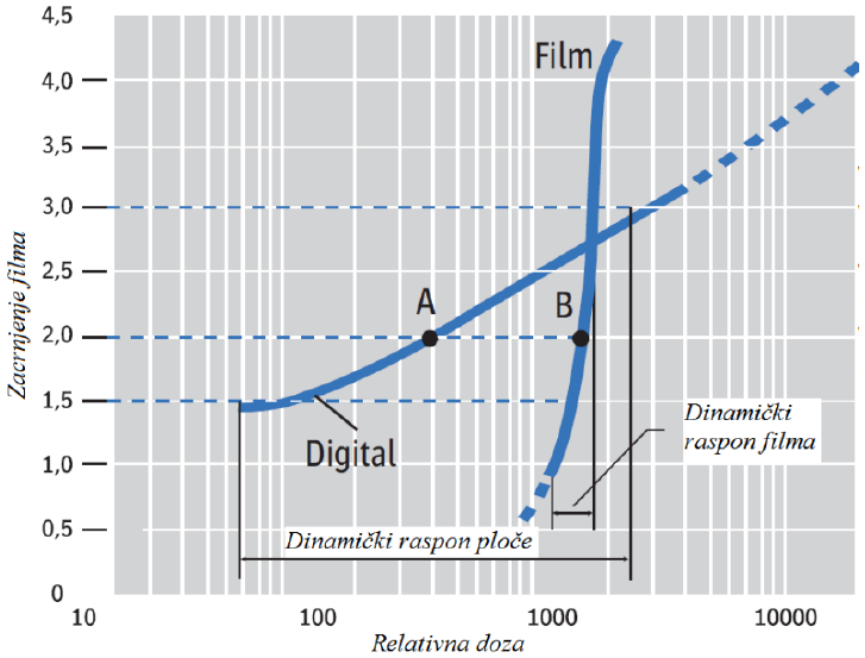
Praktičnost upotrebe slikovnih ploča se iskazuje i u tome što se one mogu pakirati u iste kazete kao film i isti izvori zračenja koji se koriste kod konvencionalne radiografije su upotrebljivi i za računalnu. Njihova kompatabilnost olakšava eventualnu tranziciju s konvencionalne na računalnu radiografiju što i pojeftinjuje sam proces. Kvaliteta dobivene slike je izrazito bitna kod interpretacije defekata u materijalu; ona će kod konvencionalne ovisiti o osjetljivosti filma, procesu razvijanja i ponajviše o ljudskom faktoru, dok kod računalne govorimo o osjetljivosti slikovne ploče, parametrima laserskog skenera i monitora što bi značilo smanjenje utjecaja ljudskog faktora.

Fosforni sloj se nanosi na savitljivu bazu i prekriven je zaštitnim slojem koji ga štiti od mehaničkih oštećenja. Dodatni laminatni sloj se stavlja kako bi ploči dao određena mehanička svojstva poput fleksibilnosti; premda one nisu fleksibilne poput filma [3]. Na Slici 7. je prikazana struktura tipične slikovne ploče.



Slika 6. Presjek slikovne ploče [7]

Prednost slikovnih ploča nad filmom se najviše očituje u njihovom širokom dinamičkom rasponu. To rezultira time da slikovne ploče neće biti toliko osjetljive na duljinu ekspozicije kao što je to bio slučaj kod filma. Karakteristična krivulja konvencionalnog filma pokazuje da s početkom primjene ekspozicije dolazi do malih promjena u kontrastu radiograma, no u drugom dijelu krivulje s malim promjenama u ekspoziciji kontrast se eksponencijalno mijenja. Linearni tip karakteristične krivulje slikovne ploče označuje njihovu malu osjetljivost na promjene u parametrima snimanja, što dovodi do toga da će biti manje grešaka i ponavljanja snimanja zbog krivo odabranih parametara. Ono što nam u konačnici pruža širok dinamički raspon je mogućnost da u istom snimanju snimimo objekt s velikim rasponom debljina. Usporedbu karakterističnih krivulja filma i slikovnih ploča vidimo na Slici 8.



Slika 7. Usporedba karakterističnih krivulja [3]

Iz slike je vidljivo da slikovne ploče zahtijevaju i manje vrijeme eksponiranja. Ako bismo htjeli dobiti zacrnjenje 2 na radiogramu, potrebno vrijeme eksponiranja je tada kod slikovnih ploča pet do deset puta kraće nego kod filma (usporedba točke A i B na slici). Zbog kraćeg vremena ekspozicije ili pak korištenja nižih energija kod prozračivanja materijala, računalna radiografija dobiva dodatnu prednost nad konvencionalnom zbog poboljšane sigurnosti osoblja i brzine procesa. Nažalost s nižim energijama dolazi do smanjenja kvalitete radiograma; naime kod nižih energija slikovne ploče su osjetljive na raspršeno zračenje koje povećava šum na dobivenoj slici. [3]

4.1.1. Podjela slikovnih ploča

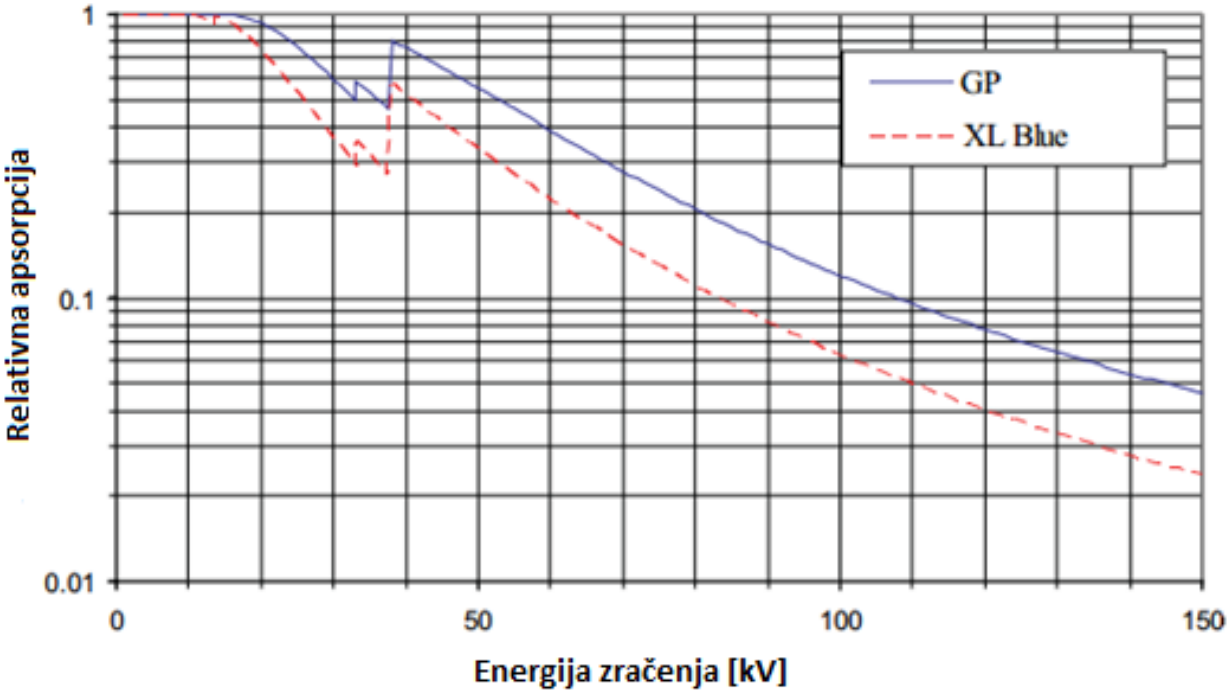
U praktičnom dijelu rada su korištene slikovne ploče proizvođača Kodak, točnije slikovna ploča za opće namjene GP (eng.*General Purpose*) i ploča visoke rezolucije XL Blue. Što je fosforni sloj u ploči tanji, a fosforne čestice manje i ravnomjernije raspoređene to će rezolucija slike biti veća. Tehničke karakteristike GP i XL Blue ploče su dane u Tablici 2.

Tablica 2. Tehničke karakteristike slikovnih ploča [8]

Vrsta ploče	**Ukupna debljina [μm]**	**Debljina fosfornog sloja [μm]**	**Debljina zaštitnog sloja [μm]**	**Debljina potpornog sloja [μm]**
GP	584	290	11	29
XL Blue	436	160	4	18

Energija pohranjena u fosfornom sloju se tokom vremena smanjuje što rezultira u gubljenju signala na slici. Ovakvo slabljenje slike se sprječava što bržim očitavanjem slikovne ploče na laserskom skeneru poslije ekspozicije. Proizvođač korištenih ploča, Kodak Industrex, garantira zadržavanje do 75% signala nakon 4 dana na svim tipovima slikovnih ploča.

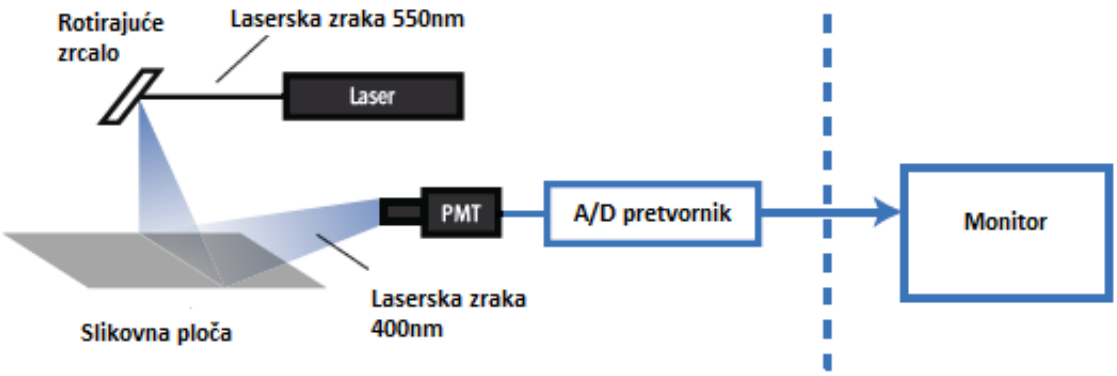
Jedna od bitnijih razlika GP i XL Blue ploča je njihova sposobnost apsorpcije ionizirajućeg zračenja. Za istu primijenjenu energiju zračenja XL Blue ploče će apsorbirati manje zračenja od ploča za opće namjene GP (Slika 9.). [8]



Slika 8. Odnos apsorpcije fotona i energija zračenja [8]

4.2. Laserski skener

Izlaganjem fosfornog sloja iz slikovne ploče ionizirajućem zračenju dio elektrona se pobudi i prelazi na viši energetski nivo gdje ostaje zarobljen u polustabilnom stanju, tako nastaje latentna slika. Za razliku od konvencionalne radiografije očitanje latentne slike se ne izvršava kemijskim, već optičkim putem. Optičko očitanje se izvršava s fokusiranom laserskom zrakom visoke energije koja uzrokuje fluorescenciju u fosfornom sloju. Intenzitet fluorescencije je direktno proporcionalan broju zarobljenih elektrona, a broj zarobljenih elektrona količini apsorbiranog zračenja u fosfornom sloju [6]. Emitirana svjetlost se pretvara u električni napon putem PMT cijevi (eng. *Photo Multiplier Tube*) koja mjeri intenzitet fluorescencije. Valna duljina laserske zrake je 550 nm, a valna duljina emitirane svjetlosti 400 nm. Zatim se slika analogno-digitalnim pretvornikom pretvara u digitalni oblik za jednostavno pregledavanje na zaslonu računalnog monitora u odgovarajućem softveru. Svi laserski skeneri osim što očitavaju latentnu sliku sa slikovne ploče, namijenjeni su i za njezino brisanje s ploče tako ona postaje opet upotrebljiva. Uz pravilno korištenje slikovna ploča može biti iskorištena do čak 1000 puta [3].



Slika 9. Shema rada laserskog skenera [3]

5.NORME U ZRAKOPLOVSTVU

Tijekom eksploatacije zrakoplova, krila su konstantno podvrgnuta raznim naprezanjima. U takvim uvjetima postoje mjesta koja su izrazito osjetljiva na stvaranje pukotina. Kod ispitivanja integriteta ramenjače zrakoplova posebna pažnja se daje provrtima zakovica gdje propagacija pukotine može dovesti do katastrofalnih posljedica. Vizualna inspekcija je veoma važna kod održavanja zrakoplova, ali pukotine se mogu nalaziti gdje je njihova detekcija vizualnom metodom gotovo nemoguća. Zato radiografija igra važnu ulogu u detekciji zakovičnih pukotina, jer je bitno pukotine uočiti što prije kako ne bi došlo do prevelike propagacije. Da bi mogli detektirati i najmanje pukotine radiografskom metodom potrebno je mnogo znanja i iskustva u postavi same opreme i odabiru ekspozicije u odnosu na ispitivani objekt kako bi dobili radiogram zadovoljavajuće oštrine i kontrasta.

U zrakoplovstvu pri radiografskom ispitivanju potrebno je pridržavati se zadanih normi, konkretno HRN EN ISO 5579. Ova norma utvrđuje opća pravila za tehničko ispitivanje metalnih materijala prozračivanjem rendgenskim i gama-zrakama, u svrhu pronalaženja pogrešaka primjenom tehnike filma. Tako su propisane dvije radiografske tehnike, tj. dva razreda:

- Razred A: Temeljna tehnika
- Razred B: Poboljšana tehnika ispitivanja

Preko zadanih normi su propisani uvjeti koji se trebaju zadovoljiti za određeni razred, od potrebnog zacrnjenja na radiogramu, udaljenosti izvora od ispitnog objekta, energije zračenja za određenu debljinu objekta, upotreba filtera itd. U praksi uvijek treba težiti zadovoljavanju B razreda, ali ako iz tehničkih razloga nije moguće zadovoljiti jedan od uvjeta u dogovoru s proizvođačem zrakoplova se može izvesti ispitivanje po uvjetima razreda A.[9]

5.1. Zacrnjenje

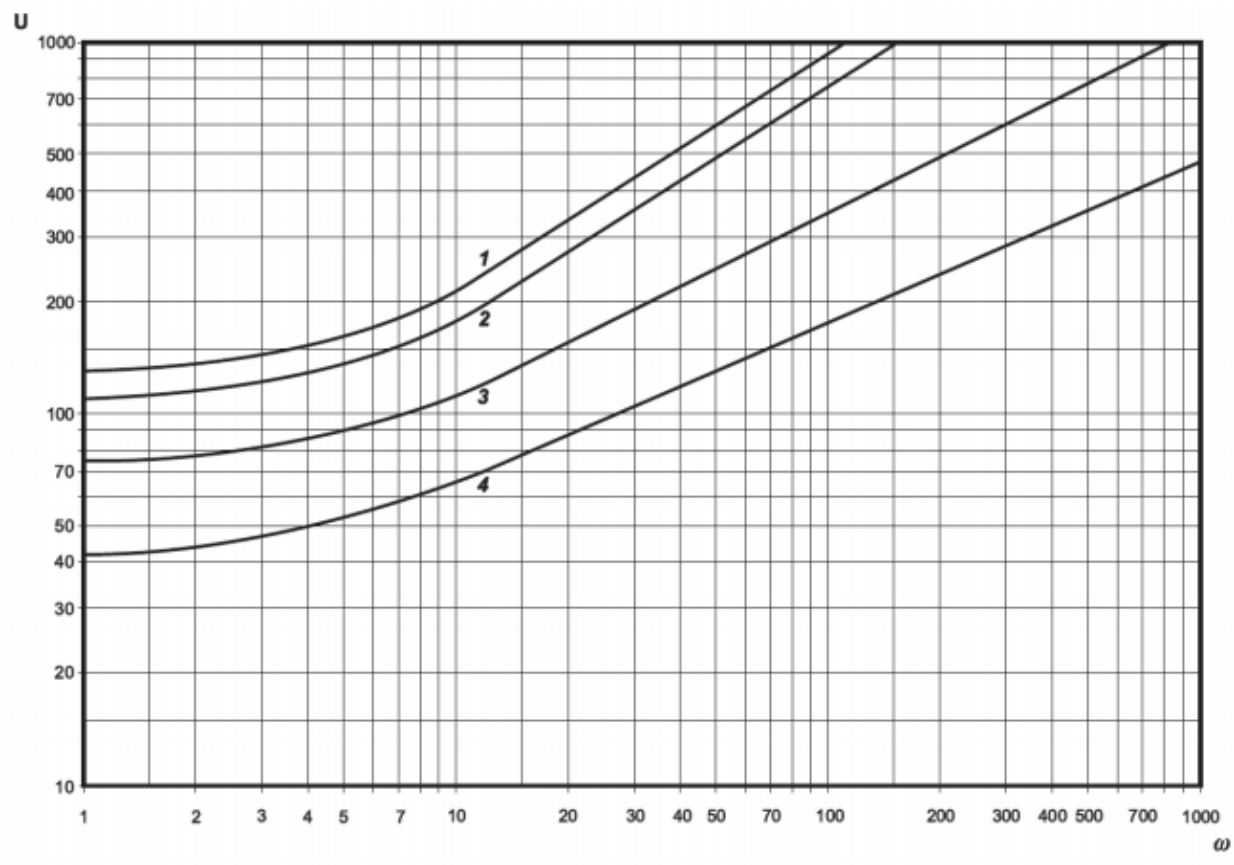
Kontrast predstavlja stupanj različitosti u zacrnjenju između dva područja na radiogramu, tj. što je on veći lakša je detekcija nepravilnosti. Kod računalne radiografije kada govorimo o kontrastu to označava omjer između intenziteta piksela na dobivenoj slici. U tablici 3. je prikazano koliko zacrnjenje trebaju postići radiogrami da zadovolje određeni razred.

Tablica 3. Zacrnjenje radiograma[9]

Razred	Zacrnjenje[1)]
A	≥ 2,0
B	≥2,3
[1)] Dopušteno odstupanje u mjerenju ± 0,1	

5.2. Izbor napona cijevi [9]

Da bi se stvorila i održala dobra osjetljivost pri pronalaženju pogrešaka, napon cijevi bi trebao biti toliko nizak koliko je moguće. Najviši napon cijevi ovisi o debljini ispitnog objekta kako je prikazano na Slici 11.



Slika 10. Odnos napona cijevi i debljine materijala [9]

Gdje je:
U – Napon rendgenske cijevi (u kV)
w – Penetrirana debljina materijala (u mm)
1 – Bakar, nikal i njihove legure
2 – Čelik
3 – Titan i njegove legure
4 – Aluminij i njegove legure

5.3. Indikatori kvalitete radiograma

Kako bi mogli procijeniti i kvantificirati kvalitetu radiograma ona mora poprimiti nekakvu numeričku vrijednost, i za to koristimo indikatore kvalitete radiograma (eng. IQI – *Image Quality Indicators*). Kako smo u praktičnom dijelu rada za ocjenu kvalitete radiograma koristili žičane indikatore bilo je potrebno pridržavati se norme EN ISO 19232-1 koja opisuje način određivanja kvalitete.

IQI sustav se bazira na seriji od 19 žica različitih promjera kako je prikazano u slici 17. Svaki indikator se sastoji od 7 žica, a na njegovoj identifikacijskoj oznaci se stavlja broj najdeblje žice koju sadrži. Indikatore je potrebno postavljati na ispitni objekt na strani izvora zračenja, a ako to nije moguće potrebno ih je postaviti na film uz priloženo slovo "F" pokraj indikatora kako bi se obilježila takva situacija. Također indikatori moraju biti izrađeni od istog materijala kao ispitni objekt, što će u našem slučaju biti aluminij.

Image quality indicator including				Wire			Wire centreline spacing, *a*
W 1	W 6	W 10	W 13	Wire number	Nominal wire diameter	Tolerances	
X				W 1	3,20		$9{,}6\,^{+1}_{0}$
X				W 2	2,50	± 0,03	$7{,}5\,^{+1}_{0}$
X				W 3	2,00		$6\,^{+1}_{0}$
X				W 4	1,60		
X				W 5	1,25		
X	X			W 6	1,00	± 0,02	
X	X			W 7	0,80		
	X			W 8	0,63		
	X			W 9	0,50		
	X	X		W 10	0,40		
	X	X		W 11	0,32		
	X	X		W 12	0,25	± 0,01	$5\,^{+1}_{0}$
		X	X	W 13	0,20		
		X	X	W 14	0,16		
		X	X	W 15	0,125		
		X	X	W 16	0,100		
			X	W 17	0,080	± 0,005	
			X	W 18	0,063		
			X	W 19	0,050		

Slika 11. Sustav žičanih indikatora kvalitete [10]

Broj najtanje vidljive žice na radiogramu predstavlja kvalitetu slike, uz uvjet da žica treba biti vidljiva u minimalnoj duljini od 10 mm kako bismo mogli prihvatiti da je vidljiva. Također

kvaliteta se može izraziti preko debljine ispitnog materijala, npr. ako najtanja vidljiva žica promjera 0.1 mm, a debljina prozračenog materijala 10 mm to označuje onda postignutu osjetljivost radiograma od 1%.

Prilikom radiografskog ispitivanja na održavanju zrakoplova potrebno je osigurati osjetljivost radiograma od 2%. [11]

5.4. Norme za računalnu radiografiju

Standardi za računalnu radiografiju su formalizirani i objavljeni 2005.godine, te se primjenjuju u Europi i u Sjedinjenim Američkim Državama. U njima je računalna radiografija klasificirana (EN 14784-1) i donesene su preporuke za njezino korištenje kako bi se osigurala dobra mjerna ponovljivost (EN 14784-2).

Ove norme se baziraju na već prihvaćenim normama za konvencionalnu radiografiju, i u njima se računalna radiografija klasificira prema sljedećim standardima:

- minimalnom normaliziranom odnosu signal-šum (SNR_n)
- maksimalnoj prostornoj razlučivosti (SR_b)

5.4.1. Odnos signal-šum SNR_N [12]

U normama možemo pronaći standarde za minimalni odnos signal-šum koji moraju zadovoljiti određene klase filmova. U tablici 4. su prikazane te vrijednosti za klase filmova koji se koriste prilikom radiografskog ispitivanja ramenjače na zrakoplovu Canadair CL-415.

Tablica 4. Normirane minimalne SNR vrijednosti za pojedine klase filmova [12]

Klasa filma	SNR (D=2)
C3	78
C5	52

Kod određivanja odnosa signal-šum na digitalnim slikama potrebno je izvršiti korekciju izmjerene vrijednosti (SNR_{meas}) kako bismo ju mogli usporediti s vrijednostima filma . U normi EN 14784-1 je zadan izraz za izvršenje korekcije:

$$SNR_N = SNR_{meas} \times \frac{88.6\mu m}{SR_b} \quad (7)$$

5.4.2. Prostorna razlučivost SR_b

Prostornu razlučivost digitalne slike određujemo koristeći normu EN ISO 19232-5 koja opisuje način upotrebe dvostrukih žičanih indikatora kvalitete radiograma. Indikatori se sastoje od 13 parova žica, najčešće načinjenih od volframa i platine, gdje je svaki par žica promjera *d* međusobno razmaknut za veličinu tog istog promjera. Način određivanja prostorne razlučivosti preko ovih indikatora biti će kasnije prikazan u ovome radu.



Slika 12. Indikator kvalitete s dvostrukim žicama [13]

Na Slici 14. je prikazana tablica zahtijevanih prostornih razlučivosti s obzirom na energiju zračenja i debljinu stijenke, zadanih u normi EN ISO 19232-5.

Radiation source	Wall thickness w [mm]	Class IPA		Class IPB	
		Max. Pixel[1] Size [µm]	Double wire IQI-number[2]	Max. Pixel[1] size [µm]	Double wire IQI-number[2]
X-ray Up ≤ 50 kV	w < 4	40	> 13[3]	30	>> 13[4]
	4 ≤ w	60	13	40	> 13[3]
X-ray 50 < Up ≤150 kV	w < 4	60	13	30	>> 13[4]
	4 ≤ w < 12	70	12	40	> 13[3]
	w ≥ 12	85	11	60	13
X-ray 150 < Up ≤ 250 kV	w < 4	60	13	30	>> 13[4]
	4 ≤ w < 12	70	12	40	> 13[3]
	w ≥ 12	85	11	60	13
X-ray 250 < Up ≤ 350 kV	12 ≤ w < 50	110	10	70	12
	w ≥ 50	125	9	110	10
X-ray 350 < Up < 450 kV	w < 50	125	9	85	11
	w ≥ 50	160	8	110	10
Yb 169,Tm 170		85	11	60	13
Se 75, Ir 192	w < 40	160	8	110	10
	w ≥ 40	200	7	125	9
Co 60		250	6	200	7
X-ray Up > 1MeV		250	6	200	7

Slika 13. Prostorne razlučivosti s obzirom na energiju zračenja i debljinu stijenke [12]

6. ISPITIVANJE ZRAKOPLOVNIH KONSTRUKCIJA

Kao primjer ispitivanja zrakoplovnih konstrukcija radiografskom metodom uzet je primjer ispitivanja krila zrakoplova Canadair CL-415. Radiografsko ispitivanje krila ovog tipa zrakoplova spada pod C-check, koji se izvršava svakih 6 godina. Procedura ispitivanja u otvorenim prostorima poput hangara je vrlo striktna kako bi se zaštitilo osoblje. Iz tog razloga prilikom snimanja nije dopušten ulazak neautoriziranog osoblja u hangar, a izvršitelji snimanja upravljaju generatorom rendgenskih zraka daljinskim upravljačem.

Snimanje krila zrakoplova se odvija tako da se generator rendgenskih zraka postavlja na krilo na točno određenu poziciju propisanu *maintenance manual-om.* S donje strane krila se postavlja radiografski film, točnije dvije vrste filmova C3 i C5 postavljenih jedan na drugi. Razlog ove metode dvostrukog filma je širok raspon snimanih debljina. Tip filma C3 je sporiji i zbog svoje fine granulacije pogodan za manje debljine (pr. uzdužnice), dok je tip filma C5 brži i ima grublju granulaciju pa je pogodan za pregled debljih elemenata konstrukcije (pr.ramenjača).

Kako je objašnjeno u prošlom poglavlju odabir pravilne energije zračenja ovisi o debljini ispitnog elementa. Pošto se u praksi vrši snimanje cijelog krila i obuhvaćaju se elementi različitih debljina odabir točne energije predstavlja određeni problem. U *maintenance manual-u* su zadani sljedeći parametri snimanja:

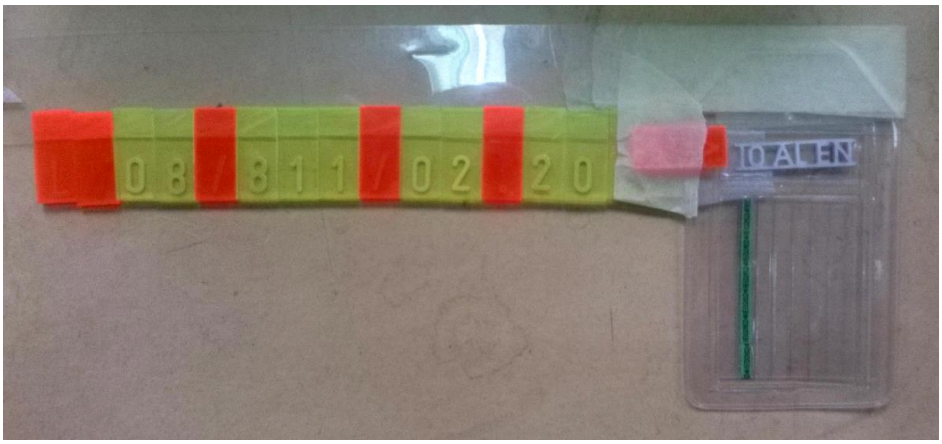
- napon: 80 kV
- ekspozicija: 35-60 s (ovisno o poziciji krila)
- jačina struje: 10 mA

Ovi parametri su uzeti za referentnu debljinu od 20 mm, a do toga se došlo eksperimentalnim ispitivanjima. [11]

Na Slici 15. vidimo primjer radiograma koji prikazuje dio ramenjače krila zrakoplova Canadair CL-415. Na radiogramu možemo primijetiti i postavljene oznake koje označuju snimanu poziciju krila, te indikatore kvalitete (Slika 16.). Tehnička dokumentacija nalaže da je potrebno uočiti žicu promjera 0.2 mm kako bi radiogram zadovoljio potrebnu osjetljivost.



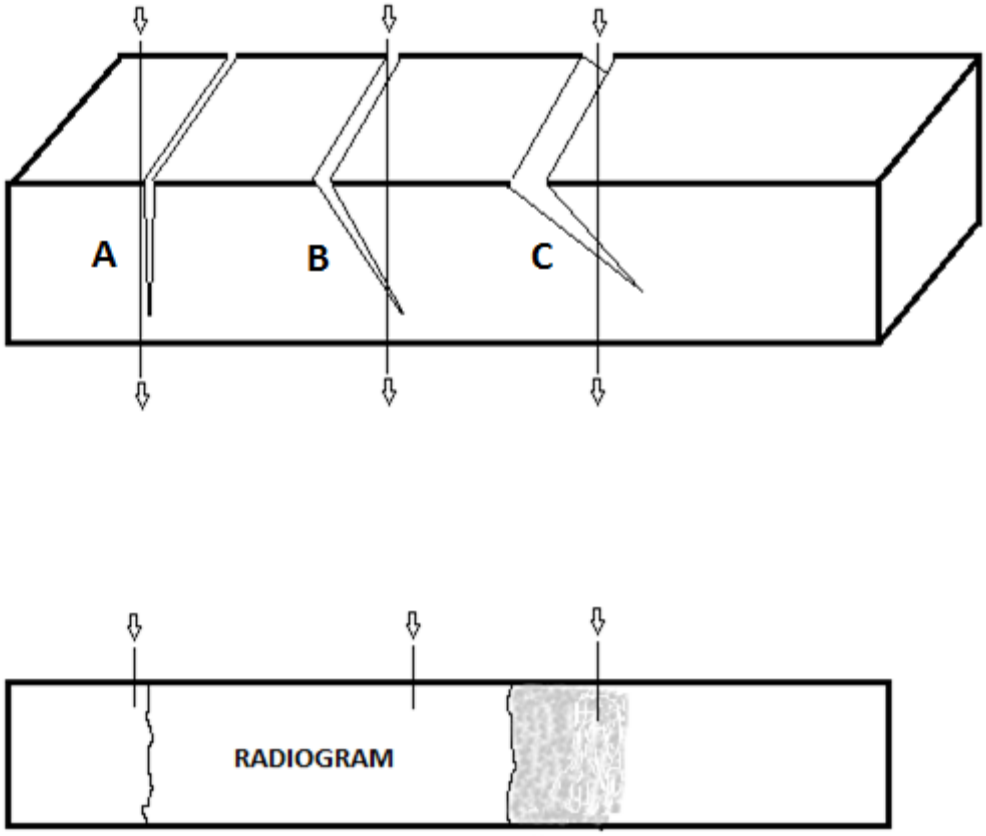
Slika 14. Radiogram ramenjače zrakoplova



Slika 15. Indikatori kvalitete i identifikacijske oznake radiograma

Kod pregleda ovakvih radiograma posebna se pozornost daje pronalasku korozije i pukotinskih oštećenja. Velika je vjerojatnost da će se pukotinska oštećenja pojaviti kod provrta zakovičnih spojeva, a njihova detekcija ponekad nije jednostavna. Detekcija pukotine će ovisiti o njezinoj veličini i orijentaciji prema snopu zračenja, pa je iz tog razloga propisano da se kod inspekcije pukotina na zrakoplovnim konstrukcijama uzimaju u obzir samo ona područja ozračena unutar 10° snopa zračenja. [11]

Ako je pukotina tako orijentirana da je paralelna sa snopom zračenja postojat će veća vjerojatnost za njezinom detekcijom, kako je prikazano na Slici 17. Pukotina “A“ će biti vidljiva na radiogramu, dok će se pukotina “B“ teže uočiti zbog njezina mala volumena i orijentacije naspram snopa zračenja. Zbog većeg volumena pukotina “C“ će biti vidljiva na radiogramu, ali sam manjim kontrastom od pukotine “A“.



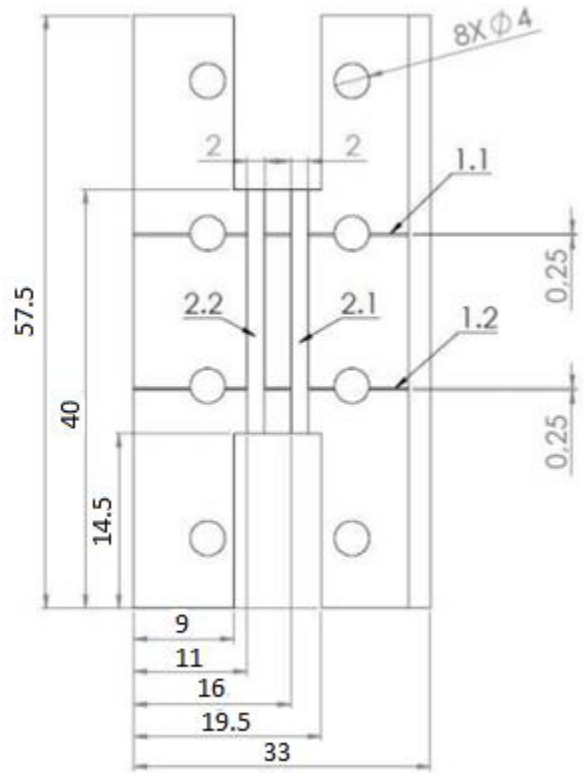
Slika 16. Utjecaj orijentacije i veličine pukotine na kvalitetu radiograma [11]

7. PRAKTIČNI DIO

U sklopu praktičnog dijela ovog rada izvršeno je laboratorijsko ispitivanje dvaju elementa ramenjače zrakoplova Canadair CL-415 pomoću sustava računalne radiografije. Cilj eksperimenta je određivanje mogućnosti sustava računalne radiografije da zadovolji kriterije postavljene od strane normi koje se koriste pri ispitivanju ramenjače na održavanju zrakoplova. Dobiveni radiogrami su analizirani u softverskim paketima mjerenjem kvantitativnih pokazatelja kvalitete radiograma (odnos signal-šum, prostorna razlučivost). Snimanja su izvršena u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

7.1. Ispitni uzorak 1.

Predmeti ispitivanja su dvije aluminijske pločice debljine 6 mm koje su bile sastavni dio većeg dijela ramenjače koju je za potrebe Fakulteta strojarstva i brodogradnje donirao Zrakoplovno tehnički centar u Velikoj Gorici. Na uzorcima je dodatno izrađen niz umjetnih nepravilnosti koje su simulirale pukotinska i korozijska oštećenja materijala. Na slici 18. je prikazan Uzorak 1. sa svojim dimenzijama i umjetno izrađenim oštećenjima.



Slika 17. Ispitni uzorak 1. [14]

Uzorak 1. ima oblik slova "*H*" te se na njemu nalazi 8 provrta. Kroz središnja 4 provrta prolaze umjetno izrađena dva kanala koja simuliraju pukotinska oštećenja. Razlog tome je to što su provrti zakovičnih spojeva na ramenjači kritična mjesta za nastanak pukotina. Korozija je jedan od najopasnijih oblika degradacije materijala pa je u tu svrhu ona simulirana s dva kanala po sredini uzorka. Tablica 5. prikazuje površinske i u dubinske dimenzije navedenih oštećenja.

Tablica 5. Klasifikacija simuliranih oštećenja na Uzorku 1.

Oštećenje		**Tip oštećenja**	**Dimenzije oštećenja**	
Skupina	Oznaka		Površinski	Dubinski
1.	1.1	Pukotina	0,25 [mm]	0,06 [mm]
	1.2	Pukotina	0,25 [mm]	0,12 [mm]
2.	2.1	Korozija	36 [mm^2]	0,06 [mm]
	2.2	Korozija	36 [mm^2]	0,12 [mm]

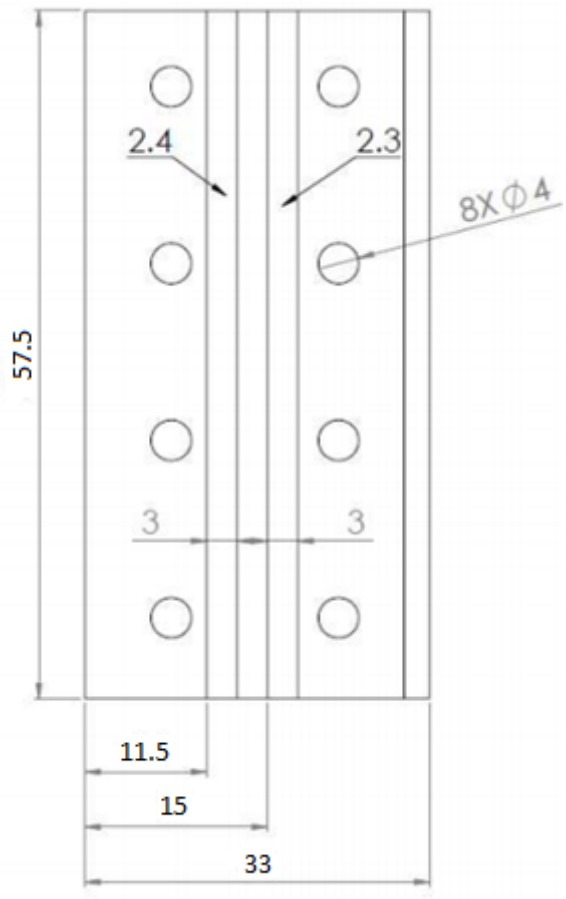
U prijašnjem poglavlju o normama u zrakoplovstvu spomenuto je da prilikom ispitivanja radiografskom metodom potrebno osigurati osjetljivost radiograma od 2%. Zbog tog razloga su na Uzorku 1. debljine 6 mm izrađena dubinska oštećenja od 0,12 mm, dok će eventualna vidljivost oštećenja od 0,06 mm predstavljati osjetljivost radiograma od 1%.

7.2. Ispitni uzorak 2.

Radi usporedbe s prvim uzorkom izrađena je još jedna pločica od istog komada ramenjače. Na njoj su izrađena 2 kanala simulirajući koroziju, ali s većim dubinskim i površinskim oštećenjima. U tablici 6. vidimo kako su dimenzije dubinskih oštećenja 0.8 mm i 1.5 mm što će predstavljati osjetljivost od 13% i 25% u odnosu na debljinu pločice od 6 mm.

Tablica 6. Klasifikacija simuliranih oštećenja na Uzorku 2.

Oštećenje		**Tip oštećenja**	**Dimenzije oštećenja**	
Skupina	Oznaka		Površinski	Dubinski
2.	2.3	Korozija	174 [mm^2]	0.8 [mm]
	2.4	Korozija	174 [mm^2]	1.5 [mm]



Slika 18. Ispitni uzorak 2. [14]

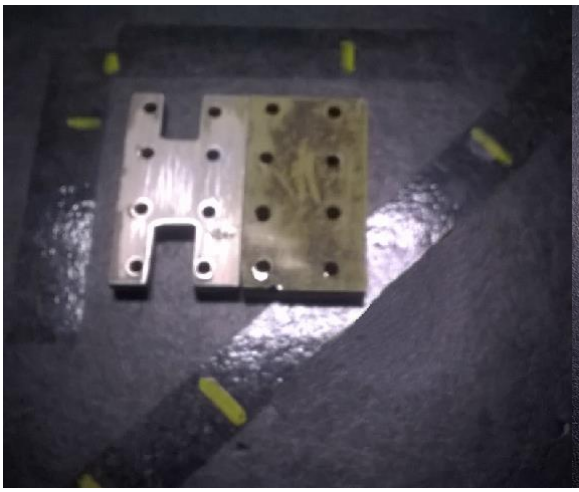
7.3. Eksperimentalni postav

Radi bolje analize računalne radiografije korištene su dvije vrste slikovnih ploča: GP i XL Blue. Samim time provedena su *dva* snimanja u laboratoriju s istim postavom ispitnih uzoraka i indikatora kvalitete, ali s različitim slikovnim pločama. Kao izvor zračenja korištena je rendgenska cijev koja je smještena na pomičnom stalku kako bi se mogla namještati udaljenost od ispitnog objekta. Rendgenska cijev je bila postavljena na udaljenosti od 1000 mm od ispitnih uzoraka, koji su bili postavljeni licem prema slikovnoj ploči radi dobivanja što veće oštrine slike kako je prikazano na Slici 21.

Preko oba ispitna uzorka postavljen je žičani indikator kvalitete radiograma razreda W10, što bi značilo da najdeblja žica ima promjer od 0.4 mm, a najtanja 0.1 mm (Slika 12.). Pored uzoraka postavljen je i indikator kvalitete s dvostrukim žicama radi određivanja prostorne razlučivosti slike. Postav indikatora kvalitete je vidljiv na Slici 22.



Slika 19. Rendgenska cijev



Slika 20. Postav ispitnih uzoraka



Slika 21. Postav Indikatora kvalitete

Na Slici 11. je prikazan dijagram odnosa energije zračenja i debljine ispitnog materijala koji je definiran u normi HRN EN ISO 5579. Prema dijagramu za debljinu materijala od 6 mm treba podesiti napon rendgenskog uređaja na 55 kV. Nažalost rendgenski uređaj u laboratoriju se primjenjuje za rad između 100 kV do 300 kV jer je namijenjen za snimanje objekata većih

debljina. Iz tog razloga se prilikom snimanja napon rendgenske cijevi podesio na najmanji mogući, odnosno 100 kV uz konstantnu struju od 3 mA. Plan snimanja je prikazan u tablici 7.

Tablica 7. Plan provedbe snimanja uzoraka

Snimka	Ispitni uzorci	Napon	Struja	Ekspozicija	Vrsta ploče
1.	Uzorak 1. i Uzorak 2.	100 kV	3 mA	45 sekundi	GP
2.	Uzorak 1. i Uzorak 2.	100 kV	3 mA	65 sekundi	XL Blue

7.4. Digitalizacija slike

Nakon izvršenih snimanja slikovne ploče stavljene su skener VMI 5100MS radi digitalizacije slike. Specifikacije korištenog skenera su dane u tablici 8.

Nakon skeniranja slike su pregledane na monitoru visoke rezolucije sa 16 bitnim (65536 nijansi sive boje) prikazom. Kako bi se sačuvala kvaliteta slike ona je pohranjena u TIFF formatu (eng. *Tagged Image File Format*).



Slika 22. Skener VMI 5100MS i monitor visoke rezolucije [15]

Tablica 8. Tehničke karakteristike skenera VMI 5100MS

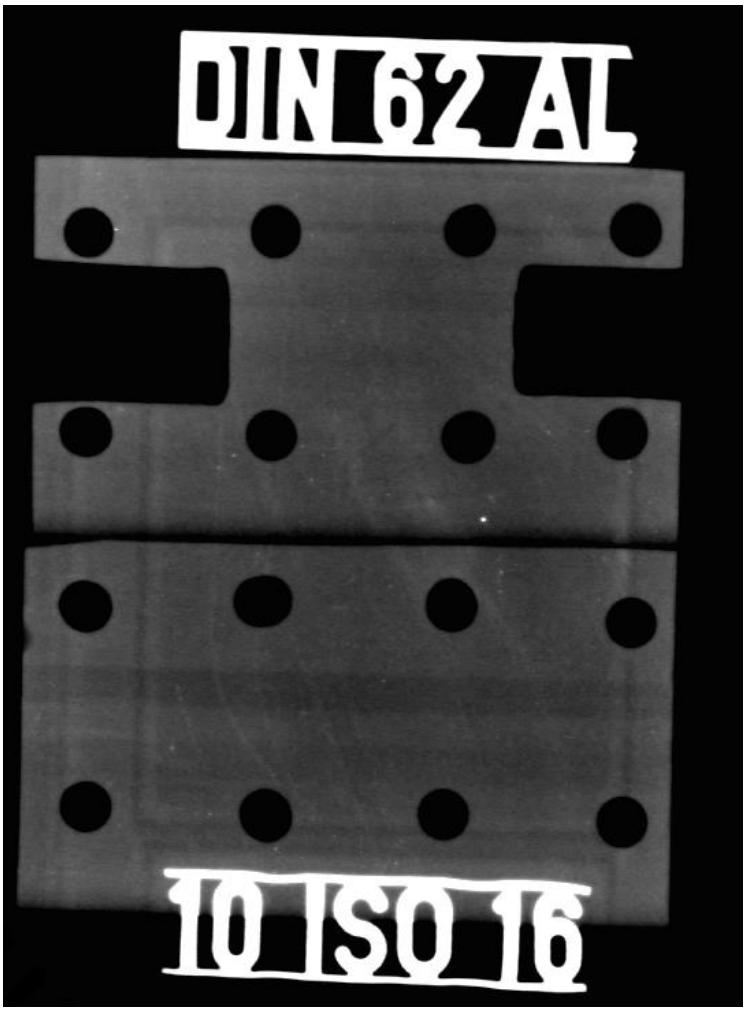
Izvor svjetlosti	Laser dioda / fotomultiplikator
Dubina piksela	65536 / 16 bitni prikaz
Veičina laserskog snopa	50 μm do 200 μm (u koracima od 10μm)
Učinkovitost	Preko 60 slika na sat
Skeniranje / brisanje	Automatsko, u jednom prolazu
Operativni sustav	Windows XP Professional
Napajanje	100-240 V, 2.5 A, 47-63 Hz
Masa	31,75 kg

Postavke skenera:

- napon fotomultiplikatora 5,25 V
- specifična energija lasera 15 J/m^2
- rezolucija 50 μm

7.5. Analiza snimke s GP slikovnom pločom

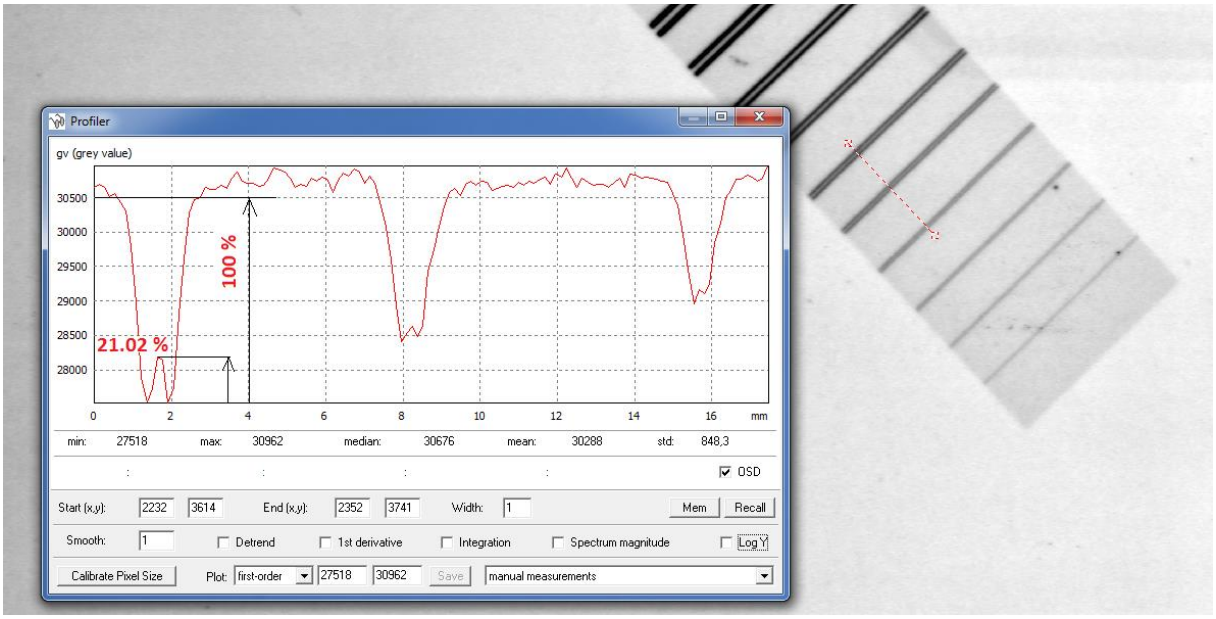
Prema prikazanom planu u tablici 7., provedeno je prvo snimanje ispitnih uzoraka s GP slikovnom pločom. Odmah prilikom dobivanja slike mogao se uočiti nedostatak kontrasta i oštrine što je rezultat primijenjene prevelike energije zračenja. Primjenom raznih filtera u programu za obradu slike ISee!, uspjela su se detektirati tek korozijska oštećenja na oba uzorka. Pukotinska oštećenja na Uzorku 1. nisu detektirana pa osjetljivost od potrebnih 2% nije postignuta, što je i potvrđeno pregledom indikatora kvalitete radiograma. Na njemu je vidljiva tek žica W 11 debljine 0.32 mm koja na ovim uzorcima označuje osjetljivost od 5.3%.



Slika 23. Radiogram dobiven GP pločom

7.5.1. Određivanje prostorne razlučivosti

Kako je ranije spomenuto prostorna razlučivost se određuje prema normi EN ISO 19232-5 pomoću dvostruko žičanih indikatora. Za određivanje je korišten program ISee! tako da se pomoću alata „profiler“ povukla ravna linija preko indikatora na slici. Iz dobivenog grafa tražila se granična vrijednost utora koji označava razmak između dviju žica. Traži se zadnji par žica kojima je utor vidljiv iznad 20% od ukupne „grey“ vrijednosti para žica. Taj par se proglašava referentnim (n), a prostornu razlučivost označava par n+1, te se njezina vrijednost očitava iz Tablice 9.



Slika 24. Prikaz određivanja prostorne razlučivosti

Kako je mjerenjem utvrđeno da je referentni 8D žičani par, iz tablice se kao vrijednost prostorne razlučivosti očitava vrijednost za 9D žičani par. Slijedom toga utvrđuje se da je postignuta razlučivost od 130 μm.

Da bi se zadovoljila norma EN ISO 19232-5 potrebno je bilo postići prostornu razlučivost od 63 μm za klasu A, te 50 μm za klasu B.

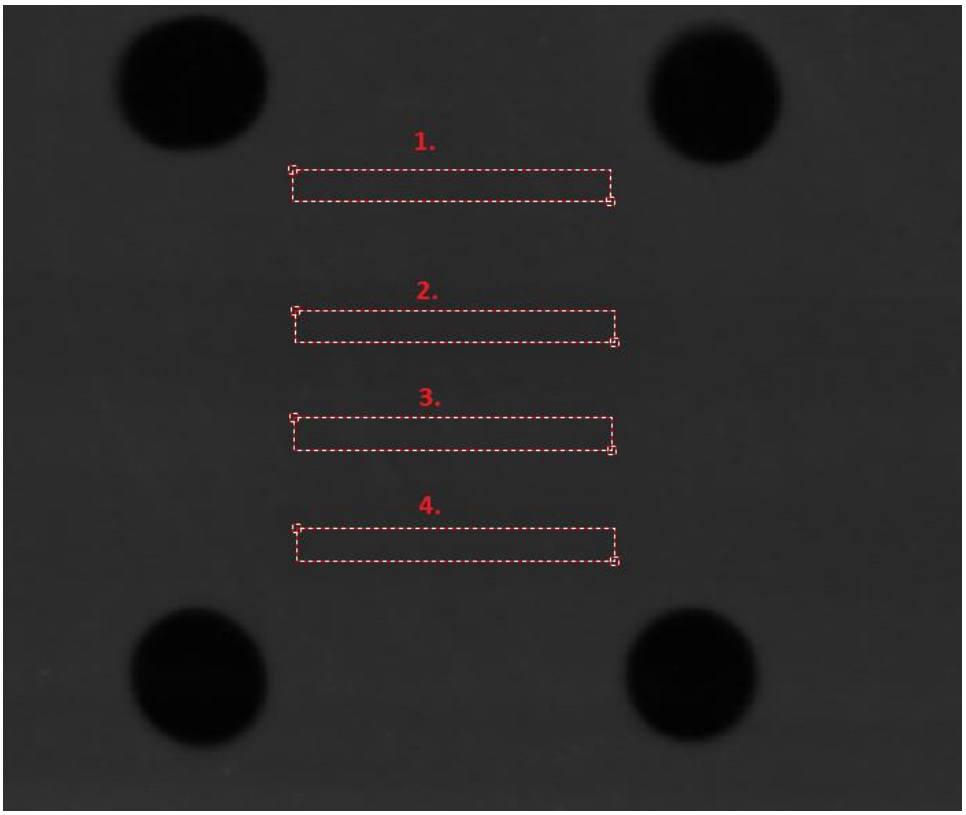
Tablica 9. Odgovarajuća prostorna razlučivost za odgovarajući žičani element

Broj elementa	Prostorna razlučivost [mm]
13D	0.050
12D	0.063
11D	0.080
10D	0.100
9D	0.130
8D	0.160
7D	0.200
6D	0.250
5D	0.320
4D	0.400
3D	0.500
2D	0.630
1D	0.800

7.5.2. Određivanje odnosa signal-šum

Za određivanje SNR vrijednosti korišten je ISee! program. Izračun se vrši tako da softver odredi prosječnu vrijednost zacrnjenja piksela (eng.GV- *grey value*) unutar odabranog područja interesa (eng. ROI- *Region Of Interest*), a SNR će predstavljati omjer te prosječne vrijednosti zacrnjenja piksela i standardne devijacije zacrnjenja piksela unutar tog područja. Prema uputstvima za korištenje programa ISee! uzeta je veličina ROI od 4000 piksela (200x20 piksela).

Prilikom svakog mjerenja bilo je uzeto 4 neovisnih uzoraka sa slike (mjerenja M1…M4 u tablici 10.). Uzeto je više uzoraka sa slike kako ne bi eventualne nesavršenosti utjecale na krajnji rezultat, koji je izračunat kao srednja vrijednost tih 4 mjerenja (Slika 26.).



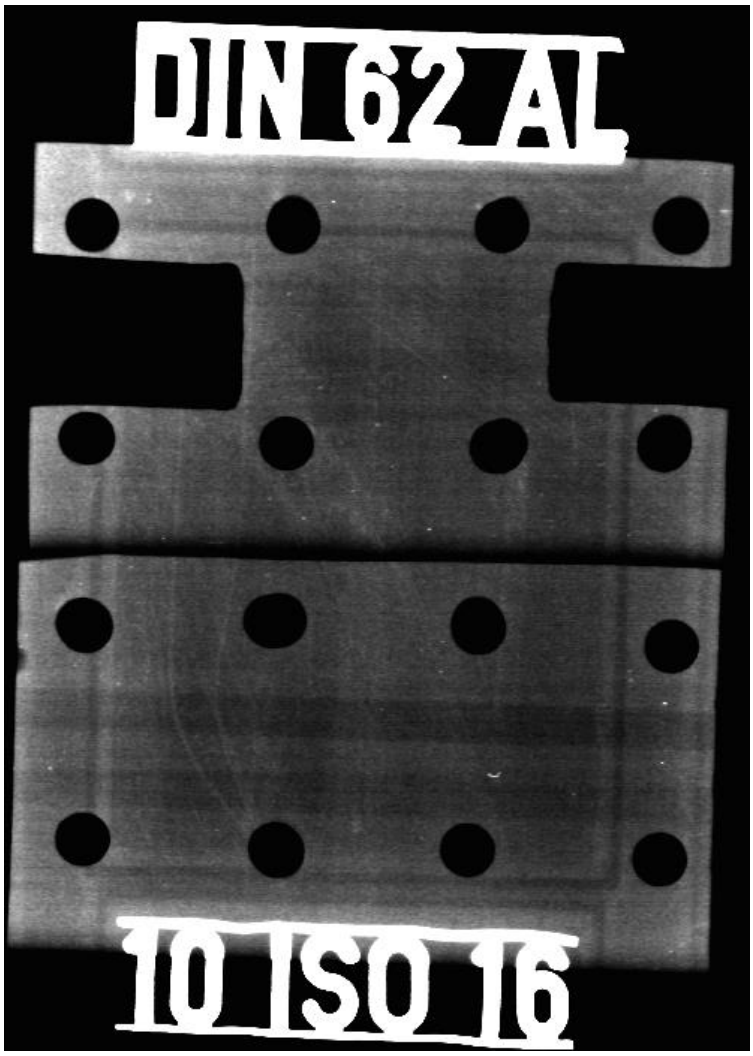
Slika 25. Uzorci za određivanje odnosa signal-šum

Tablica 10. Izračunate SNR vrijednosti za GP ploču

M1	M2	M3	M4	SNR
204	215	218	219	214

7.6. Analiza snimke s XL Blue slikovnom pločom

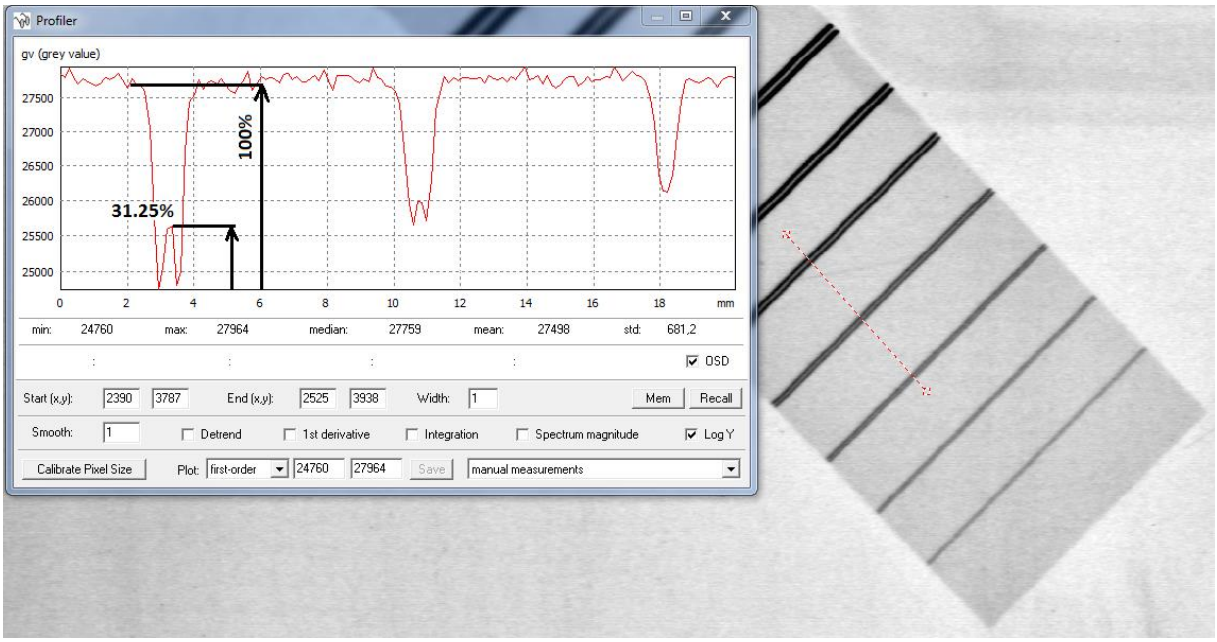
U drugom snimanju korištena je ploča viske rezolucije XL Blue. Kako je vidljivo u tablici 7. ekspozicija je povećana zbog same karakteristike ovih ploča (Slika 9.) dok su svi ostali parametri ostali nepromijenjeni zajedno s postavom ispitnih uzoraka i opreme. Prvi korak analize je obuhvaćao određivanje postignute osjetljivosti slike, te je utvrđeno da je ona ostala nepromijenjena u odnosu na sliku dobivenu s GP pločom. Kao i u prethodnom slučaju vidljiva je tek druga žica (W11) indikatora kvalitete radiograma, te samo simulirana korozijska oštećenja na ispitnim uzorcima, ali treba napomenuti da je njihova detektabilnost puno bolja nego u slučaju GP ploče.



Slika 26. Radiogram dobiven XL Blue pločom

7.6.1. Određivanje prostorne razlučivosti

Kao i kod GP ploče prostorna razlučivost je određena pomoću alata „profiler“ u programu ISee!. Vodeći se zahtjevima iz norme EN ISO 19232-5 određena je razlučivost od 100 μm. Kako je zadnji par žica s vidljivim utorom više od 20% bio 9D, očitana je prema tablici 9. prostorna razlučivost za element 10D. Premda i dalje ovaj rezultat ne zadovoljava propisane norme vidljiva je prednost XL Blue ploča na GP pločama.



Slika 27. Prikaz određivanja prostorne razlučivosti

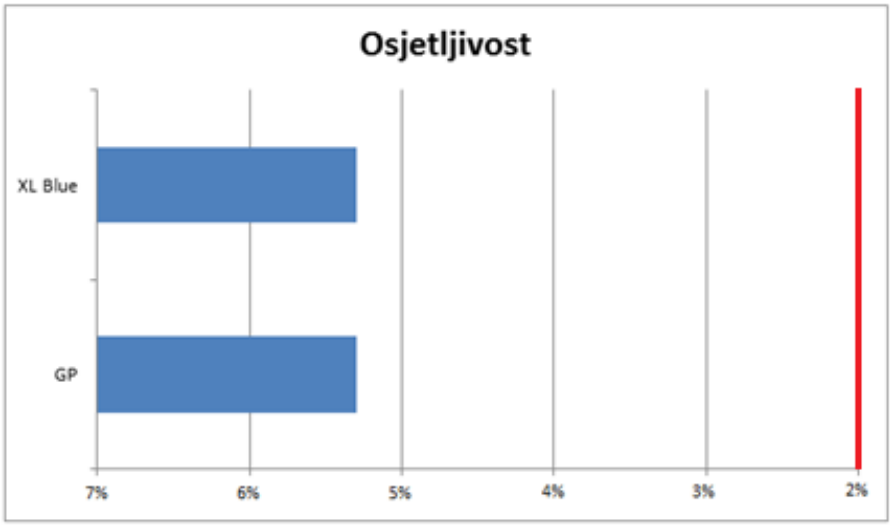
7.5.2. Određivanje odnosa signal-šum

Tablica 11. Izračunate SNR vrijednosti za XL Blue ploču

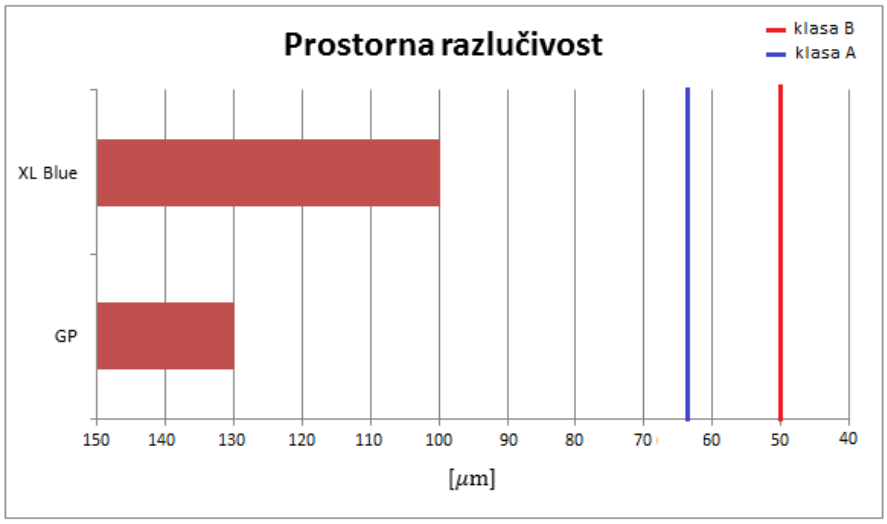
M1	M2	M3	M4	SNR
245	240	251	271	252

Za određivanje odnosa signal-šum također su uzeta 4 nezavisna uzorka kako je vidljivo u tablici 11. Zaključuje se da osim bolje prostorne razlučivosti XL Blue ploče donose i nešto povoljniji odnos signal-šum.

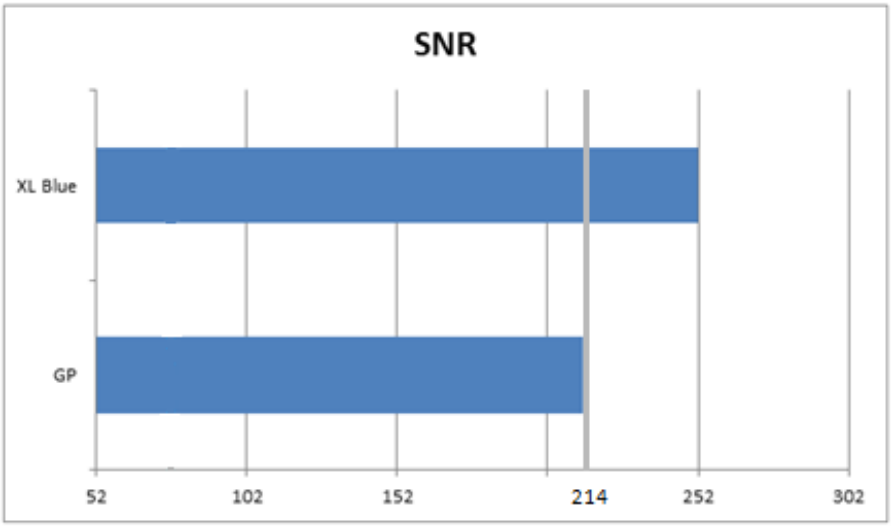
7.7. Usporedba rezultata



Slika 28. Usporedba dobivenih osjetljivosti



Slika 29. Usporedba prostornih razlučivosti ploča sa zadanim normama



Slika 30. Usporedba dobivenih SNR vrijednosti

Postizanje osjetljivosti radiograma od 2% je nužno na održavanju zrakoplova, te kako prikazuje dijagram na Slici 30. niti jedna od korištenih slikovnih ploča to nije zadovoljila. Kao rezultat toga pukotinska oštećenja na ispitnim uzorcima nisu mogla biti detektirana što bi u realnim uvjetima moglo dovesti do katastrofalnih posljedica.

Prostorna razlučivost predstavlja važan parametar kod slikovnih ploča, te je utvrđeno praktičnim dijelom da je tu XL Blue dominantnija od GP ploče. Iako XL Blue ploča nije zadovoljila uvjete zadane normama (Slika 30.) možemo zaključiti da je i pod lošim uvjetima snimanja (preveliki napon cijevi) dala solidne rezultate.

Oba dvije ploče su zadovoljile treći kriterij ispitivanja; minimalni odnos signal-šum. Postizanje velikog odnosa signal-šum je potrebno, no treba imati na umu da veliki odnos signal-šum može kriti i veliku količinu šuma. To je bio i slučaj u ovome primjeru jer ostaci boje i prljavština na uzorcima su dali veliku količinu šuma, što je u krajnosti pridonijelo nemogućnosti detekcije najmanjih detalja (simuliranih oštećenja).

8. ZAKLJUČAK

Provedbom praktičnog dijela utvrđeno je da oprema koja je bila na raspolaganju nije bila adekvatna za provedbu ovakvog ispitivanja uzoraka male debljine, posebice aluminijskih. Prevelika energija zračenja uzrokovala je smanjenje kontrasta i oštrine na dobivenim radiogramima pa se sama usporedba računalne radiografije s konvencionalnom nije mogla provesti na odgovarajućem nivou.

Filmska radiografija ima dugu povijest korištenja u zrakoplovnom održavanju i dan danas se smatra jednom od kvalitetnijih tehnologija u toj struci. Računalna radiografija donosi puno prednosti u odnosu na konvencionalnu jer imamo mogućnost digitalnog zapisa i pohranu slika, te nudi njihovu naknadnu obradu u softverskim paketima. Njihova visoka osjetljivost na ekspoziciju omogućava primjenu manjih energija i dobivamo veću produktivnost zbog brzog procesiranja slika jer nema kemijske obrade. Međutim ono što je za sada mana računalne i što predstavlja jednu od glavnih prepreka u implementaciji na održavanju zrakoplova je njihova prostorna razlučivost. Rezultati ispitivanja su pokazali prednost XL Blue slikovne ploče nad GP pločama, pa se iz tog razloga preporučuje da prilikom budućih ispitivanja i usporedbi ove dvije metode koriste slikovne ploče visokih rezolucija poput XL Blue.

9. LITERATURA

[1] Wikipedia, the free encyclopedia ;
URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Rendgenske_zrake

[2] Fakultet elektrotehnike i računarstva, Interakcija fotona sa materijom;
URL: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/interakcija_fotona.pdf

[3] GE – Sensing and inspection tehnologies;
URL:https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/industrial_radiography_image_forming_techniques_english_4.pdf

[4] Integrated publishing, General theory of industrial radiographic film;
URL: http://chemical-biological.tpub.com

[5] NDT Resource Center, Radiographic Testing (RT) ;
URL: https://www.nde-ed.org

[6] Kinsella T.E., Kahley G.R., Filmless radiography for aerospace NDT, Liberty Technologies Inc., 1996.
URL: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a333310.pdf

[7] Roussihe J., Mango S.A., Fallet E., Performance evaluation of a Computed Radiography system, DIR, 2007;
URL: http://www.ndt.net/article/dir2007/papers/p9.pdf

[8] CARESTREAM INDUSTREX; Rochester, Pub No. TI-2632, 08/13

[9] Hrvatska norma za nerazorno ispitivanje; HRN EN ISO 5579:2014

[10] Hrvatska norma za nerazorno ispitivanje – Kvaliteta radiograma – 1. dio; HRN EN 462-1:1994

[11] Bombardier Aerospace, Nondestructive testing manual, PSP 496, Part 1 – General

[12] Ewert U., Zscherpel U., Bavendiek K., Replacement of film radiography by digital techniques and enhancment of image quality, NDT.net, 2007 ;
URL: http://www.ndt.net/article/v12n06/ewert.pdf

[13] NDT Supply:
URL: http://ndtsupply.com/kowotest-duplex-penetrameter.html

[14] Bošković S., Završni rad, FSB, 2011

[15] SellNDT:
URL: http://sellndt.com/index.php?route=product/product&product_id=50

[16] Duplex IQI EN462-5 / ASTM E2002-98 for industrial NDT radiography, Computerised Information Technology