

# Kvantifikacija osjetljivosti računalne radiografije višedjelnih komponenti

---

**Bošković, Siniša**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2011**

*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:235:906304>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet Strojарstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Voditelj rada:**  
**Prof. dr. sc. Damir Markučić**

**Siniša Bošković**

**Zagreb, 2011**

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet Strojарstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Siniša Bošković**

**Zagreb, 2011**

## Sažetak

Tema ovog završnog rada je kvantifikacija osjetljivosti računalne radiografije višedjelnih zrakoplovnih komponenti. Uvodni dio se osvrće na višedjelne zrakoplovne konstrukcije te način njihovog ispitivanja pomoću nerazornih metoda u svrhu pronalaska eventualnih nepravilnosti u strukturi koje bi mogle ugroziti stabilnost strukture zrakoplova.

Slijedi pregled radiografije kao jedne od metoda nerazornih ispitivanja te razmatranje računalne radiografije kao metode koja će se primijeniti u eksperimentalnom dijelu rada. Poseban naglasak je ovdje na samu osjetljivost računalne radiografije i načine pomoću kojih se onda mjeri i određuje.

Eksperimentalni dio rada uključuje radiografsko snimanje realne zrakoplovne komponente na kojoj su simulirana oštećenja obradom odvajanja čestica pomoću elektroerozije i glodanja. Primjenjena komponenta je dotrajao iako još uvijek zdrav dio ramenjače koji je skinut sa zrakoplova CanadaAir, a taj zrakoplov je u aktivnoj službi gašenja požara. Na snimanje se nastavlja analiza rezultata u svrhu kvantificiranja osjetljivosti radiografskog snimanja višedjelnih komponenti.

Na kraju je zaključak o mogućnostima kvantificiranja radiografske metode u detektiranju i određivanju veličina pukotina prilikom ispitivanja višedjelnih zrakoplovnih komponenti.

**IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći se stečenim znanjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, navedenom literaturuom te pomoći mentora.

Ovim putem zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Markučiću na korisnim savjetima i vodstvu prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i Zrakoplovno tehničkom centru u Velikoj Gorici na donaciji dijela ramenjače CanadAir-a.

Također se zahvaljujem znanstvenom novaku Marku Rakvinu i laborantu Tomislavu Kezeleu na pomoći prilikom radiografskog ispitivanja i prikazu rezultata te tvrtci Kvočić d.o.o. i laborantu Franji Babiću na vremenu i uloženom trudu u izradu umjetnih oštećenja na ispitnim uzorcima ramenjače CanadAir-a.

Zagreb, 02. 02. 2011.

Siniša Bošković

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Višedjelne komponente zrakoplovne konstrukcije.....	1
1.2. Nerazorna ispitivanja višedjelnih komponenti zrakoplovnih konstrukcija.....	3
2. Radiografija.....	5
2.1. Princip rada i prikaz rezultata.....	5
2.2. Upotreba u ispitivanju zrakoplovnih konstrukcija.....	9
2.3. Najznačajnije radiografske metode.....	10
2.4. Film radiografija.....	10
2.4.1. Računalna i izravna radiografija(CR) .....	11
2.4.2. Radiografija u realnom vremenu.....	12
2.5. Mogućnosti i ograničenja radiografije.....	13
2.6. Provedena ispitivanja.....	14
3. Osjetljivost računalne radiografije.....	16
3.1. Definiranje osjetljivosti.....	16
3.2. Indikatori kvalitete slike – IQI.....	17
3.2.1. Indikatori s provrtom.....	17
3.2.2. Žičani indikatori.....	18
3.2.3. Način upotrebe indikatora.....	19
3.3. Kvantifikacija osjetljivosti.....	20
4. Eksperimentalni rad.....	23
4.1. Ispitni uzorci.....	23
4.1.1. Ispitni uzorak izrađen elektroerozijom.....	24
4.1.2. Ispitni uzorak izrađen glodanjem.....	26
4.2. Snimanje računalnom radiografijom i analiza rezultata.....	27
5. Zaključak.....	36
6. Literatura.....	37

**Popis slika**

- Slika 1.** Spoj krila i trupa kod ramenjače [1]
- Slika 2.** Korijen krila, spojevi ploca [1]
- Slika 3.** Unutrašnjost trupa zrakoplova, višedijelna spojna mjesta [2]
- Slika 4.** Cijev generatora X-zraka [4]
- Slika 5.** Dijagram - smanjenje broja fotona u ovisnosti o debljini materijala [4]
- Slika 6.** Grafički prikaz nerazornog radiografskog snimanja [7]
- Slika 7.** 3D prikaz vrha rotora helikoptera(promijeniti s nečim 2D)
- Slika 8.** Prenosivi generator X-zraka "LPX series X-ray", priprema prije snimanja [9]
- Slika 9.** Tipična kazeta za računalnu radiografiju[12]
- Slika 10.** Sustav za radiografiju u realnom vremenu [13]
- Slika 11.** Ispitni uzorak i radiografski snimak [14]
- Slika 12.** Lijevo - visoki kontrast-niska oštrina, Desno – niski kontrast-visoka štrina[11]
- Slika 13.** Razni indikatori s provrtom[4]
- Slika 14.** Radiogram indikatora s provrtima[4]
- Slika 15.** Žičani indikator kvalitete slike
- Slika 16.** Pozicioniranje indikatora na predmet prije snimanja[4]
- Slika 17.** Primjer ispitnog uzorka
- Slika 18.** Radiogram uzorka
- Slika 19.** Graf koji bi se dobio snimanjem idealne površine homogenom materijala
- Slika 20.** Graf koji bi se dobio snimanjem realne površine homogenom materijala
- Slika 21.** Dio ramenjače CanadAir-a
- Slika 22.** Nacrt ispitnog uzorka izrađenog elektroerozijom
- Slika 23.** a) 3D model ispitnog uzorka b) Eroziomat c) elektroerozija na uzorku d) gotov komad
- Slika 24.** Nacrt ispitnog uzorka izrađenog glodalicom a) 3D model b) obrada na glodalici
- Slika 25.** Postupak izrade uzorka glodanjem
- Slika 26.** Dijagram odnosa debljine materijala i potrebnog broja kilovolti
- Slika 27.** Generator X-zraka – FSB
- Slika 28.** Upravljačka jedinica radiografskog uređaja – FSB
- Slika 29.** Skener radiografskih filmova –FSB
- Slika 30.** Prikaz radiograma na računalu – FSB
- Slika 31.** Dijagram odnosa debljine materijala i potrebnog broja kilovolti

**Slika 32.** Radiogram uzorka 1

**Slika 33.** Profiltrirani radiogram uzorka 1

**Slika 34.** Graf snimanja uzorka 1

**Slika 35.** Radiogram uzorka 2

**Slika 36.** Graf snimanja uzorka 2 samostalno

**Slika 37.** Uprosječene vrijednosti grafa sa slike 36.

**Slika 38.** Uzorak 2 u sklopu s L-profilom + indikator

**Slika 39.** Radiogram uzorka 2 u sklopu s L-profilom + indikator

**Slika 40.** Graf snimanja uzorka 2 u sklopu s L-profilom



## **Popis tablica**

**Tablica 1.** Klasifikacija simuliranih oštećenja na uzorku izrađenom elektroerozijom

**Tablica 2.** Klasifikacija simuliranih oštećenja na uzorku izrađenom glodanjem

**Tablica 3.** Parametri snimanja uzorka 1

**Tablica 4.** Parametri snimanja uzorka 2

**Tablica 5.** Vrijednosti zacrnjenja piksela po područjima

**Popis oznaka**

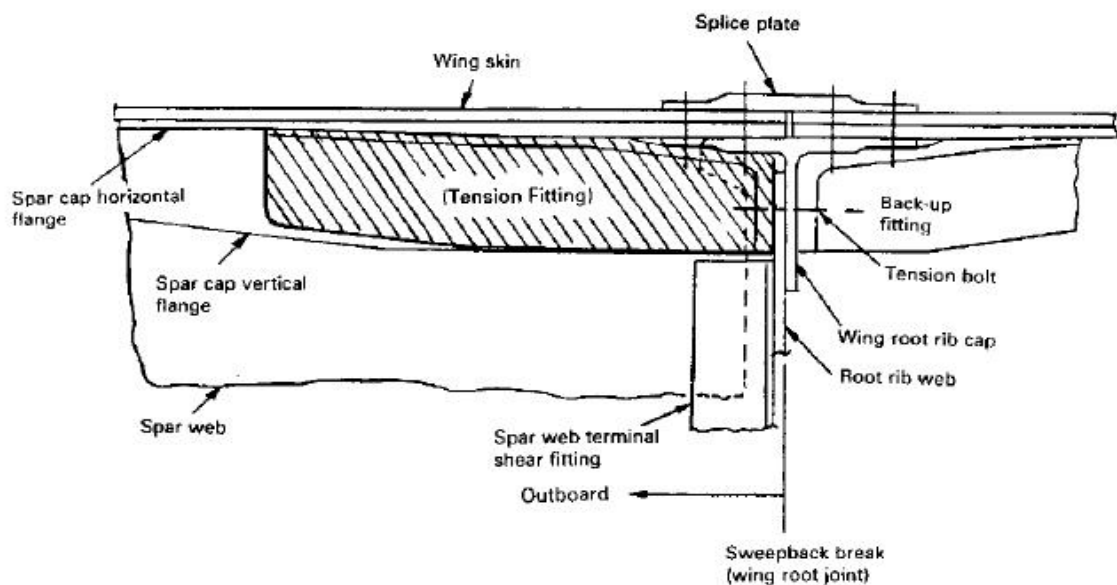
Oznaka	Naziv
Co	Kobalt, osnovni element
n	neutron
Ni	Nikal, osnovni element
$\gamma$	Gama, oznaka za gama zrake
e	elektron
$D$	zacrnjenje (density) radiograma
$I_0$	intenzitet svjetlosti kojemu je izložen film
$I_t$	intenzitet svjetlosti koja prodire kroz film
$I$	jakost struje
$U$	napon
$t$	vrijeme
O	radiografska osjeljivost
$D_o$	dubina/visina oštećenja ili strukturalne nepravilnosti
$D_m$	ukupna debljina snimanog materijala
SS	nehrđajući čelik, eng. "Stainless steel"
T	debljina indikatora kvalitete slike s provrtom
F	konstanta: faktor oblika za žice
d	promjer žice
l	efektivna dužina žice
H	promjer provrta na indikatoru s provrtom

# 1. Uvod

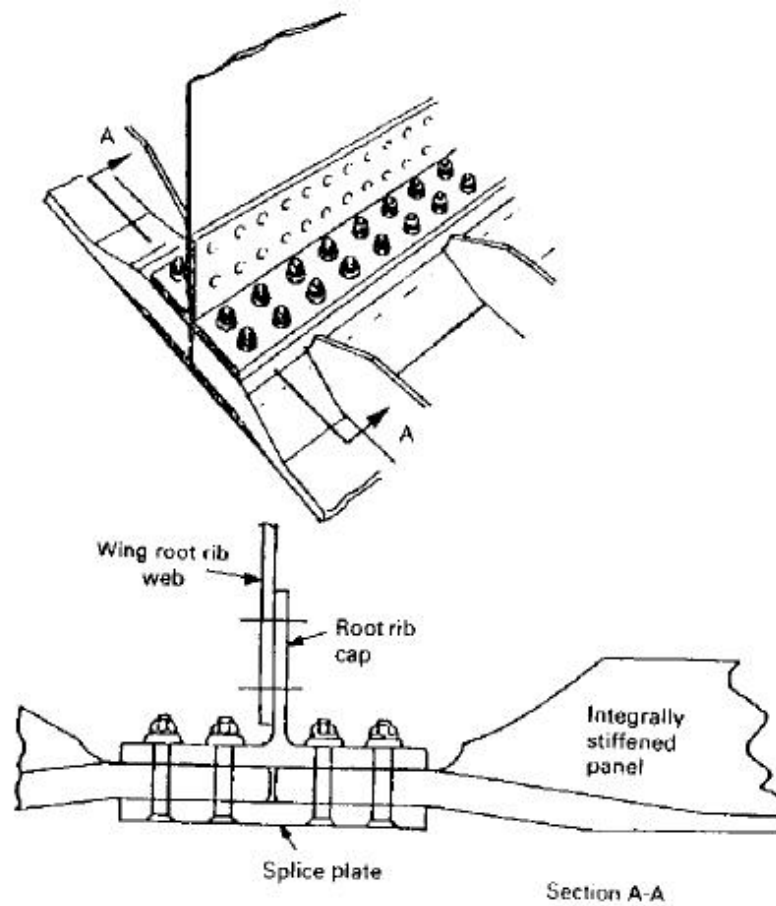
## 1.1. Višedijelne komponente zrakoplovne konstrukcije

Zrakoplov je sam po sebi konstrukcija sastavljena od mnoštva djelova, a većina njih je upravo spojena na način da se dobiju veće komponente od više osnovnih sastavnih djelova. Osnovni sastavni djelovi mogu biti razni profili, ploče, spojni elementi(zakovice, vijci) i slično. Takve komponente same po sebi predstavljaju problem prilikom pregleda i remonta zrakoplova jer su spojevi njihovih sastavnih djelova kritične točke za nastajanje pukotina i oštećenja koja u nekom trenutku mogu dovesti do zakazivanja funkcije cijele komponente, a samim time i do zakazivanja zrakoplova. Takvo zakazivanje se najčešće događa u trenucima povećanog djelovanja sila na zrakoplov(polijetanje, slijetanje, manevri) no može doći i u bilo kojem trenutku tijekom leta, a to su sve trenutci u kojima je zrakoplov u korištenju, dakle nosi putnike ili teret. Da bi se izbjegao gubitak tereta, zrakoplova i ljudskih života zrakoplovi se podvrgavaju periodičkim pregledima tijekom kojih je potrebno pregledati djelove zrakoplova, a posebno kričina mjesta na kojima bi se mogle pojaviti pukotine i oštećenja.

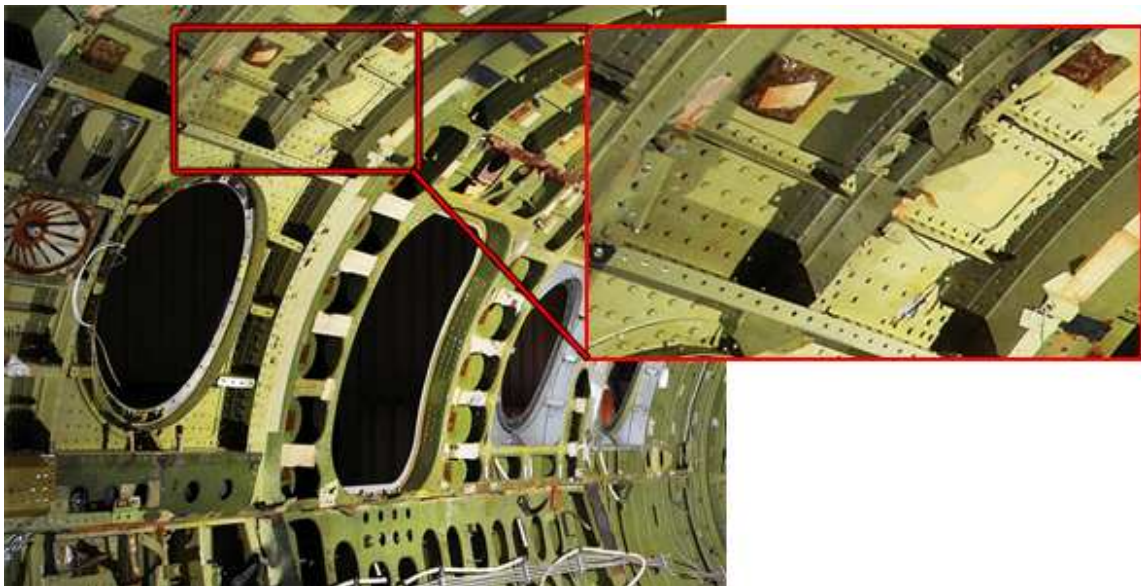
Spojevi višedijelnih zrakoplovnih komponenti su dakle kritična mjesta i da bi se u potpunosti pregledala potrebno ih je rastaviti. Jedan takav spoj prikazuje slika 1, iz koje se da zaključiti da je to dugotrajan i skup postupak, a ako se ustanovi da su komponente ispravne potrebno ih je ponovno sastaviti čime se izlažemo riziku da komponente budu neispravno sastavljene ili oštećene prilikom sastavljanja. Iz tih razloga se teži ispitati što je moguće više takvih višedijelnih komponenti bez da se rastavljaju, a to možemo postići upravo upotrebom nekom od metoda nerazornih ispitivanja.



Slika 1. Spoj krila i trupa kod ramenjače [1]



Slika 2. Korijen krila, spojevi ploca [1]



Slika 3. Unutrašnjost trupa zrakoplova, višedijelna spojna mjesta [2]

## ***1.2. Nerazorna ispitivanja višedjelnih komponenti zrakoplovnih konstrukcija***

Kako je već naglašeno rastavljanje višedjelnih komponenti nije poželjno te se u tu svrhu komponente ispituju nekom od nerazornih metoda kako bi se otkrila eventualna prisutnost oštećenja. U slučajevima kada nema jasnih tragova oštećenja, već postoje naznake oštećenja na temelju kojih se ne može dokučiti radi li se o oštećenju ili ne, komponente se skidaju i pregledavaju. U takvim slučajevima na iskustvu ispitivača je da procijeni ima li temelja za demontažu djelova i upravo zato upotreba ovih metoda u velikoj mjeri ovisi o osobi koja vrši ispitivanja.

Najčešće metode u upotrebi su sljedeće:

1. Ultrazvučne metode
2. Radiografske metode
3. Vrtložne struje

Prilikom ispitivanja potrebno je zadovoljiti sljedeće zahtjeve[3]:

1. Detekcija pukotina na unutrašnjoj strani dijelova sa vanjske strane zrakoplova
2. Duboko prodiranje da bi se mogla provoditi ispitivanja na zrakoplovnim konstrukcijama koje mogu biti do 50 ili 100 mm debele, izrađene od aluminija, titana, kompozita ili njihovih kombinacija
3. Osjetljivost na mala oštećenja sa ili bez prisutnosti zakovica od različitih materijala (aluminija, čelika, nehrđajućeg čelika, titana, itd...)
4. Pouzdanost otkrivanja bez umiješanosti ljudskog faktora(tj. potrebnog iskustva ispitivača)
5. Brzi pregled velike površine s obzirom na zahtjeve 1-4
6. Razlikovanje šuma od različitih faktora (utjecaja ruba, razlike u debljini materijala, mogućeg brtvila ili rupa među rubovima itd ...)
7. Niska cijena
8. Prenosivost i jednostavnost upotrebe

Zadovoljavanje svih ovih zahtjeva je iznimno složen postupak i niti jedna metoda nerazornog ispitivanja ih ne udovoljava sve. Njihova primjena i učinkovitost ovisi o materijalu nad kojim se vrši ispitivanje, ispitivaču, stanju površine, debljini materijala,

prisutnosti okolnih smetnji (raznih elektromagnetskih i mehaničkih valova), kutu gledanja, korištenoj opremi itd...

Ultrazvučne metode koriste mehanički val koji se širi kroz materijal i kako nailazi na diskontinuitete u materijalu vraća se natrag te ga sonda detektira. Metoda je jednostavna, prenosiva i jeftina, no zahtijeva veliko iskustvo i njome se može s pouzdanošću prodrijeti samo kroz tanke slojeve materijala (nekoliko mm). Nailaskom na zračnost (spoj dva dijela) očitavanja više nisu konzistentna te se ova metoda ne može koristiti za pouzdano ispitivanje višedjelnih komponenti.

Metode vrtložnih struja su također jednostavne i prenosive no zbog stvaranja površinskog efekta ("skin effect") su ograničene u mogućnostima dubinskog prodiranja.

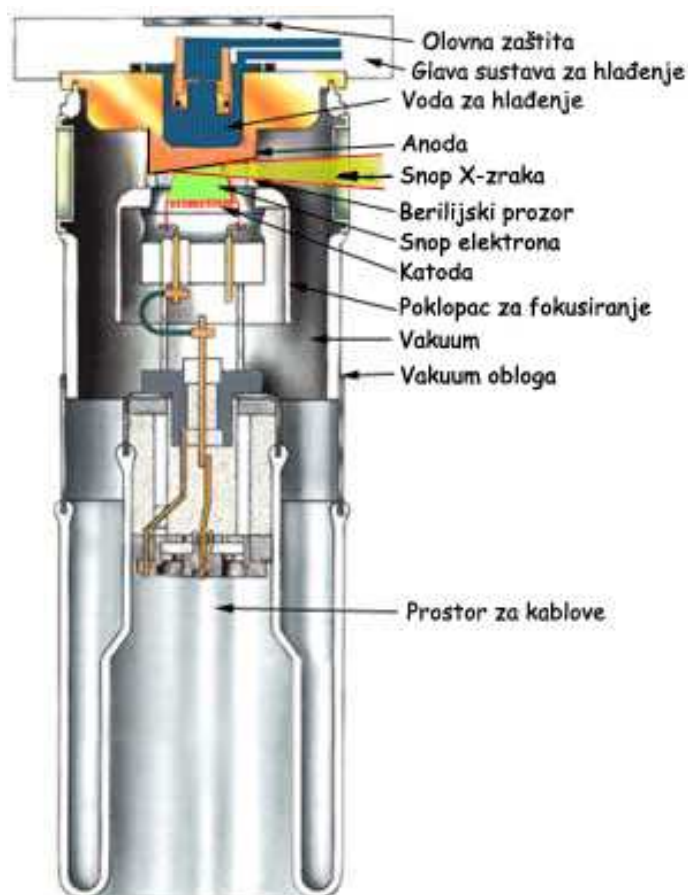
Radiografske metode su kompliciranije za korištenje, skupe su, većinom nisu prenosive i stvaraju radioaktivno zračenje opasno po ljudsko zdravlje. Prednost je što se njima mogu ispitivati veće debljine materijala i višedijelne komponente te će u nastavku upravo biti riječi o ovoj metodi. Nedostatak im je i neosjetljivost na detektiranje malenih pukotina (koje mogu biti vrlo opasne) te će se posvetiti posebna pažnja utvrđivanja reda veličine do koje je moguće uočiti oštećenja ovom metodom.

## 2. Radiografija

### 2.1. Princip rada i prikaz rezultata

Radiografija je skupni naziv za metodu snimanja živih bića i neživih predmeta radi uvida u njihovu unutrašnjost. Da bi se to postiglo koriste se svojstva male valne duljine elektromagnetskih X-zraka ili gama zraka koja im omogućava da prolaze kroz vrlo guste materijale vrlo duboko i izađu na drugu stranu. Dio zraka se apsorbira u objektu snimanja, dio raspršuje, a dio prolazi. Količina upijenog zračenja ovisi o gustoći područja u materijalu kroz koji prolaze zrake, što opet ovisi o vrsti materije koja se snima tj. pokraj kojih atoma prolaze zrake. S druge strane objekta je postavljen film ili digitalni detektor koji je osjetljiv na X-zrake (ili gama zrake) te na njemu zrake ostavljaju zapis koji možemo kasnije razviti (ako se radi o filmu) ili gledati na računalu pomoću odgovarajućeg software-a. Zapis koji dobivamo je dvodimenzionalna projekcija trodimenzionalne tvorevine.

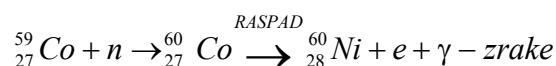
X-zrake ili Rengenske zrake nastaju u generatoru X-zraka. Glavni dijelovi generatora su: generatorska cijev, visokonaponski izvor, kontrolna kutija i sustav za hlađenje. X-zrake se proizvode u generatorskoj cijevi i jednu takvu konstrukciju prikazuje slika 4.



Slika 4. Cijev generatora X-zraka [4]

Usmjeravajući snop elektrona koji putuju velikom brzinom na metu koja je od materijala s velikim atomskim brojem, kao što je Volfram, stvaraju se X-zrake jer meta usporava ili zaustavlja elektrone, pri čemu se oslobađaju elektromagnetski valovi, u našem slučaju upravo u području valnih duljina X-zraka [4].

Gama zrake nastaju raspadom nestabilnih izotopa nekog elementa. U radiografiji su najčešće korišteni Kobalt 60 i Cezij 137 [5]. Ako atom posjeduje manje energije no što je potrebno da se njegovi protoni i neutroni u jezgri drži na okupu tada govorimo o nestabilnom izotopu koji teži raspadanju na stabilnije elemente. Prilikom raspada zbroj energije novonastalih elemenata je manji od početne energije izotopa. Razlika energije se manifestira kroz emisiju gama zraka. Jedan takav raspad je prikazan sljedećom jednačbom na primjeru Kobalta 60 korištenog u radiografiji[6]:



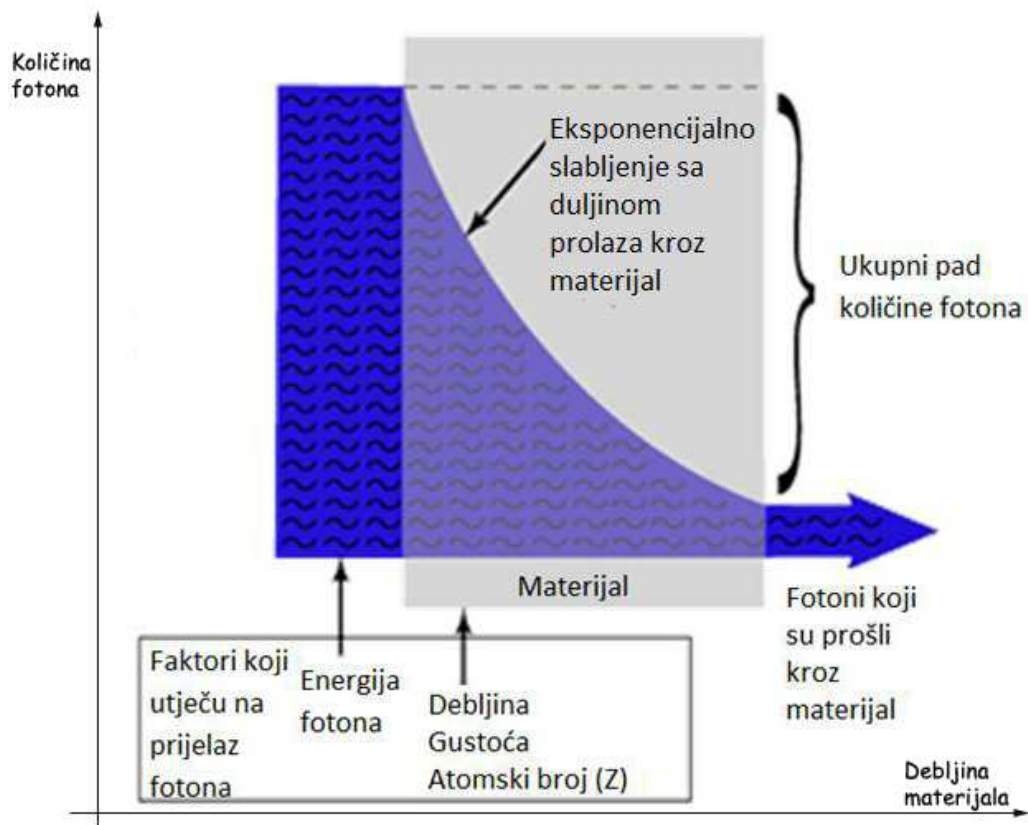
Svojstva X ili gama zraka[4]:

- Ne može ih se otkriti ljudskim osjetilima
- Putuju u ravnoj liniji brzinom svjetlosti
- 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

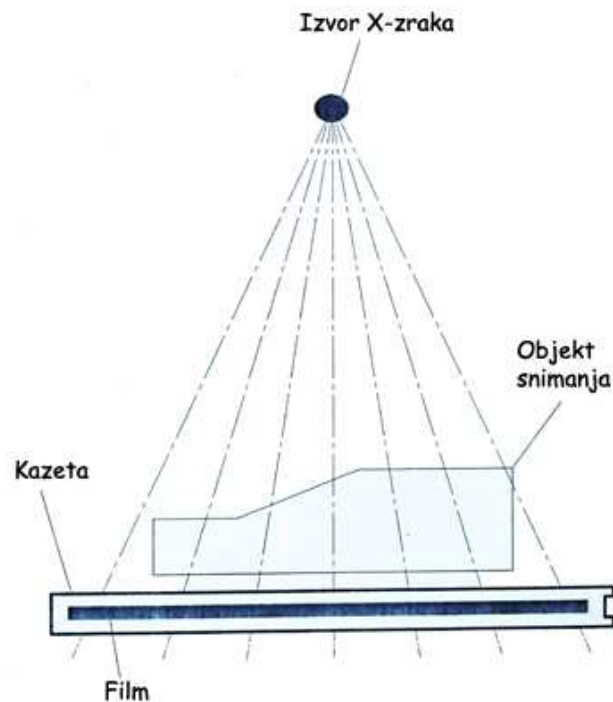
Upravo zbog četvrtog svojstva, da na spoju dva različita materijala imaju mali stupanj difrakcije(a to se odnosi i na slučaj da je spoj od istog materijala) ova metoda je veoma pogodna za ispitivanje višedijelnih komponenti.

Prilikom prolaska kroz materijal zrake slabe i samo dio od ukupno odaslanog zračenja iz izvora prolazi na drugu stranu, kao što to prikazuje slika 5. Zračenje koje prođe reagira s filmom ili detektorom na drugoj strani uzorka, slika 6.





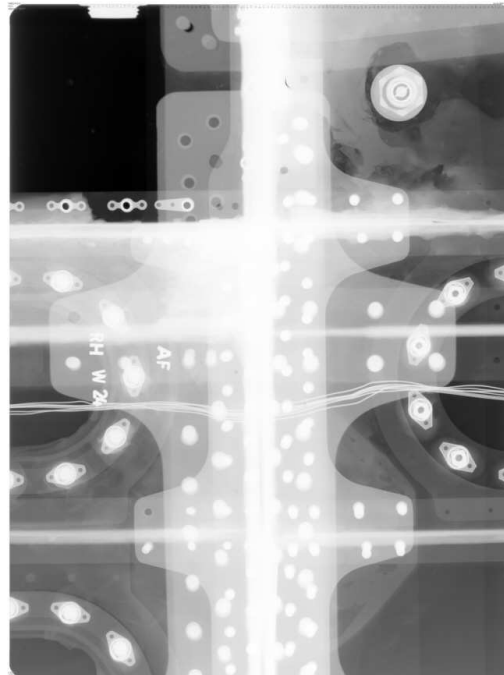
Slika 5. Dijagram - smanjenje broja fotona u ovisnosti o debljini materijala [4]



Slika 6. Grafički prikaz neraznog radiografskog snimanja [7]

Rezultat se prikazuje radiogramom na kojem se slika formira pomoću raznih tonova sive boje. Stupanj zacrnjenja filma ovisi o gustoći materije u određenoj točki, pa će tako područja s manjom gustoćom, tanja područja i oštećena područja biti tamnija, a područja u kojima

nema materijala (provrti, šupljine, pukotine) će biti potpuno crna. Ovakav način snimanja i prikaza je vrlo pogodan za pregled jednostavnih struktura, no prilikom snimanja kompleksnije geometrije i više dijelova potrebno je obratiti posebnu pozornost na detalje kako se nebi dijelovi ispred i iza (bliži i dalji od izvora zračenja) pomiješali što je posljedica 2D prikaza. Jedan takav prikaz pokazuje slika 7.



Slika 7. Radiografska snimka trupa zrakoplova [10]

Zacrtnjenje filma možemo iskazati matematički kao logaritamski omjer intenziteta svjetlosti kojom je izložen film i intenziteta koji je prošao kroz film. U matematičkom zapisu to izgleda ovako:

$$D = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)$$

Gdje je:

$D$  – Zacrnjenje (density) radiograma

$I_0$  – Intenzitet svjetlosti kojemu je izložen film

$I_t$  – Intenzitet svjetlosti koja prodire kroz film

Potpuno proziran film ima zacrnjenje jednako nuli, pri prolasku svjetlosti od 10% zacrnjenje je jednako 1, prolasku od 1% je jednako 2, prolasku od 0.1% jednako 3 itd... Parametri za ocjenu kvalitete prikaza su kontrast i oštrina slike. Veći kontrast nam omogućava lakše uočavanje između nijansi sive, dok s boljom oštrinom možemo točnije odrediti rubove

oštećenja(pa time i oblik i dimenzije).

Na radiografsko ispitivanje, a time i na dobiveni prikaz utječu sljedeće varijable [8]:

1. Energija zračenja
2. Vrijeme izlaganja
3. Jakost struje [mA] (za rendgenske zrake) ili radioaktivnost izvora(za gama zrake)
4. Vrsta i gustoća materijala ispitnog uzorka
5. Debljina materijala
6. Tip filma
7. Ekрани koji se koriste
8. Kemijska obrada filma(vrijeme obrade, temperatura itd...)
9. Zacrnljenje filma
10. Udaljenost izvora zračenja od ispitnog uzorka
11. Udaljenost ispitnog uzorka od filma
12. Veličina mete u cijevi generatora zraka(za X-zrake), odnosno izvora zračenja(za gama zrake)

Utjecaj tih varijabli na kontrast radiogramskog prikaza možemo podijeliti na utjecaj od strane objekta snimanja i utjecaj od strane filma. Energija zračenja, varijacije u debljini, gustoća materijala i rasipanje zračenja direktno utječu na to koliko će kontrastan biti prikaz objekta. Sa strane filma važan je odabir tipa filma, zacrnjenje koje se na njemu postiže, kvaliteta kemijske ili računalne obrade(korišteni software) te folije i ekрани koji se koriste.

Za prikaz oštine slike bitna je geometrija objekta i ponovno film. Veličina izvora, udaljenost objekta od izvora zračenja, udaljenost objekta od filma(mogu biti razne udaljenosti ako predmet ima izrazito 3D strukturu), dodir filma i ekrana te pomaci do kojih može doći tijekom snimanja utječu na način na koji će se prikazati oština geometrijskih oblika na radiogramu. Sa strane filma ponovno je bitan odabir tipa filma, njegova obrada(kemijska ili računalna), korištena folija, iznos dozračene energije te raspršivanje zračenja.

## ***2.2. Upotreba u ispitivanju zrakoplovnih konstrukcija***

Prilikom periodičkih pregleda i remonta zrakoplova većina pregleda se obavljaju vizulano, čak 80%. Ako se sumnjiva i kritična mjesta žele ispitati radiografskom metodom

nameće se potreba za prenosivošću uređaja za produkciju X ili gama zraka ili prenosivošću komponenti, te pitanja sigurnosti po ljudski život.

Većina generatora X-zraka su smješteni u posebnim, odvojenim prostorijama s debelim zidovima i zaštitnim vratima i staklima. Procedura ispitivanja je vrlo striktna, tijekom snimanja nije dozvoljen ulaz u prostoriju zbog opasnosti po ljudski život. X-zrake i gama zrake spadaju u ionizirajuće zračenje i kao takvo imaju sposobnost uništavanja živih stanica te uzrokuju zloćudne tumore. Za takvo ispitivanje zahtijeva se da se djelovi demontiraju i unesu u prostoriju, što vrlo često nije moguće zbog gabarita komponenti i ograničene širine i visine ulaznih vrata.

Iz tog razloga napravljeni su prenosivi uređaji za produkciju X-zraka koji se mogu postaviti na sam zrakoplov i snimati određene segmente. U tom slučaju prazni se cijeli hangar od osoblja i štite se osjetljive računalne komponente olovnim preprekama koje upijaju većinu zračenja. Tek tada se daljinskim upravljačem pali radiografski uređaj.



Slika 8. Prenosivi generator X-zraka "LPX series X-ray", priprema prije snimanja [9]

## ***2.3. Najznačajnije radiografske metode***

### **2.3.1. Film radiografija**

U nekim literaturama se navodi kao klasična radiografija, a označava metodu radiografskog snimanja pri kojem se koristi jednokratni film na koji je nanesena emulzija koja sadrži kristale srebrovog klorida i srebrovog bromida, osjetljivih na zračenje. Film se postavlja s druge strane objekta i na njemu zračenje ostavlja otisak predmeta koji zovemo latentna slika i ona nama nije vidljiva. Da bi postala vidljiva i upotrebljiva, film se treba razviti postupkom kemijskog razvijanja u mračnoj prostoriji ručno ili automatiziranim

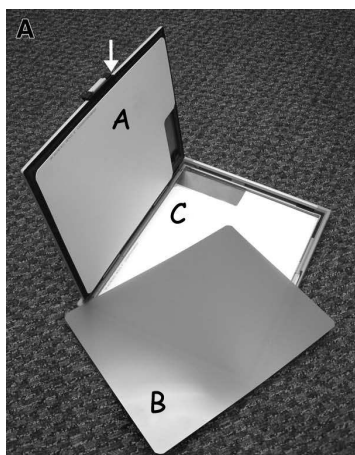
procesom. Ukoliko se film prije razvijanja izloži direktnoj svjetlosti on se osvijetli i snimka koja je nastala zračenjem x ili gama zraka nemože se više iskoristiti.

Postupak razvijanja je sljedeći: film se umače u otopinu za razvijanje koja potamni djelove izložene zračenju, zatim se ispiru u posebnoj solnoj kupki koja zaustavlja proces razvijanja, pa prelazi u kupku za fiksiranje koja uklanja nezacrnjene djelove emulzije na filmu. Da bi se moglo rukovati filmom on se ispiru of viška sredstva za fiksiranja i zatim suši. Nakon provedenog postupka film je spreman za rukovanje i gledanje i arhiviranje[11]. Ova vrsta radiografije je i dalje u širokoj upotrebi i bila je dominantna dugi niz godina no glavni nedostatak joj je dugotrajan postupak razvijanja filma i cijena takvog postupka za svakodnevnu primjenu, a filmovi se nakon razvijanja nemogu upotrijebiti ponovno, ostaju takvi kakvi su snimljeni i ako snimka nevalja bacaju se, što ponovno povećava cijenu postupka. Prednost je što je za izradu nekoliko snimaka ili manje serije mnogostruko jeftinije razviti nekoliko filmova nego kupovati skupu opremu o kojoj će biti riječi u sljedećim poglavljima.

### **2.3.2. Računalna i izravna radiografija(CR i DR)**

Pojavom računala radiografija je znatno ubrzana te se u računalnoj radiografiji(Computed Radiography) umjesto filma s emulzijom koristi film na koji je nanesen sloj foto osjetljivog fosfora. Film je zaštićen u kazeti ili kartonskoj oblozi da se zaštiti od okolne svjetlosti(iako ako ga se izvadi neće trenutno biti uništen već se s njim može minutu-dvije rukovati). Grafički prikaz na Slici 2. pokazuje jedno takvo snimanje s kazetom. Nakon snimanja, kazeta se stavlja u digitalni laserski skener ili se film vadi iz kartonske obloge i ručno stavlja na skener koji skenira film i pretvara sliku na njemu u digitalni signal koji analizira software i daje prikaz na ekranu. Snimka je na raspolaganju za prikaz već nekoliko minuta nakon snimanja, što nije bio slučaj kod klasične, filmske radiografije. Prikaz na računalu se može obrađivati, približavati, udajavati, može mu se mijenjati kontrast i druge slične opcije koje nude softwarski paketi, čime se može pregledavati snimka i tražiti prikaz na kojem se nabolje vide detalji koji su od interesa.

Filmovi korišteni u računalnoj radiografiji se teoretski mogu koristiti više tisuća puta jer izlaganje filma sobnoj svjetlosti na nekoliko minuta resetira film, a većina današnjih skenera već nakon skeniranja pobriše sadržaj na filmu tako da kad ga se izvadi iz skenera može ga se već ponovno upotrebljavati. U industrijskoj praksi filmovi ipak ne traju tako dugo, već nakon nekoliko stotina snimaka nisu upotrebljivi i iako nisu štetni za okoliš potrebno ih je propisano zbrinuti.



Slika 9. Tipična kazeta za računalnu radiografiju[12]

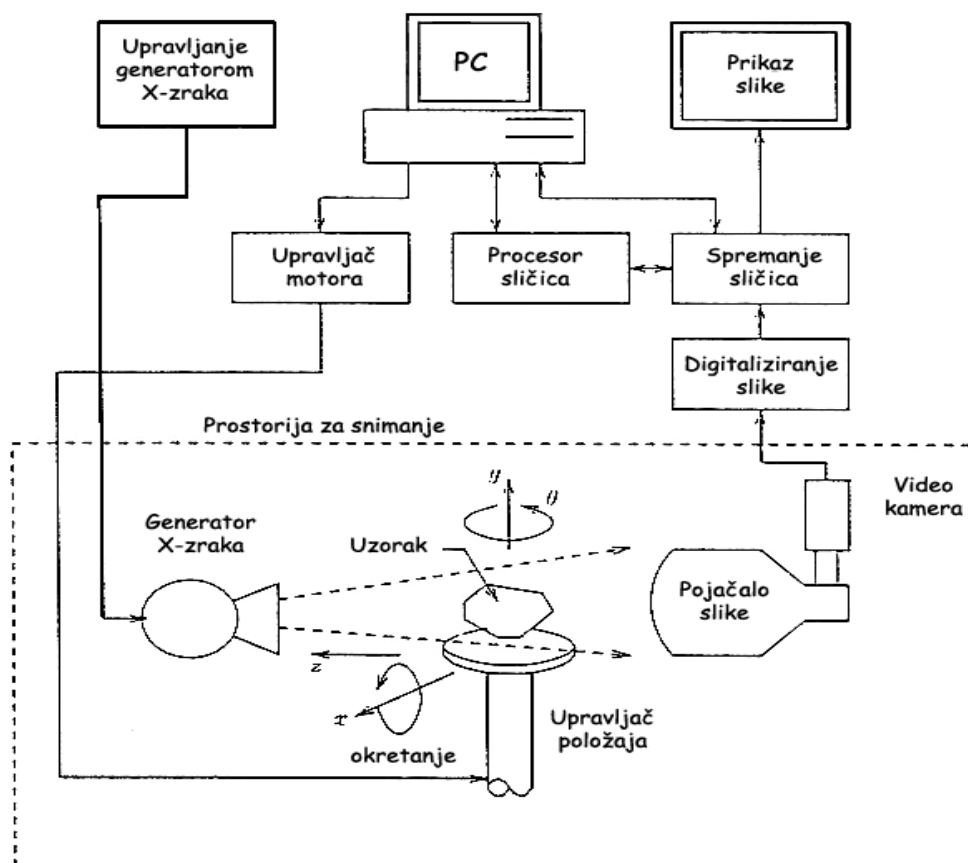
- A – Kazetna obloga u koju se stavlja film
- B – Film presvučen slojem foto osjetljivog fosfora
- C – Olovna folija za pojačavanje toka elektrona

Izravna, direktna ili digitalna radiografija je vrlo slična računalnoj radiografiji po brzini, načinu rada i rezultatima koji se mogu njome dobiti. Razlika je što se umjesto filma u kazeti snimka hvata na ravnoj detektorsko ploči koja stoji iza objekta snimanja iz koje se snimka šalje na računalo na kojem je prikaz vidljiv već nekoliko minuta nakon snimanja.

### 2.3.3. Radiografija u realnom vremenu(RTR)

Idealan slučaj u radiografiji je nula vremena čekanja na prikaz slike i to se može postići sustavom za radiografiju u realnom vremenu ili Real Time Radiography(ili Radioscopy). Jedan takav sustav shematski prikazuje slika 10.

Kontinuirani snop zračenja obasjava predmet koji se snima, a s druge strane predmeta je ploča presvučena fluorescentnim materijalom koji odaje svjetlo kako zračenje pada na njega. Senzori hvataju proizvedenu svjetlost i pretvaraju ju u sliku koja je "pozitiv", za razliku od filmske i računalne radiografije gdje je dobiveni prikaz "negativ". To znači da su u RTR-u tamnija područja deblja, a svjetlija tanja, dok je kod filmske i računalne radiografije obrnuta situacija, tj. tamnija područja su tanja, a svjetlija su deblja. Prikazom se može manipulirati pomoću računala, a okretanjem predmeta pomoću upravljačkih mehanizama dobiti razne kuteve gledanja. Spajanjem prikaza punih krugova po svim osima(svih 360 stupnjeva po svakoj osi) može se dobiti 3D prikaz snimanog predmeta. Prikaz koji se dobije moguće je gledati po dubini i po površini čime je moguće dobiti volumno stanje predmeta naspram površinskog u ostalim radiografskim tehnikama. Tako se može izračunati volumen nekog prostora unutar predmeta(npr. pukotine).



Slika 10. Sustav za radiografiju u realnom vremenu [13]

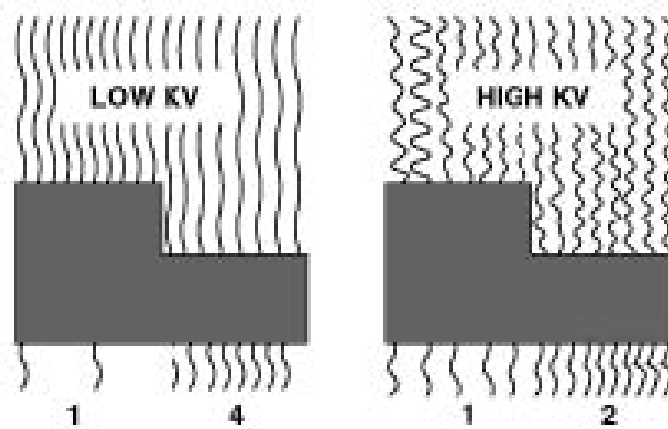
#### 2.4. Mogućnosti i ograničenja radiografije

Radiografija kao metoda nerazornih ispitivanja se pokazala kao višestruko korisna u mnogim slučajevima, a u zrakoplovstvu je zastupljena u velikoj mjeri upravo zbog potrebe stalnih pregleda zrakoplova kako se nebi neko sitno oštećenje pretvorilo u ogroman trošak za zrakoplovne kompanije. Zbog svojih svojstava i načina rada opisanih u prethodnim poglavljima radiografijom se mogu učiti mnogi detalji skriveni u konstrukciji: korozija između spojeva, sitne pukotine na rubovima provrta za zakovice i vijake, pukotine u unutrašnjosti materijala nastale naprezanjima uslijed dugotrajne izloženosti promjeni tlakova (tlak na visini i tlak na zemlji). Sve navedeno se može uočiti na velikim dubinama materijala, do čak 100 mm s jakim rengenkim uređajima, čime je metoda veoma pogodna za korištenje prilikom pregleda višedjelnih komponenti.

Nedostatak radiografije je nemogućnost otkrivanja sitnih oštećenja u njihovoj inicijalnoj fazi nastanka, početno djelovanje krozije, kao i većih oštećenja ukoliko se radi o snimanju sklopova većih debljina. Naime osjetljivost radiografije se mjeri u postocima debljine materijala, a u tome se skriva zamka jer velika pukotina na velikoj debljini snimanja će predstavljati mali postotak i neće se vidjeti na radiogramu. S druge strane zbog veće količine

materijala takva pukotina možda neće predstavljati problem, a možda i hoće zbog načina na koji je struktura složena. Dodatan problem predstavljaju pukotine koje imaju jednu dimeziju izraženu više nego ostale dvije, što znači da će se gledano iz ravnine okomite na manje izražene dimenzije pukotina prikazati kao mala točkica koju se možda može i zanemariti, dok će u stvarnosti ona biti dugačka i nekoliko milimetara po trećoj osi čime će izravno ugrožavati stanje strukture. Iz tih razloga je potrebno ponavljati snimanja iz više kuteva ako se sumnja na nastanak takvih pukotina. Kao i kod drugih metoda potrebno je iskustvo ispitivača za pravilnu primjenu radiografskog ispitivanja.

Posebnu pažnju potrebno je posvetiti postavkama prilikom snimanja jer o njima će uvelike ovisiti kvaliteta radiograma. Za snimanje su bitni struja  $I$  [mA], napon  $U$  [kV] i vrijeme  $t$  [s] ekspozicije. U značajnoj mjeri na kvalitetu kontrasta utječe postavka napona, naime previsoki napon će uzrokovati veći prolazak zračenja na drugu stranu na tanjim(oštećenim) i debljim(normalnim) djelovima, te će dobiveni snimak biti približno istog zacrnjenja na promatranom području. Nasuprot tome niži napon će omogućiti da se veći dio zračenja upije na debljim djelovima, a na tanjim da veći dio prođe, što će imati za rezultata znatne razlike u zacrnjenju radiograma na tim područjima. Ovaj fenomen ilustrira slika 11.



Slika 11. Fenomen visokog i niskog napona[11]

## 2.5. Provedena ispitivanja

Kako je ovaj rad nastavak na radiografski dio diplomskog zadatka kolege Marka Rendulića ovdje će se ukratko pokazati što je dosad napravljeno u smjeru radiografskog ispitivanja višedjelnih komponenti.





Slika 11. Ispitni uzorak i radiografski snimak [14]

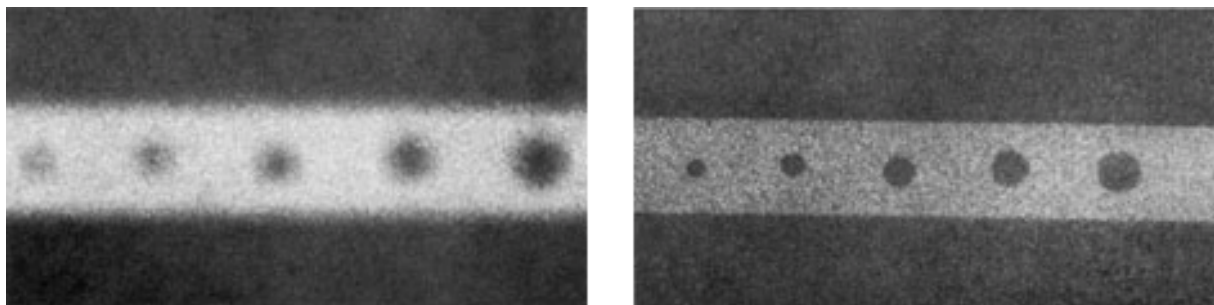
Na Slici 11 lijevo se vidi prikaz ispitnog uzorka iz aluminijskog lima debljine 4mm na kojem su simulirana oštećenja korozijom i pukotine koje mogu nastati oko provrta. U zadnjem ispitivanju na uzorak su dodane još 4 ploče bez oštećenja(jedna od 4mm i dvije od 3mm) kako bi se simuliralo oštećenja skriveno iza više slojeva, tj. komponenti. Iz prikaza na Slici 11 desno se vidi da se i nakon 14mm debljine jasno uočavaju veličina i pozicija oštećenja uzrokovanih korozijom. Najmanja dubina oštećenja je označena strelicom i iznosi 0,5 mm čime je postignuto uočavanje oštećenja od 3,5% debljine materijala. Korak dalje bi bio otići na rub uočljivosti koja se propisuje NDT radiografskom metodom i iznosi 2% debljine snimanog materijala, a to je upravo područje koje će se obraditi u eksperimentalnom dijelu rada.

## Osjetljivost računalne radiografije

### 3.1. Definiranje osjetljivosti

Osjetljivost je definirana kao granična vrijednost pri kojoj se još uvijek mogu razlučiti promjene u strukturi (mogu se uočiti najmanji detalji) na radiografskom snimku i ona ovisi o parametrima snimanja i debljini materijala kroz koji prolazi zračenje. Poželjna je što manja osjetljivost radiograma jer će njome biti moguće uočiti sitnije detalje u odnosu na ukupnu debljinu materijala. Jednom kad je snimka napravljena postignuta osjetljivost će ovisiti od dva nezavisna parametra: kontrastu i oštrini.

Kontrast je razlika gustoće svjetlosnih piksela između promatranog detalja i njegove okoline, a oštrina je mjera skokovitosti promjene u kontrastu, tj. hoće li prijelaz iz jednog područja u drugo biti nagli, pa ćemo ustvrditi da se radi o oštrom rubu ili postepen, što će indicirati da se radi o kontinuiranoj promjeni visine. Na radiogramima na kojima nije postignuta zadovoljavajuća razlučivost, tj. oštrina je slaba (slika 12. lijevo), nagli i postepeni prijelazi će djelovati vrlo slično (zamućeno) te će ispitivač teško ustvrditi o čemu je riječ, čak i kad je jasna razlika u kontrastu. Nasuprot tome, ukoliko imamo visoku oštrinu smanjeni kontrast nam neće ometati uočavanje detalja i njihovih rubova (slika 12. desno). No ukoliko je kontrast premali i najveća oštrina neće pomoći da se uoče razlike u strukturi te je poželjno da oba parametra budu visokih vrijednosti.



Slika 12. Lijevo - visoki kontrast-niska oštrina, Desno – niski kontrast-visoka oštrina [11]

Postignuta osjetljivost se izražava u postotcima debljine materijala kroz koju prolazi zračenje, što je matematički zapisano:

$$O = \frac{D_o}{D_m} \cdot 100\%$$

Gdje su:

$O$  - Radiografska osjetljivost

$D_o$  - Dubina/visina oštećenja ili strukturalne nepravilnosti koja se promatra

$D_m$  - Ukupna debljina snimanog materijala

Primjer:

Ako se snima materijal debljine 10mm i postigne se osjetljivost od 2% to znači da su na radiogramu uočljive sve nehomogenosti koje su reda veličine od 0.2mm na više. Oštećenja manja od toga se neće moći razlučiti od ostatka materijala.

### **3.2. Indikatori kvalitete slike(IQI)**

Da bi ispitivač imao referencu na po kojoj može znati što se može, a što ne može uočiti na radiogramu kojeg je snimio koriste se takozvani "Indikatori kvalitete slike" ili kako se međunarodno uvriježio engleski naziv: "Image quality indicators", ili skraćeno IQI. U nekoj literaturi se koristi i naziv penetrametri. Pomoću njih ispitivač dobiva podatke o kontrastu i oštini, tj. postignutoj osjetljivosti radiograma na konkretno snimljenoj snimci.

Indikatori kvalitete slike nam predstavljaju kontrolu kvalitete bez koje bi mnoge pukotine prošle neopaženo stoga je njihova primjena vrlo bitna. Njihov oblik i veličina propisani su međunarodnim standardima i normama, a u praksi se najčešće pojavljuju dvije vrste indikatora: pločasti sa rupicama i žičani. Važno je da se prilikom snimanja upotrebljavaju indikatori od istog materijala kao i predmet koji se snima, a ako to nije moguće onda se stavlja prvi najbliži indikator od materijala koji ima slična svojstva upijanja zračenja kao i materijal na kojem se provodi snimanje.

#### **3.2.1. Indikatori s provrtom**

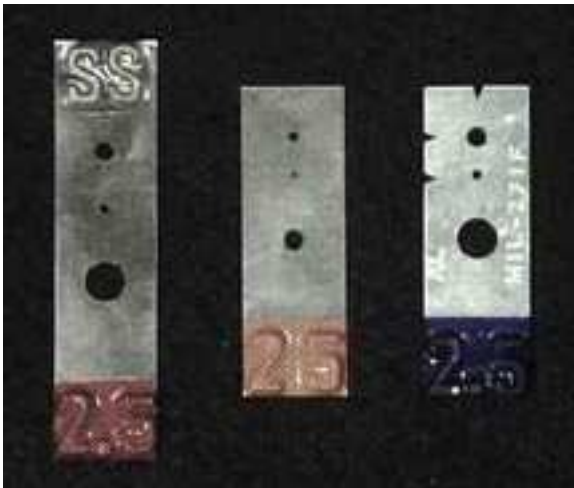
U svojoj osnovi to su pravokutne pločice određene debljine, vrste materijala i tipova provrta(sitnih rupica poznatog promjera).

Standard "ASTM Standard E1025" daje detaljne upute za njihovu izradu:

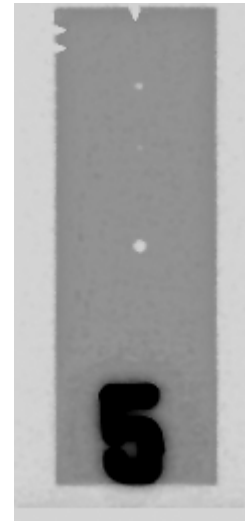
- propisuje oblik: širinu i dužinu
- klasificira izradu od 8 grupa materijala prema njihovim svojstvima upijanja zračenja
- propisuje sustavni način zarezivanja rubova prema kojem ispitivač određuje vrstu materijala
- brojevne oznake na pločicama određuju debljinu pločice
- navodi veličine provrta koji se buše u njima

Postoje i drugi standardi u kojima se ove vrijednosti drugačije navode, pa tako umjesto zarezova za prepoznavanje vrste materijala mogu se koristiti slovne oznake, a brojčana oznaka

može indicirati debljinu uzorka na koji se stavlja indikator da bi se postigla osjetljivost od 2%.



Slika 13. Razni indikatori s provrtom[4]



Slika 14. Radiogram indikatora s provrtima[4]

Na slici 14. se vidi radiografski snimak indikatora s provrtima na kojem se uočavaju zarezi u obliku slova V na lijevom i gornjem rubu koji ukazuju na to da je indikator od Aluminijsa. Broj 5 se odnosi na debljinu u tisućama inča pa je tako ovaj indikator debljine 0.005 inča. Neki drugi indikatori, prikazani slikom 13. imaju na gornjem dijelu(ili nekom drugom dijelu) slovne oznake, npr. "SS" što bi označavalo "Stainless Steel", tj. nehrđajući čelik, a donji broj "2.5" označava najveću debljinu materijala u inčima na koji se indikator može postaviti da se postigne osjetljivost od 2%.

Razina kvalitete se vrlo često prikazuje dvojnomo oznakom, detalji označavanja se mogu naći u standardu a ovdje se navodi jedna od njih i objašnjenje:

#### **Oznaka: 2-2T**

- Prvi broj označava debljinu indikatora u postotcima debljine materijala na koji se može postaviti indikator da se dobije osjetljivost od 2%
- Drugi broj označava koji se promjer rupe treba moći uočiti i taj promjer se dobije tako da se drugi broj u oznaci pomnoži sa debljinom indikatora(označena s "T", eng. tickness)

### **3.2.2. Žičani indikatori**

Za razliku od indikatora s provrtom gdje je provrt bio napravljen na pločici, žičani indikatori su sastavljeni od 6 tankih žičica standardiziranih promjera od najmanjeg prema najvećem, koje su upakirane u prozirnu polimernu foliju. Standard koji propisuje izradu i

upotrebu žičanih indikatora kvalitete slike je "ASTM Standard E747". Indikatori su podijeljeni u 4 seta po 6 žica, a setovi su označeni slovima A, B, C i D.



Slovo stoji u donjem desnom kutu indikatora, a u donjem lijevom je grupa materijala od koje su načinjene žice. Oznaka na vrhu indikatora govori prema kojem je standardu izrađen(slika 15.). Razina kvalitete se prikazuje istim dvojnim oznakama kao i kod indikatora s provrtima.

Slika 15. Žičani indikator kvalitete slike

Da bi se moglo upotrebljavati bilo koju vrsta indikatora za bilo koje snimanje potrebno je preračunavanje između indikatora s provrtima i žičanim indikatorima kojim dobijemo odnose u kojima za svaki provrt odgovara jedna veličina promjera žice. Već izračunate vrijednosti možemo očitati iz tablice u Standardu ili koristiti sljedeći izraz:

$$F^3 d^3 l = T^2 H^2 \left( \frac{\pi}{4} \right)$$

U kojem su:

$F = 0.79$  (konstantni faktor oblika za žice)

$d$  = promjer žice(mm ili č)

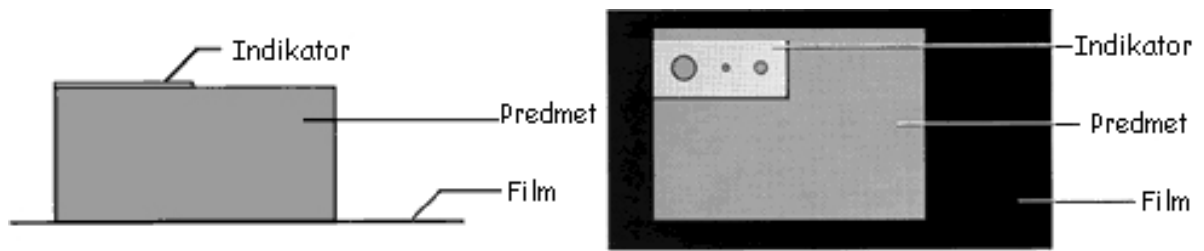
$l = 7.6$  mm ili 0.3 inch (efektivna dužina žice)

$T$  = debljina indikatora s provrtom (mm ili inč)

$H$  = promjer provrta na indikatoru s provrtom (mm ili inč)

### 3.2.3. Način upotrebe indikatora

Indikatori se stavljaju na objekt snimanja i to tako da uvijek budu na istoj udaljenosti od filma na kojoj je i područje koje želimo promatrati. Ukoliko to nije moguće indikator se treba postaviti sa strane na komad materijala koji je isti ili ima sličnu sposobnost upijanja zračenja na istu udaljenost od filma ili što je moguće bliže toj vrijednosti. Također indikator treba biti postavljen od rubova predmeta i radiograma tako da barem 3 njegova ruba budu vidljiva na snimci predmeta(slika 16.).



Slika 16. Pozicioniranje indikatora na predmet prije snimanja[4]

Ukoliko su provrti na indikatoru vidljivi na radiografskoj snimci to još uvijek nije garancija da će oštećenja istog reda veličine biti vidljiva. Indikator samo daju podatak o kvaliteti radiografskog postupka, napravljeni su umjerenim metodama i imaju oštre rubove. Oštećenja su često nepravilnih oblika i s postepenim prijelazima u visini(dubini) čime na radiogramu postaju manje uočljivi i može ih se previdjeti.

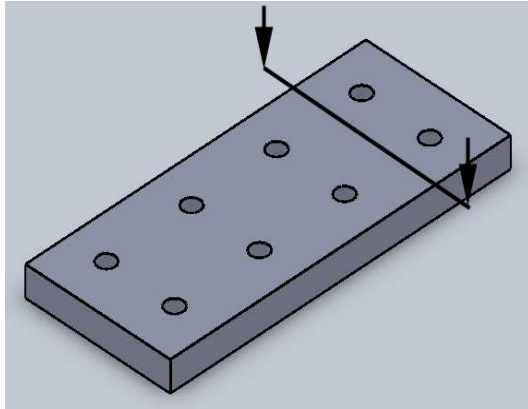
### 3.3. Kvantifikacija osjetljivosti radiografije

Kako je u radiografskoj metodi cilj dobiti snimku ozračenog predmeta i na njoj vidjeti eventualne nehomogenosti materijala koja bi ukazivala na oštećenja postavlja se pitanje kako takve snimke pretvoriti u brojčane podatke koje možemo iskazati grafički, čime bi dobili prikaz koji bi za inženjerske potrebe bio mnogo praktičniji i točniji. Takav prikaz bi se onda mogao dati računalu da analizira u nekoj kasnijoj mnogo sofisticiranijoj izvedbi software-a, pa ispitivač nebi više trebao nagađati je li riječ o oštećenju ili nije, već bi se na deterministički način iz dobivenih podataka moglo zaključiti o čemu je riječ.

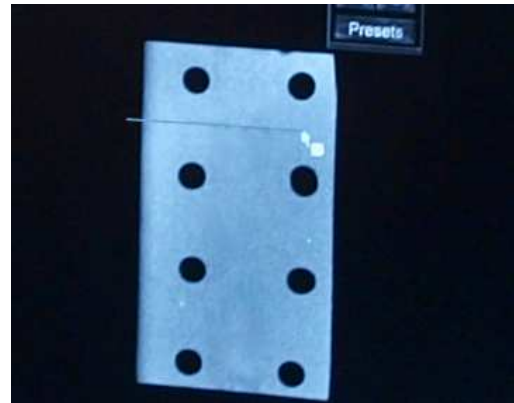
Takav prikaz se ne može dobiti klasičnom filmskom radiografijom u kojoj se film razvija u mračnoj prostoriji kemijskim postupkom već je potrebno imati digitalni prikaz snimke, tako da je snimku potrebno dobiti iz neke druge radiografske metode(računalna, izravna ili radiografija u realnom vremenu).

Iz takvog digitalnog prikaza moguće je upotrebom pripadajućeg softwarskog paketa odrediti stupanj zacrnjenja svako piksela i odrediti njegovu lokaciju na snimci. Takav set podataka može se iskoristiti da se iscrta graf na kojem će na apscisnoj osi biti jedna od prostornih dimenzija u ravnini snimke, a na ordinatnoj osi stupanj zacrnjenja piksela pripadajuće koordinate prostorne osi. U takvom prikazu idealna homogenost materijala bi se iskazalo kao ravna linija na grafu. Proceduru prikazuju slike 17, 18 i 19(s tim da radiografska snimka naravno ne prikazuje idealni, već realni materijal). Na njima se vidi da ako uzorak materijala ozračimo i povučemo koordinatnu os na radiografskom prikazu na mjestu kako pokazuje crna linija na 3D modelu da ce se dobiti set tabličnih podataka koje možemo iscrtati na grafu. Na njemu će se rubovi uzorka prikazati kao oštri prijelazi. Kako su svi materijali

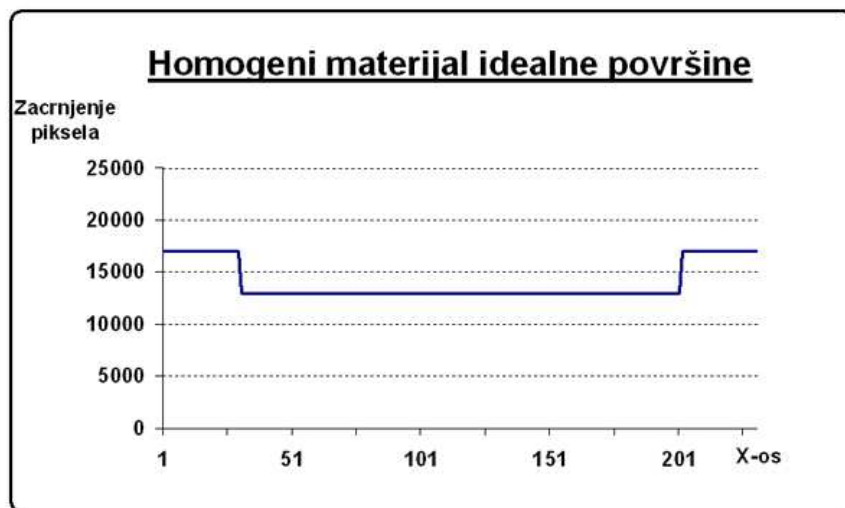
hrapavi njihova površina stvara šum u signalu koji se očituje u nejednolikom zacrnjenju piksela oko promatrane točke, što se može vidjeti na grafu na slici 20.



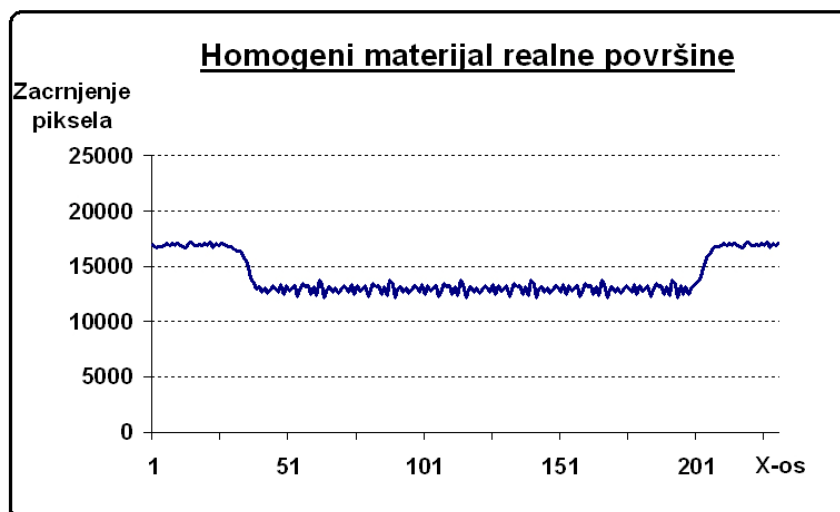
Slika 17. Primjer ispitnog uzorka



Slika 18. Radiogram uzorka



Slika 19. Graf koji bi se dobio snimanjem idealne površine homogenom materijala



Slika 20. Graf koji bi se dobio snimanjem realne površine homogenom materijala

Prikazom na ovaj način ostvarena je mogućnost da se barata sa konkretnim brojčanim podatcima i iz grafova uočavaju promjene u zacrnjenju kao promjena visine na ordinatnoj osi. Povećanje debljine materijala očitovat će se kao svjetlije područje, što će na grafu imati za posljedicu manju vrijednost zacrnjenja, odnosno pad krivulje. Nauprot tome gubitak materijala koji je od interesa u nerazornim ispitivanjima očitovat će se kao tamnije područje na radiogramu, a skok krivulje prema gore na grafu.

Kako inženjera ne zanimaju prikazi šumova težit će se njihovoj eliminaciji, a to se može postići osrednjavanjem vrijednosti zacrnjenja piksela čime će se dobiti glatke krivulje. Oštećeno mjesto u materijalu će na radiogramu u ukupnom zbroju imati više tamnih piksela i krivulja će imati više prosječne vrijednosti, tj. kretat će se u području većih brojeva zacrnjenja što će se lako uočiti na grafičkom prikazu i olakšati ispitivaču uočavanje sumnjivih mjesta te ubrzati postupak otkrivanja pukotina, korozije i drugih vrsta oštećenja.

Isto tako je moguće ovakav sustav automatizirati čime bi se kompletan postupak periodičkih pregleda i remonta zrakoplova znatno skratio jer bi se dugotrajne analize rezultata prepustile računalu koje bi ispitivaču prikazalo samo sumnjiva mjesta kojima je potrebna ljudska pažnja. Iako bi sam postupak snimanja u početku i dalje provodili ljudi, krajnji cilj bi bio uspostaviti potpuno automatizirani proces gdje bi računalni rendgenski uređaji montirani na robotske ruke ili pokretne robote snimali kompletan zrakoplov, analizirali podatke i ustvrdili kritična mjesta na kojima su potrebni popravci. Na taj način bi se potpuno zdrav zrakoplov vratio u službu već nakon nekoliko sati, za razliku od sadašnjih pregleda koji traju od tjedan dana do mjesec dana i tijekom kojih je zrakoplov van funkcije i stvara trošak za zrakoplovnu kompaniju. Zrakoplovi na kojima su potrebni popravci te se radi remont stoje van funkcije i po nekoliko mjeseci, ovakvim postupkom bi se remont skratio za vrijeme potrebno da se pregleda zrakoplov, što može iznositi i do 2 tjedna.

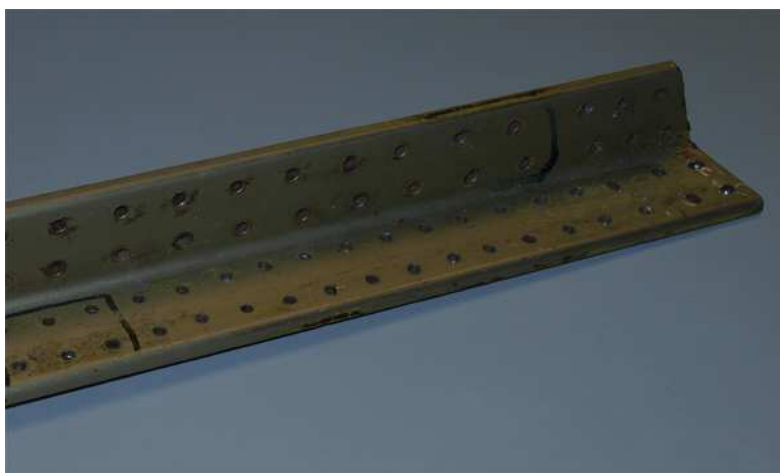
Da bi se razvio ovakav sustav, testirao, te na njemu otklonile greške biti će potrebno mnogo znanja i inženjerskih sati te su gornja razmatranja teoretska osnova za razvoj zrakoplovnog održavanja. Kako bi se odredile mogućnosti kvantifikacije radiograma dobivenih računalnom radiografijom višedjelnih zrakoplovnih komponenti napravljeni su uzorci i provedena eksperimentalna snimanja iz kojih su dobiveni podatci i iscrtani grafovi.



## 4. Eksperimentalni rad

### 4.1. Ispitni uzorci

Kako bi se dobili što stvarniji rezultati odlučeno je izraditi ispitene uzorke od komada koji se standardno koristi u zrakoplovstvu te je u tu svrhu nabavljen dio ramenjače CanadAir-a iz Zrakoplovno tehničkog centra u Velikoj Gorici. Radi se o L-profilu dimenzija 44x44x6mm i taj komad je već bio u upotrebi te su na njemu vidljivi ostatci boje i prljavštine koji će na radiogramu ostavljati šum.



Slika 21. Dio ramenjače CanadAir-a

Za snimanje višedjelnih komponenti bilo je potrebno iz L-profila izrezati uzorke i pospajati ih zajedno. Unatoč tome što je bio u upotrebi komad je zdrav i na uzorcima je bilo potrebno izraditi umjetna oštećenja koja će simulirati koroziju i pukotine. Da bi se izradilo oštećenje od 2% debljine materijala na debljini od 6mm koliko iznosi debljina L-profila bilo je potrebno primijeniti vrlo preciznu tehnologiju izrade kakva se može postići na erozimat. S obzirom na mogućnost tehnologije da radi i finija oštećenja napravljen je i drugi set oštećenja koja su bila reda veličine 1% debljine materijala u slučaju da je moguće postići takvu osjetljivost.

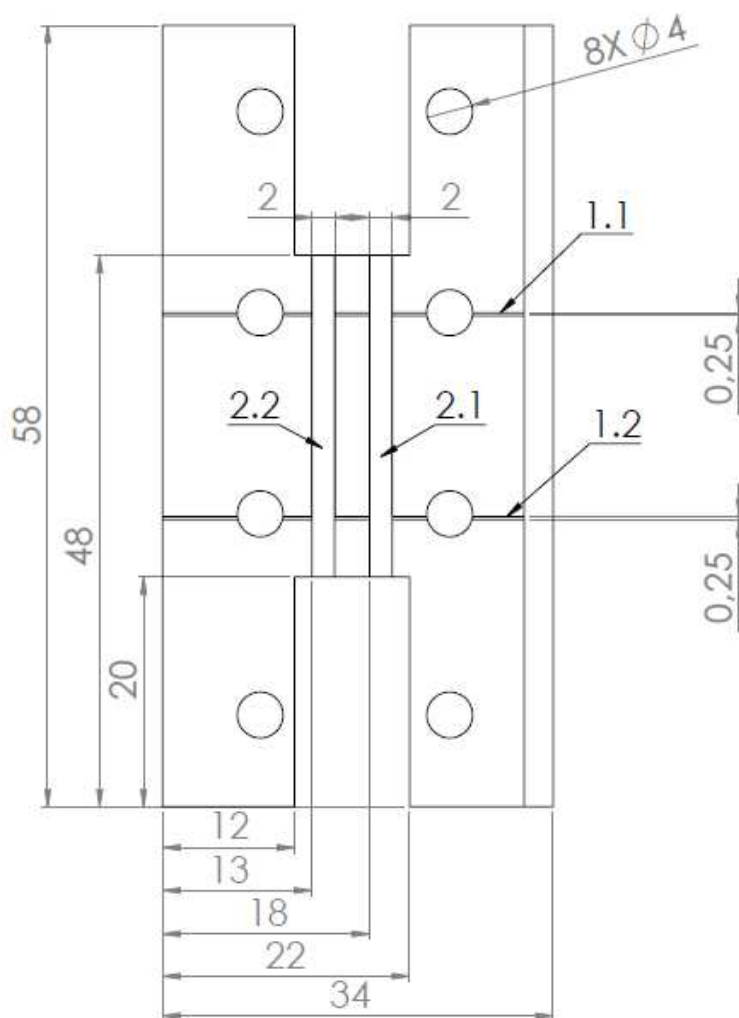
Za izradu većih oštećenja nije bilo potrebno koristiti skupu tehnologiju elektroerozije te je drugi uzorak napravljen na glodalici na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Sklop koji se želi postići potrebno je složiti tako da je moguće simulirano oštećenje postavljati na razne dubine u materijalu, što se može postići okretanjem uzorka i mijenjanjem njegove pozicije u sklopu, a to je vrlo nezgodno postići s L-profilom te su iz njega izrezane pločice.

### 4.1.1. Ispitni uzorak izrađen elektroerozijom

Osmišljen je nacrt uzorka prema slici 22. L- profil ima provrte na jednoj svojoj strani promjera 5mm, a na drugoj 4mm te je iz strane s provrtima od 4mm izrezana pločica. Oblik slova H je iz razloga da se smanji vrijeme rada na erozimat, a dužina pločice je uzeta da obuhvata 8 rupa. Područje sa središnje 4 rupe je prostor na kojem se vrši ispitivanje, dok vanjske 4 rupe služe za prihvat s drugim djelovima konstrukcije putem vijaka. Korozija je simulirana dugačkim kanalima širine 2mm između provrta, a pukotine ulaskom žice u materijal tako da žica pređe preko provrta. Razlog tome je da su mjesta oko provrta kritični dijelovi gdje se najviše javljaju pukotine, a korozija se najviše javlja upravo na ravnim dijelovima.

Prednost postupka odvajanjem čestica elektroerozijom na aluminiju je stanje površine koje se dobije nakon prolaska žice, a koje je vrlo slično stanju površine koja je napadnuta finom korozijom (slika 23. d). Razlog tome je nisko talište aluminija koji se prolaskom žice "packa" i žica ga nemože u potpunosti preuzeti na sebe.

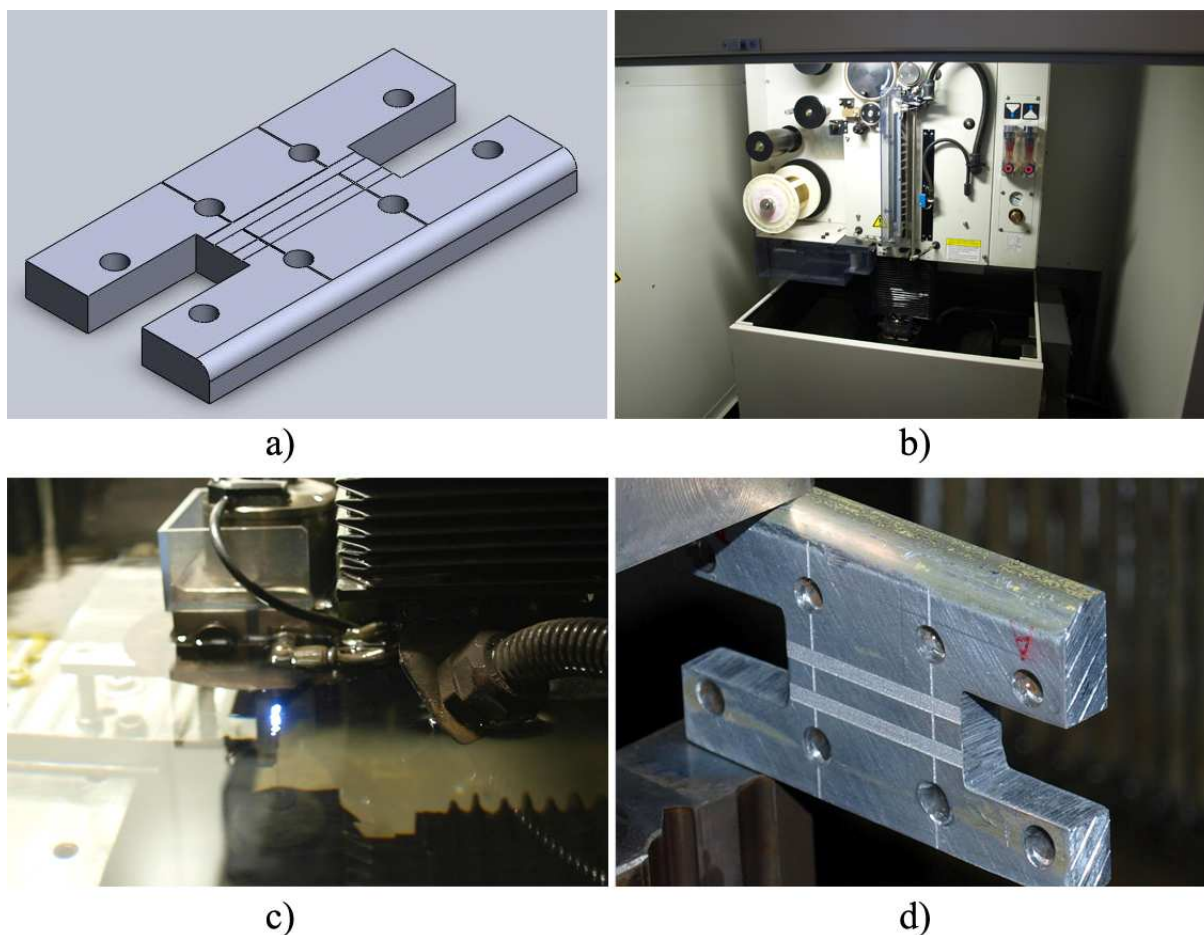


Slika 22. Nacrt ispitnog uzorka izrađenog elektroerozijom

Radi lakšeg snalaženja na nacrtu su brojčanim oznakama označena 4 područja gdje su strojno izrađena oštećenja. U tablici 1. su ta oštećenja navedena i pojašnjena.

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	Stanjivanje – korozija	36[mm <sup>2</sup> ]	0.06[mm]
		Stanjivanje – korozija	36[mm <sup>2</sup> ]	0.12[mm]

Tablica 1. Klasifikacija simuliranih oštećenja na uzorku izrađenom elektroerozijom



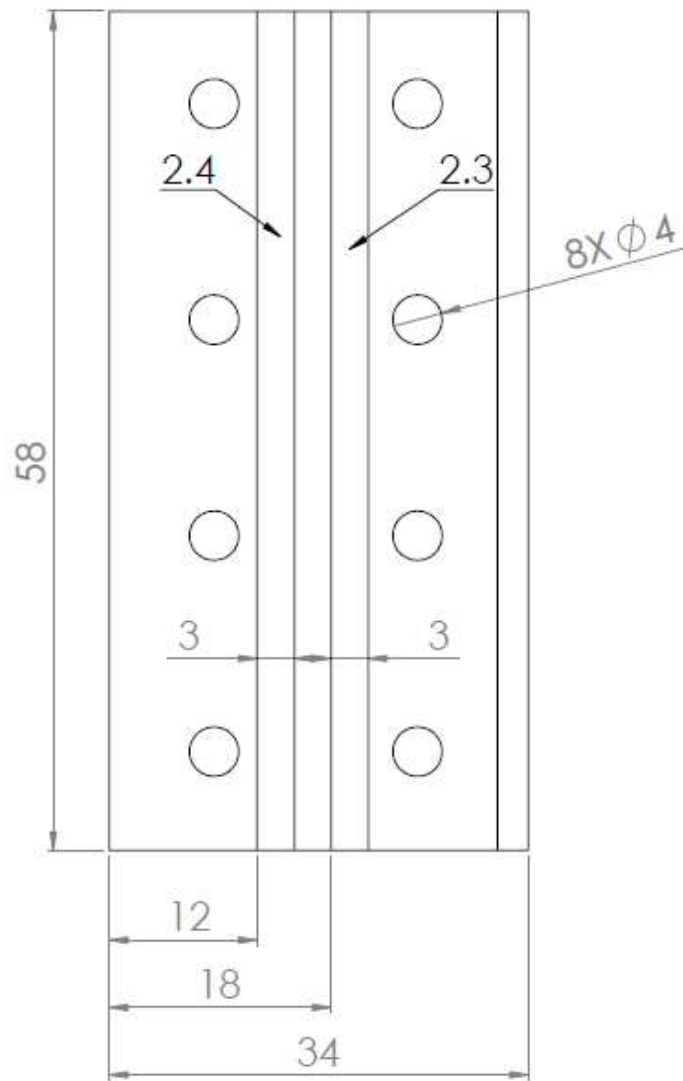
Slika 23. a) 3D model ispitnog uzorka b) Eroziomat  
 c) elektroerozija na uzorku d) gotov komad

Postupak izrade uzorka je prikazan na slici 24 a) do d). Na slici d) se može vidjeti finoj

koroziji slično stanje površine (zrnca aluminija zaljepljena za površinu, red veličine je u nanometrima) u dugačkim utorima.

#### 4.1.2. Ispitni uzorak izrađen glodanjem

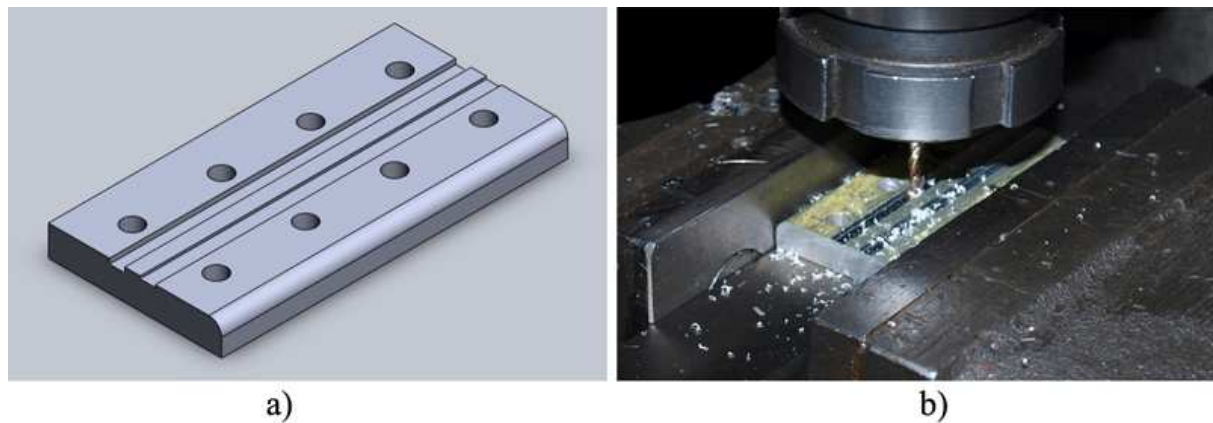
Za ispitni uzorak na kojem će biti veća oštećenja napravljen je nacrt prikazan slikom 25. Na njemu nema pukotina jer na Fakultetu u danom trenutku nije postojalo dovoljno malo glodalno za izradu takvih oštećenja.



Slika 24. Nacrt ispitnog uzorka izrađenog glodalicom

Oštećenje		Tip oštećenja	Dimenzije oštećenja	
Skupina	Oznaka		Površinski	Dubinski
2.	2.3	Stanjivanje - korozija	174[mm <sup>2</sup> ]	0.8[mm]
	2.4	Stanjivanje - korozija	174[mm <sup>2</sup> ]	1.5[mm]

Tablica 2. Klasifikacija simuliranih oštećenja na uzorku izrađenom glodanjem



Slika 25. Postupak izrade uzorka glodanjem a) 3D model b) obrada na glodalici

Oštećenja postignuta na ovom uzorku su 13% i 25% u odnosu na njegovu debljinu od 6mm, što će postati manje kako se budu slagale komponente. On je izrađen s povećanim oštećenjima kako bi se osigurala sigurna vidljivost na radiogramu i mogla napraviti usporedba s manjim oštećenjima istog oblika na uzorku izrađenom elektroerozijom.

#### ***4.2. Snimanje računalnom radiografijom i analiza rezultata***

Ispitivanja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u laboratoriju za nerazorna ispitivanja gdje je smještena prostorija za radiografsko snimanje (slika 26.). Uređaj za radiografsko snimanje je sličan uređaju prikazanim shemom na slici 4. u poglavlju o radiografiji. Na slici 27. vidimo da se radi o cijevi koja je montirana na pomični stalak na kojem su podesive ručice za podešavanje visine fokusa. Fokus se određuje u odnosu na predmet koji je postavljen na stoliću ispod generatorske cijevi pomicanjem cijevi po visini pomoću podesivih ručica.



Slika 26. Prostorija za radiografsko snimanje - FSB

**Postupak snimanja:**

1. Film na kojem je obrisan prethodni sadržaj se stavlja u kartonski uložak
2. Uložak se stavlja na stolić ispod generatora X-zraka, na mjesto gdje će gađati zračenje, točno ispod otvora za izlaz zraka
3. Na uložak se stavlja predmet snimanja
4. Izlazi se iz prostorije i zatvaraju se zaštitna vrata
5. Na upravljačkoj jedinici(slika 28.) se namještaju parametri vremena ekspozicije, napona i struje, te se pali uređaj
6. Nakon isteka vremena gasi se uređaj te se iz prostorije uzima uložak s filmom
7. Film se stavlja u skener(slika 29.) koji ga skenira i daje prikaz na ekranu(slika 30.) nakon čega briše prethodni sadržaj



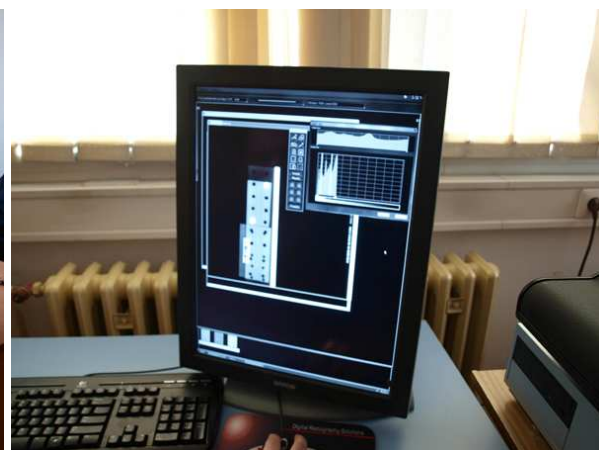
Slika 27. Generator X-zraka – FSB



Slika 28. Upravljačka jedinica radiografskog uređaja – FSB

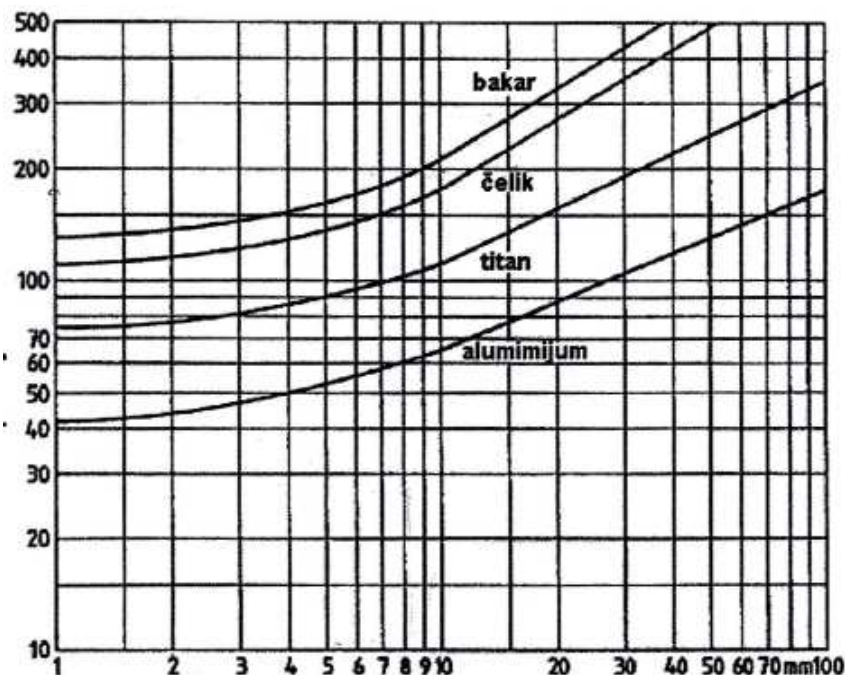


Slika 29. Skener radiografskih filmova –FSB



Slika 30. Prikaz radiograma na računalu - FSB

Kako bi se odredili parametri snimanja korišten je dijagram na slici 31.



Slika 31. Dijagram odnosa debljine materijala i potrebnog broja kilovolti

Iz dijagrama je jasno da je za snimanje Aluminijskog debljine 6mm potrebno namjestiti uređaj na otprilike 55 kV, a za 12mm(sklop 2 dijela po 6mm) oko 65 kV.

Nažalost uređaj koji je stajao na raspolaganju je radio u rasponu od 100 kV do 300 kV jer je namijenjen za snimanje većih debljina i prvenstveno čeličnih konstrukcija. Najmanja moguća konfiguracija je bila 80 kV na samom rubu funkcionalnosti uređaja te je ona i primijenjena no odmah je bilo jasno da rezultati koji će se dobiti neće biti oni koji bi se mogli dobiti primjenom adekvatnih parametara. Dodatna nepovoljnost je što uređaj na 80 kV radi nestabilno te nije moguće dobiti pouzdanost i ponovljivost u svakom snimanju.

Radi skraćivanja pisanja odsad će se za uzorak izrađen elektroerozijom pisati kao "uzorak 1", a glodanjem "uzorak 2".

### Snimanje uzorka 1

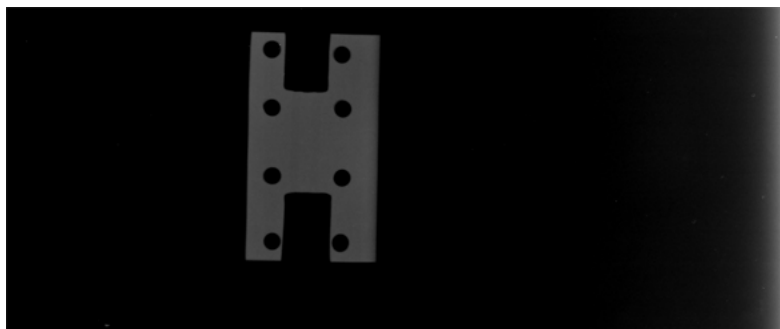
Prema postupku pojašnjenom na prethodnoj stranici provedeno je snimanje uzorka 1 kao samostalne komponente radi utvrđivanja mogućnosti prikaza na radiogramu prije sklapanja u sklop. Provedena su 4 snimanja, kako to pokazuju podatci u tablici 3. Niti jedan od snimaka nije otkrio postojanje pukotina, dok se brazde kojima je simulirana korozija mogu uočiti značajnom manipulacijom grafičkog prikaza prolaskom kroz mnoge filtere, kako to pokazuje slika 33. Iako je postojanje brazdi uočeno na ekranu, brojčanim pokazateljima i

isertavanjem istih na grafu koji pokazuje slika 34. nije bilo moguće razlikovati brazde od šuma koji nastaje zbog hrapavosti površine.

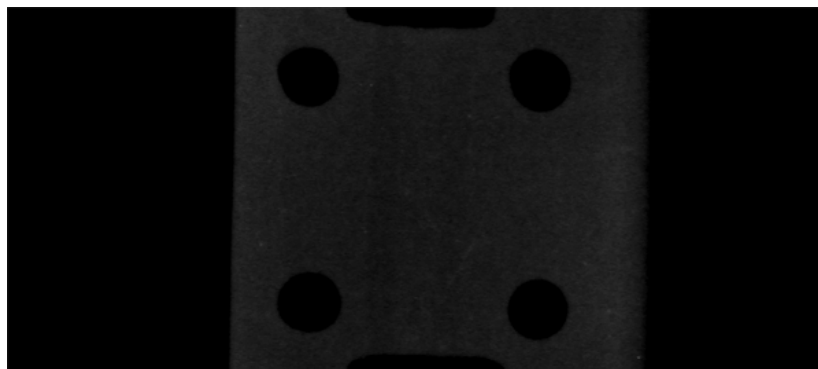
Snimka	Materijal	Debljina	Osjetljivost	Napon	Struja	Ekspozicija	Tip filma
1.	Aluminij	6mm	2% 1%	80kV	4mA	45 sekundi	GPS Kodak
2.	Aluminij	6mm	2% 1%	80kV	4mA	30 sekundi	GPS Kodak
3.	Aluminij	6mm	2% 1%	80kV	4mA	45 sekundi	PC-2 High Definition Kodak
4.	Aluminij	6mm	2% 1%	100kV	4mA	30 sekundi	PC-2 High Definition Kodak

Tablica 3. Parametri snimanja uzorka 1

Iz dobivenih rezultata je zaključeno kako nema smisla spajati ovaj uzorak u sklop jer se na većoj debljini materijala može uočiti samo manje, te su obustavljena daljnja snimanja ovog uzorka.

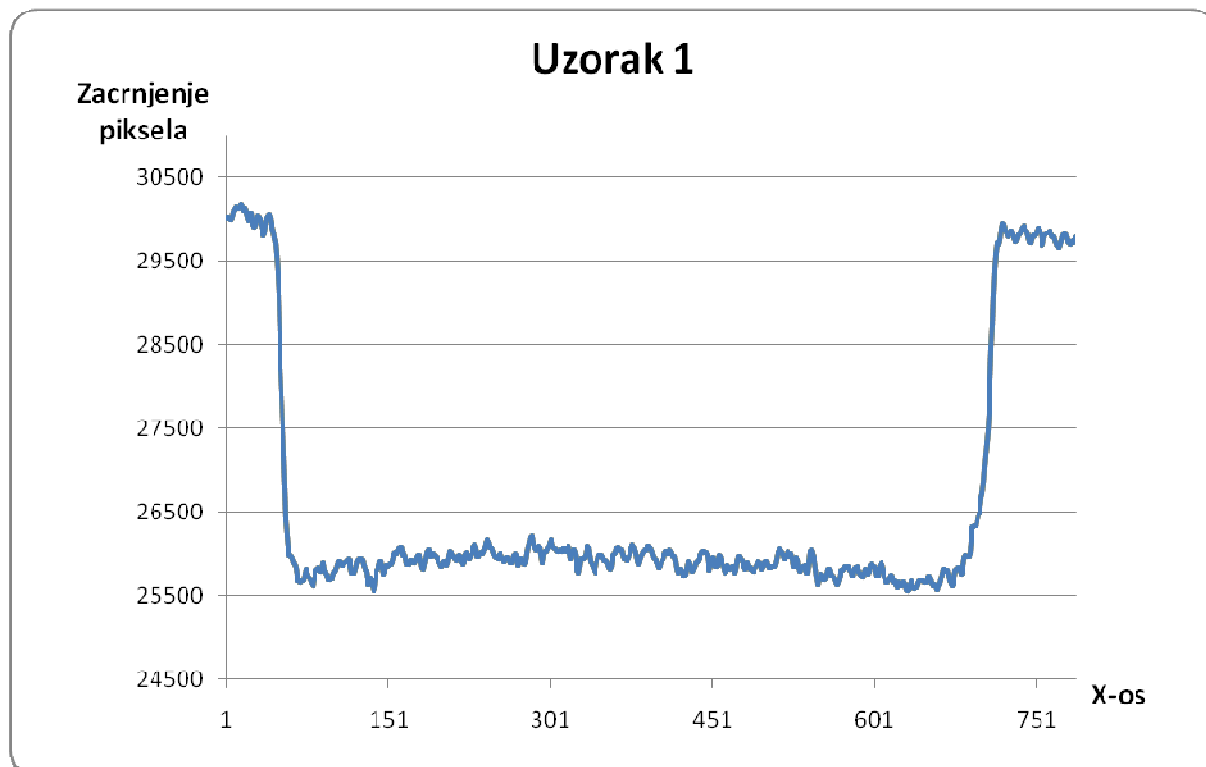


Slika 32. Radiogram uzorka 1



Slika 33. Profilirani radiogram uzorka 1





Slika 34. Graf snimanja uzorka 1

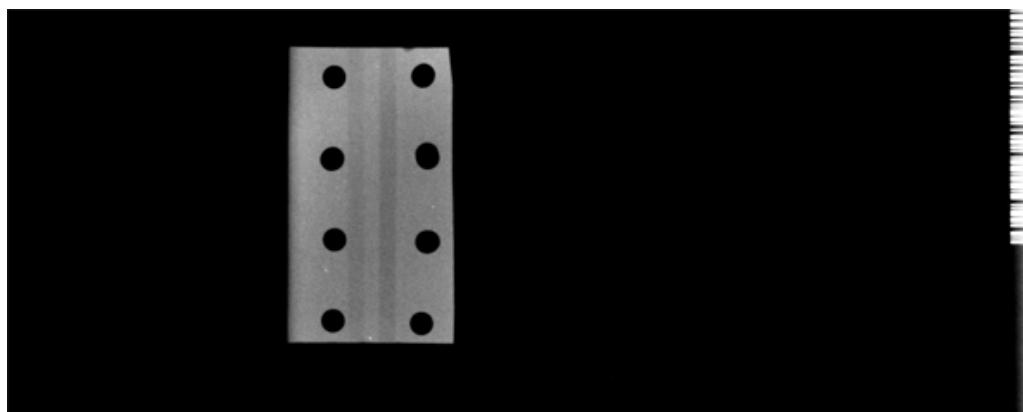
Kako je iz grafa jasno da nema nekog područja koje bi se moglo razlikovati od šuma nije imalo smisla provoditi osrednjavanje nad područjima te ovdje nije provedeno.

### Snimanje uzorka 2

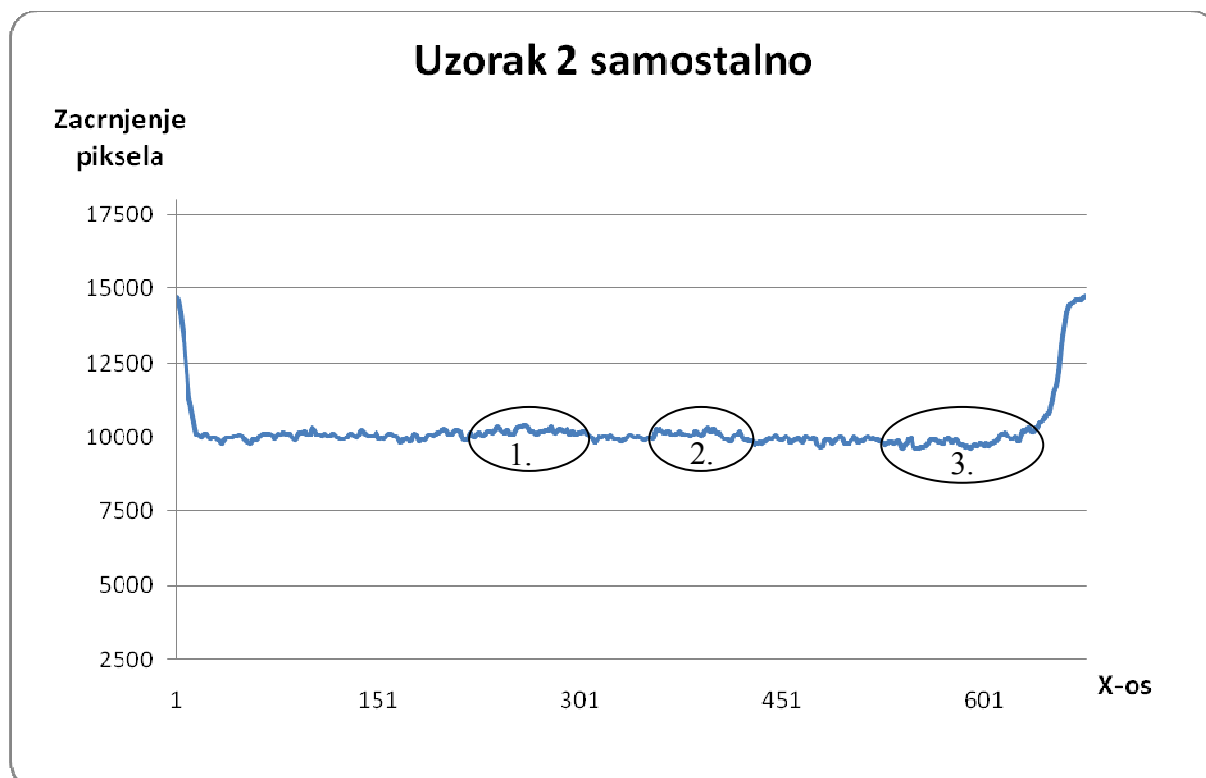
Ponovno je provedeno snimanje prema istom postupku, prvo sa samostalim uzorkom 2, da se utvrdi vidljivost na radiogramu. Već nakon prvog snimanja su na uzorku 2 vizualno uočena izrađena oštećenja, što su potvrđivali i podatci te iscertani graf koji prikazuje slika 36. Na njemu se moglo uočiti 2 područja koja u manjoj mjeri, ali ipak vidljivo, odstupaju od ostatka površine te je nad tim područjima provedeno osrednjavanje vrijednosti kako bi se dobio za inženjersku praksu upotrebljiviji graf, prikazan slikom 36. Nakon toga je imalo smisla nastaviti snimanje te je uzorak montiran na ostatak L-profila ramenjače i snimanje je ponovljeno. Na tako napravljenim snimkama su se ponovno mogla uočiti oštećena područja, iako u manjoj mjeri i uz manju modifikaciju slike, no razlučivost na grafičkom prikazu je izostala, što se može uočiti na slici 37 gdje se vidi da više nije moguće razlikovati oštećena područja od ravne površine, podatci su se izgubili u količini šuma uslijed više slojeva materijala.

Snimka	Materijal	Debljina	Osjetljivost	Napon	Struja	Ekspozicija	Tip filma
1.	Aluminij	6mm	25% 13.3%	80kV	4mA	45 sekundi	GPS Kodak
2.	Aluminij	12mm	12.5% 6.6%	80kV	4mA	45 sekundi	GPS Kodak

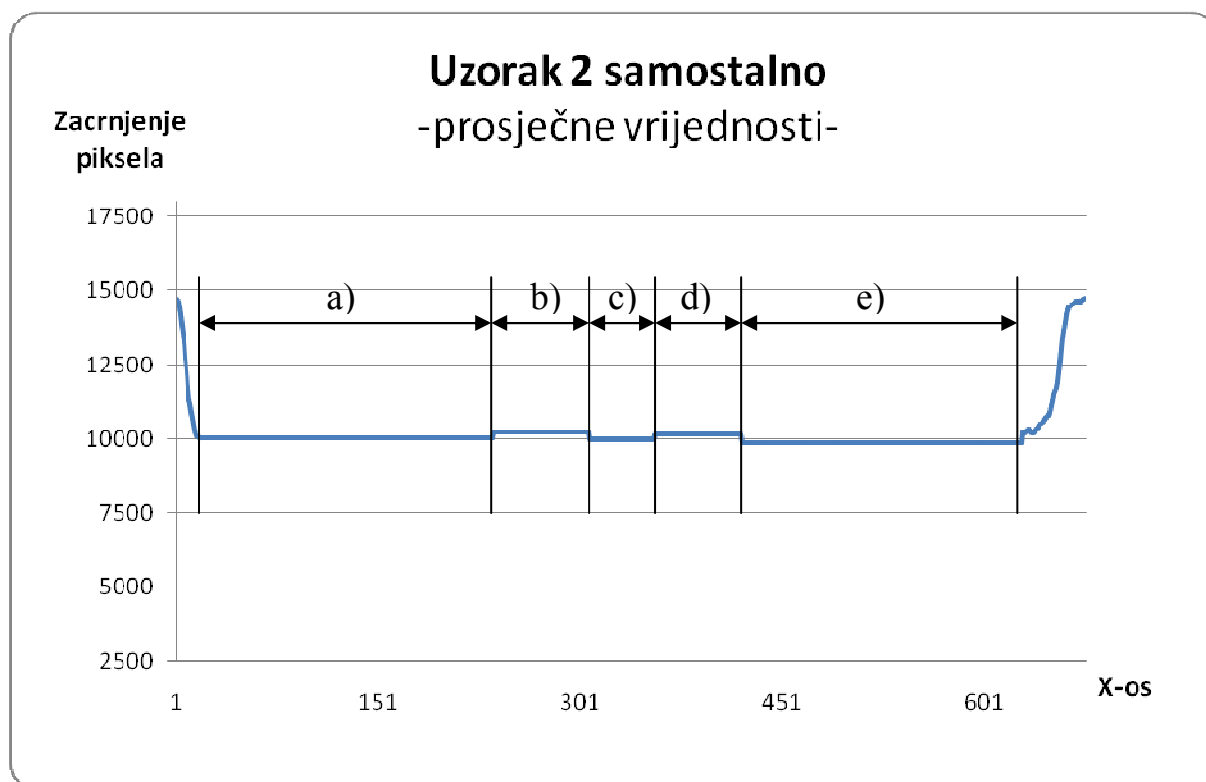
Tablica 4. Parametri snimanja uzorka 2



Slika 35. Radiogram uzorka 2



Slika 36. Graf snimanja uzorka 2 samostalno



Slika 37. Uprosječene vrijednosti grafa sa slike 36.

Na grafu na slici 36. se mogu uočiti 3 bitna područja koja odstupaju od šuma površine, označene brojačno 1, 2 i 3. Područja 1 i 2 su očito umjetno izrađeni utori dok je područje 3 nastalo zbog većeg sloja boje i prljavštine na površini. Takvo stanje površine je namjerno ostavljeno kako bi se uočio utjecaj na snimak.

Područje:	a)	b)	c)	d)	e)
Vrijednost zacrnjenja piksela	10045	10219	9974	10158	9860

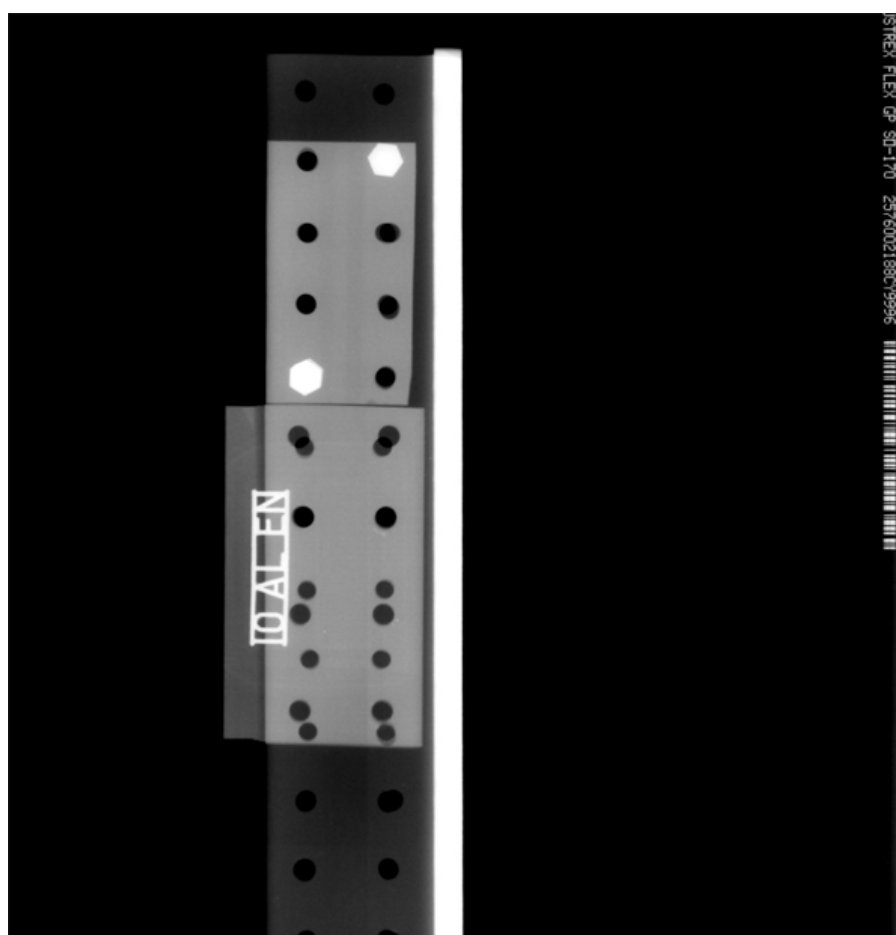
Tablica 5. Vrijednosti zacrnjenja piksela po područjima

Iz tablice 5. se vidi utjecaj prljavštine kao razlika područja a), c) i e), gdje područje a) predstavlja najčišću površinu.

Da bi se odredila kvaliteta snimljenih radiograma bilo je potrebno na snimke staviti indikatore kvalitete slike, što je i napravljeno na sklopnoj snimci. Indikator na raspolaganju za Aluminij je bio set s premalim dimenzijama za trenutne potrebe te se žičice nisu uspjele registrirati na snimku. Promjer najveće žice je bio 0.4mm, dok je najbliže snimano oštećenje 0.8mm.



Slika 38. Uzorak 2 u sklopu s L-profilom + indikator



Slika 39. Radiogram uzorka 2 u sklopu s L-profilom + indikator

Na radiogramu na slici 39. se pažljivom opservacijom mogu uočiti izrađene brazde na uzorku 2 u gornjem dijelu slike no ono što je značajno je kvantitativni prikaz ove snimke, a on je dan na slici 40.



Slika 40. Graf snimanja uzorka 2 u sklopu s L-profilom

Iz grafa nije moguće zaključiti koja su područja stvarno izdignuta ak koja su udubljena, šum je takav da su podatci nekonzistentni po X-osi. Neki napredni računalni algoritam bi mogao iz seta ovakvih podataka doći do prikaza koji se vidi na radiogramu no to je problematika za matematičare.

## 5. Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja dolazi se do zaključka da je oprema koja je bila na raspolaganju presnažna za ispitivanje u zrakoplovstvu zbog pretežno aluminijskih dijelova koji se ispituju te je potrebno imati na raspolaganju generator X-zraka sa znatno manjim rasponom voltaže.

Unatoč nemogućnosti da se radiografskom metodom približimo osjetljivosti od 2 % koliko propisuje industrijski standard zbog prejake opreme, provedena snimanja su iskorištena za kvantificiranje radiograma, na temelju čega se mogu provoditi daljnja ispitivanja. Ovu metodu moguće je automatizirati, što je veliki korak naprijed u radiografiji koja se od svog nastanka oslanjala isključivo na vizualni pregled snimljenog materijala i iskustvo ispitivača da ispravno protumači sadržaj radiograma.

Ukoliko metoda bude uspješno automatizirana i ispravljene početne greške moguće je ostvariti scenarij u kojem bi potpuno zdrav zrakoplov ulaskom u hangar za pregled bio u potpunosti snimljen i pregledan od strane računala koje bi nakon analize zaključilo da nema oštećenja i zrakoplov bi već nakon 7-8 sati mogao natrag u službu. Ako bi na zrakoplovu postojala oštećenja ona bi se potpuno dijagnosticirala već za nekoliko sati i ekipa za popravak bi mogla početi popravljati zrakoplov već isti dan. Time bi se uštedjeli značajni troškovi održavanja koji su u zrakoplovstvu veoma važna stavka u formiranju cijene prijevoza putnika i robe.

## 6. Literatura

- [1] Michael Chun-Yung Niu, Airframe Structural Design, Lockheed Aeronautical Systems Company, Burbank, California, Comilit Press LTD., 1989.
- [2] <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2007/aircraft.html>
- [3] Yushi Sun, Tianhe Ouyang, Jiadong Xu, Jie Long: Crack Detection in Aircraft Fastener Holes Using Flat Geometry Remote Field Eddy Current Technique and Super Sensitive Eddy Current System; Inovative Materials Testing Technologies Inc.
- [4] <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/communitycollege.htm>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Radiography>
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cobalt-60>
- [7] Bombardier Aerospace, Nondestructive testing manual, PSP 496, Part 1 – General
- [8] Handbook of Nondestructive Evaluation; Charles J. Hellier; McGraw-Hill Companies; 2003
- [9] <http://www.hologic.com/en/portable-x-ray/non-destructive-testing/>
- [10] [http://www.x-scan.dk/cms/Digital\\_X-ray\\_Inspection-11243.aspx](http://www.x-scan.dk/cms/Digital_X-ray_Inspection-11243.aspx)
- [11] Radiography in Modern Industry Kodak, Eastman Kodak Company Rochester, New York 14650, 4. izdanje, 1980.
- [12] Equine Radiography: Portable X-Ray Generators, Film-Screen Technology, and Tabletop Automatic Film Processors, Mauricio Solano, MV Diplomate ACVR
- [13] Real Time Radiography Course Booklet, National Science Foundation, 2001.
- [14] Rendulić M. Diplomski rad, FSB, 2010.