

# Usporedna analiza područja od interesa korištenjem računalne radiografije

---

**Gorup, Sven**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:235:413697>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Sven Gorup**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Sven Gorup  
0035186692

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Damiru Markučiću, dipl. ing. na stručnoj pomoći, savjetima i uputama za izradu rada i ostalim djelatnicima FSB-a u Zagrebu koji su doprinijeli u izradi rada. Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali kroz čitav studij.

Sven Gorup



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **SVEN GORUP** Mat. br.: 0035186692

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedna analiza područja od interesa korištenjem računalne radiografije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative analysis of regions of interest using computed radiography**

Opis zadatka:

Za razliku od konvencionalnog radiografskog ispitivanja različitih komponenti snimanjem na film, ispitivanje tehnikom industrijske računalne radiografije (CR - Computed Radiography) omogućava numeričku analizu digitalnih slikovnih zapisa radiograma.

Stoga računalna radiografija, neovisno o primarnoj zadaći pronalaženja nepravilnosti u materijalu ispitivanih komponenti, omogućava različite vidove analize značajki ispitivanih komponenti. U tu svrhu u radu je potrebno istražiti mogućnosti usporedne analize područja od interesa (ROI – Region of Interest) za dvije klipnjače u specifičnom volumenu ili vertikalnom presjeku u odnosu na radiografsko snimanje. Pri tome obratiti posebnu pozornost na:

1. Razlike u linearnim koeficijentima apsorpcije X-zraka za materijale odabranih uzoraka.
2. Razlike u geometriji uzoraka u odabranim područjima od interesa (ROI).
3. Odabir veličine područja od interesa (ROI) s obzirom na postignutu rezoluciju digitalnog radiograma i odnos signal/šum.
4. Utjecaj geometrije radiografskog snimanja na valjanost usporedbe u odabranim područjima od interesa (ROI).

Usporedbe područja od interesa (ROI) prikazati grafički te komentirati dobivene rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:  
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:  
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:

  
prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednica Povjerenstva:

  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	III
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
POPIS KRATICA .....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY .....	XI
1. UVOD .....	1
2. TEHNIKE NERAZORNIH ISPITIVANJA .....	3
2.1. XRF – fluorescencija X-zrakama.....	3
2.2. CR računalna radiografija .....	5
2.2.1. Stvaranje slike.....	6
2.2.2. Slikovne ploče (IP) .....	8
3. ISPITNI UZORCI.....	11
3.1. Karakteristike ispitnih uzoraka.....	15
4. EKSPERIMENTALNI RAD .....	21
4.1. Karakterizacija materijala XRF tehnikom.....	21
4.2. Analiza računalnom radiografijom.....	24
4.2.1. Prikaz i obrada slike.....	26
4.2.2. Kalibracija veličine piksela.....	27
4.2.3. Numerička analiza .....	30
4.2.3.1. Procjena debljine materijala klipnjača .....	31
4.2.3.2. Analiza kritičnih presjeka klipnjača.....	36
4.2.3.3. Određivanje mase i težišta uzoraka.....	47
5. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55
PRILOZI.....	57

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Karakteristike X i $\gamma$ zračenja [1].....	1
Slika 2.	Shema procesa ionizacije [1].....	3
Slika 3.	Shematski prikaz RTG cijevi [3].....	5
Slika 4.	Shema stvaranja slikovnog zapisa [5].....	6
Slika 5.	Shema skeniranja fotostimulirajućeg pohranjivog sloja fosfora [1].....	7
Slika 6.	Skener VMI 5100MS [6].....	8
Slika 7.	Presjek slikovne ploče (IP) [1].....	9
Slika 8.	Proces ponovne upotrebe slikovne ploče [1].....	10
Slika 9.	Ispitni uzorci.....	11
Slika 10.	Klipnjača sa svojim sastavnim dijelovima [7].....	12
Slika 11.	Konstruktivske razlike između klipnjače za serijski i trkaći motor [7].....	14
Slika 12.	Poznate dimenzije klipnjača.....	15
Slika 13.	Analizirani kritični presjeci klipnjača [7].....	16
Slika 14.	Klipnjača serijskog motora s I-profilom.....	19
Slika 15.	Klipnjača trkaćeg motora s H-profilom.....	20
Slika 16.	Postupak snimanja klipnjače XRF analizatorom.....	21
Slika 17.	Postupak prozračivanja RTG uređajem.....	25
Slika 18.	Radiogrami klipnjača.....	26
Slika 19.	Kalibracija veličine piksela pomoću čelične kuglice - „ISee!“.....	28
Slika 20.	Postavljanje dimenzija piksela - „ImageJ“.....	29
Slika 21.	Intenzitet piksela za 8-bitni i 16-bitni zapis [19].....	30
Slika 22.	ROI za debljinu klipnjače serijskog motora.....	32
Slika 23.	Ovisnost intenziteta piksela o debljini klipnjače serijskog motora i odgovarajućem regresijskom pravcu.....	33
Slika 24.	ROI za debljinu klipnjače trkaćeg motora.....	34
Slika 25.	Ovisnost intenziteta piksela o debljini klipnjače trkaćeg motora i odgovarajućem regresijskom pravcu.....	35
Slika 26.	Određivanje (x,y) koordinate središta velike glave klipnjače serijskog motora.....	36

---

Slika 27.	Određivanje (x,y) koordinate središta velike glave klipnjače trkaćeg motora .....	37
Slika 28.	Dijagrami postupaka dobivanja cjelovitog profila .....	38
Slika 29.	Kritični presjek I klipnjače serijskog motora.....	41
Slika 30.	Interaktivni 3D prikaz poluprofila kritičnog presjeka 1 klipnjače serijskog motora .....	42
Slika 31.	Kritični presjek I klipnjače trkaćeg motora .....	43
Slika 32.	Interaktivni 3D prikaz površine kritičnog presjeka 1 klipnjače trkaćeg motora .....	43
Slika 33.	Kritični presjek II klipnjače serijskog motora .....	45
Slika 34.	Kritični presjek II klipnjače trkaćeg motora .....	45
Slika 35.	Preklopni dijagram kritičnih presjeka I .....	46
Slika 36.	Prikaz područja od interesa za procjenu mase klipnjače .....	47
Slika 37.	Prikaz volumena piksela .....	48
Slika 38.	Određivanje (x,y) koordinate središta male glave klipnjače serijskog motora.....	49
Slika 39.	Točka težišta klipnjače serijskog motora dobivena numeričkom analizom radiograma .....	52
Slika 40.	Točka težišta klipnjače trkaćeg motora dobivena numeričkom analizom radiograma .....	53



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Uređaj OLYMPUS - The DELTA Professional [2] .....	4
Tablica 2. Parametri skeniranja .....	8
Tablica 3. Mase klipnjača izmjerene digitalnom vagom .....	20
Tablica 4. Ispis zaslona XRF analizatora .....	22
Tablica 5. Usporedba okvirnih mehaničkih svojstava procijenjenih materijala za pojedinu klipnjaču [15], [16], [17] .....	23
Tablica 6. Parametri eksponiranja .....	24
Tablica 7. Parametri skeniranja .....	24
Tablica 8. Izmjerene dimenzije klipnjače serijskog motora pomičnim mjerilom .....	32
Tablica 9. Izmjerene dimenzije klipnjače trkaćeg motora pomičnim mjerilom .....	35
Tablica 10. Karakteristike odabranih presjeka .....	39
Tablica 11. Usporedba karakteristike presjeka I .....	40
Tablica 12. Usporedba karakteristike presjeka II .....	44
Tablica 13. Rezultati numeričke analize mase i težišta uzoraka .....	50

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

1. Radiogram u tif formatu - 1000FF\_4mA\_175kV\_15min CROP - calibrate  
15mm
2. „Microsoft Office Excel“ datoteke s rezultatima mjerenja

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\gamma$		Gama zrake
X		X zrake
tif		eng. <i>Tagged Image File</i>
GV	GV	eng. <i>Grayvalue</i>
$R_{cm}$		centar mase tijela
$X_{cm}$	Mm	udaljenost centra mase od nulte točke
$m_i$	G	masa pojedinog "kvadra"
$x_i$	Mm	udaljenost centra mase pojedinog "kvadra" od nulte točke - rub klipnjače na velikoj glavi

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
ROI	<i>Region of interest</i> – područje od interesa
NDT	<i>Non destructive testing</i> – nerazorna ispitivanja
IP	<i>Imaging plate</i> - CR slikovna ploča
LOD	<i>Limit of Detection</i> - limit detekcije
PSL	<i>Photo-stimulable luminescence</i> - fotostimulirajuća luminiscencija
PSP	<i>Photo-stimulable phosphor</i> – fotostimulirajući sloj fosfora
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> – odnos signal / šum
GV	<i>Grayvalue</i> – vrijednost na skali tonova sive boje
GMT	Gornja mrtva točka klipnog mehanizma
DMT	Donja mrtva točka klipnog mehanizma
CR	<i>Computed Radiography</i> – računalna radiografija
XRF	<i>X ray fluorescence</i> – fluorescencija X-zrakama
PMT	<i>Photo multipliing tube</i>
PAR	<i>Pixel aspect ratio</i> – omjer dimenzija piksela
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
DTM	<i>Deutsche Tourenwagen Masters</i> – njemačko prvenstvo turističkih automobila
SDD	<i>Silicon drift detector</i> – silicijski detektor zračenja
PET	Polietilen

## SAŽETAK

Tema diplomskog rada je usporedna analiza područja od interesa (eng. *ROI – Region of interest*) korištenjem računalne radiografije na dvije komponente. Uspoređuju se dvije komponente (klipnjače) izrađene različitim proizvodnim postupcima iz različitih materijala, istih dimenzija kao jedinstvena komponenta strojnog mehanizma (motora s unutarnjim izgaranjem). Jedna je klipnjača serijske proizvodnje (I-profil) proizvedena lijevanjem, dok je druga klipnjača (H-profil) posebne izvedbe, namijenjene za ugradnju u trkaći motor automobila, koja radi poboljšanja performansi motora, ima manju i bolje raspodijeljenu masu, drugačiji poprečni presjek i proizvedena je postupkom kovanja koji daje bolja svojstva materijala.

Glavni zadatak je usporedna analiza osnovnih konstrukcijskih oblika, dimenzija i masa komponenata, usporedba profila tijela i kritičnih presjeka, kao i procjena centara masa svake klipnjače pomoću nerazornih metoda ispitivanja. Klasifikacija materijala svake komponente provedena je XRF analizom, a određene strukturne razlike u komponentama utvrđene su pomoću računalne radiografije (eng. *CR - Computed Radiography*) i relevantnih programskih paketa.

Ključne riječi: računalna radiografija, usporedna analiza, kontrola kvalitete, klipnjača

## **SUMMARY**

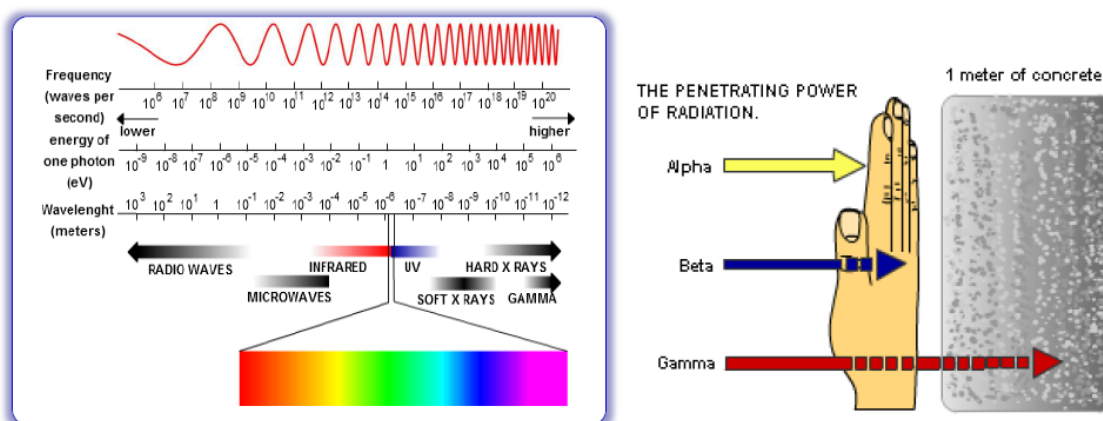
The topic of the thesis is a comparative analysis of regions of interest (ROI) using computed radiography. Comparison is performed on two samples of connecting rods made by different production processes from different materials, but with the same dimensions as a unique component of a machine mechanism (an internal combustion engine). Both components are designed for the same type of internal combustion engine. One is serial production connecting rod (I-beam) produced by die-cast. Another one is a racing connecting rod (H-beam) that, in order to improve the engine performance, has lower and better-distributed mass, different cross-section, and is produced in a process (forging) that gives higher material properties.

The main task has been to compare the basic construction shapes, dimensions, and masses of components, to do the comparison of body profiles and critical cross-sections as well as to define the center of mass of each connecting rod using non-destructive testing and control methods. The characterization of the materials of each component was performed by an XRF analyzer and certain structural differences in the components were determined with the computed radiography and accompanying software.

Keywords: computed radiography, comparative analysis, quality control, connecting rod

## 1. UVOD

Nerazorna ispitivanja (eng. *NDT - Non destructive testing*) vrlo su značajna za praćenje kvalitete tijekom proizvodnje u automobilskoj, petrokemijskoj, nuklearnoj i transportnoj industriji. NDT metode u proizvodnji omogućuju pregled zavara, odljevaka, otkivaka i strojno ili toplinski obrađenih komponenata. Inspekcija strojeva, uređaja i njihovih dijelova tijekom eksploatacije, koristi se za preventivno održavanje, analizu kvarova i njihovih posljedica koje možda nisu vidljive vizualnim pregledom. Detekcija nepravilnosti temelji se na određenom odzivu od nepravilnosti. Odziv materijala (strukture) ovisi o primijenjenom fizikalnom principu i ispitnim parametrima razlučivosti i osjetljivosti. Nerazorna ispitivanja mogu se primijeniti i u svrhu karakterizacije materijala. U eksperimentalnom dijelu rada koriste se radiografske metode ispitivanja, koje za prozračivanje predmeta tj. ispitne strukture koriste X i  $\gamma$  zračenje, čije su karakteristike prikazane na slici 1.



Slika 1. Karakteristike X i  $\gamma$  zračenja [1]

Korištene tehnike su XRF analiza kemijskog sastava i ispitivanja dimenzija, oblika, poprečnih presjeka pa i mase uzoraka, pomoću računalne radiografije. Usporedbom intenziteta dviju vrsta odziva (od nepravilnosti i od materijala) razmatra se odnos signal/šum eng. *Signal to Noise Ratio – SNR*. Za uspješniju detekciju, pojačanjem osjetljivosti istovremeno se povećava i odziv od nepravilnosti u obliku signala, ali i

odziv od materijala u obliku šuma. Rezultati snimanja tehnikom računalne radiografije prikazani su 2D slikovnim zapisima tif formata tj. radiogramima, dok se njihova obrada provodi pomoću programskih paketa „ISee!“ i „ImageJ“. Nakon izdvojenih područja od interesa intenzitetima piksela, podaci su obrađivani programskim paketom „Microsoft Excel“.

Pomoću navedenih programskih paketa, na ispitnim uzorcima napravljene su sljedeće radnje:

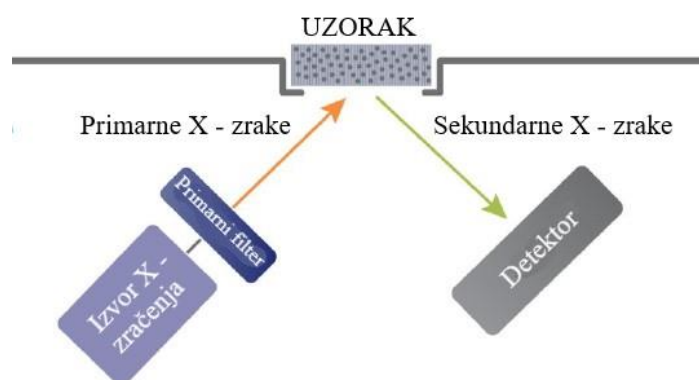
- Kalibracija veličine piksela pomoću čeličnih kuglica.
- Procjena debljine materijala komponenata.
- Usporedna analiza kritičnih presjeka ispitnih uzoraka.
- Određivanje mase i centra mase odnosno težišta uzoraka.



## 2. TEHNIKE NERAZORNIH ISPITIVANJA

### 2.1. XRF – fluorescencija X-zrakama

Osnovni proces, na temelju kojeg funkcionira nerazorna XRF tehnika jest izbijanje elektrona tj. ionizacija. Izbijanje elektrona nastaje samo ako je atom izložen zračenju, energijom koja je veća od njegovog ionizacijskog potencijala. Prozračene X-zrake dovoljnih su energija za izbijanje „čvrsto držećih” elektrona u unutarnjim orbitama atoma ispitivanog materijala. Shema procesa ionizacije prikazana je na slici 2.



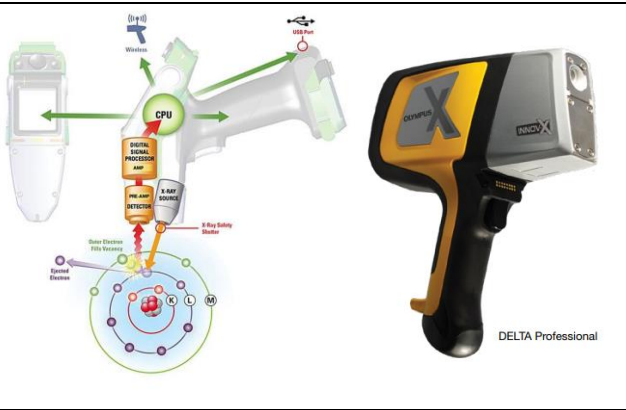
Slika 2. Shema procesa ionizacije [1]

U trenutku izlaganja predmeta primarnim X-zrakama, vanjski elektroni preskaču i popunjavaju praznine uz emisiju sekundarnih X-zraka tj. fotona nižih energija. Zračenje svjetlosti tijekom osvjetljivanja naziva se fluorescencija. Fluorescencija je emisija svjetlosti od molekula kemijskog spoja fluorofora koja je pobuđena svjetlošću s kraćom valnom duljinom od emitirane. Intenzitet fluorescencije je direktno proporcionalan broju „zarobljenih“ elektrona, a broj „zarobljenih“ elektrona je proporcionalan količini apsorbiranog zračenja u fosfornom sloju. Svaki kemijski element ima karakteristične energije orbita elektrona, prema kojima se određuje emisija fotona karakteristične energije. Fluorescentno zračenje može biti analizirano sortiranjem energija fotona (energetsko-disperzivna analiza), razdvajanjem valnih duljina zračenja (valno-disperzivna analiza) ili mjerenjem intenziteta svakog karakterističnog zračenja koje je izravno povezano s količinom svakog elementa u materijalu. Stoga, u ovom radu je korištena XRF tehnika koja ispituje uzorak mjerenjem intenziteta svakog

karakterističnog zračenja pojedinog kemijskog elementa u uzorku. Na temelju dobivenih rezultata dobivamo kvantitativnu kemijsku analizu ispitnog uzorka tj. kemijski sastav materijala.

Uređaj „DELTA Professional“ koji radi na principu XRF analize, korišten je pri ispitivanju kemijskog sastava uzoraka. Sadrži malu 40kV rendgensku cijev i silicijski detektor zračenja (SDD), specijalne filtre i optimizaciju s više snopova X-zraka. „DELTA Professional“ sadrži karakteristike kao što su brzina snimanja, limit detekcije LOD (eng. *Limit of Detection*) i raspon kemijskih elemenata, prikazane u tablici 1 [2].

**Tablica 1. Uređaj OLYMPUS - DELTA Professional [2]**

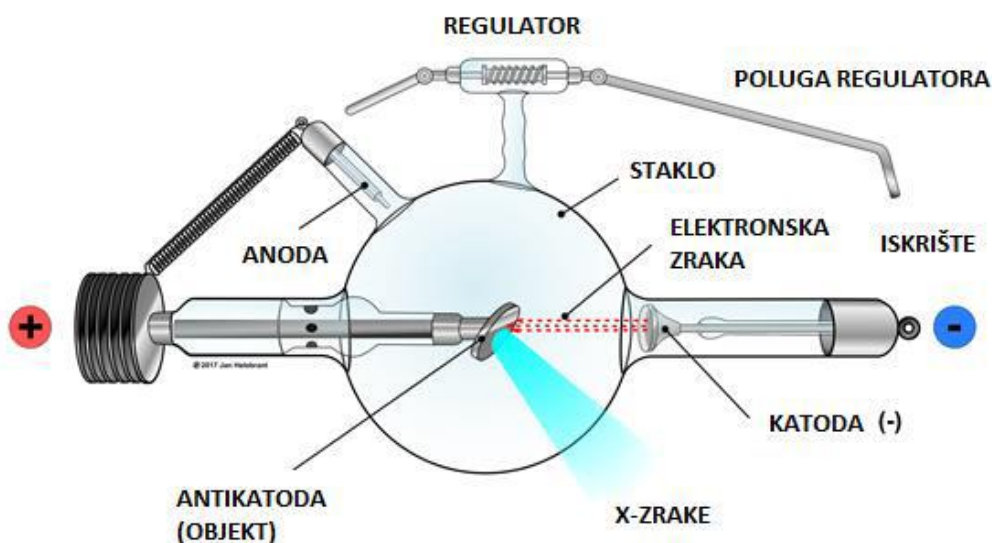
Specifikacije uređaja	
Masa:	1.5 kg bez baterije
Dimenzije:	260 × 240 × 90 mm
Izvor zračenja:	4 W Ag, Rh, Au, ili Ta anoda u RTG cijevi
Detektor:	Detektor zračenja (SDD)
Dozvoljena temperatura okoline:	-10 °C do 50 °C
Područje analize:	Legure i rude: Mg, Rh/Ag, Al, Ta/Au ; Tlo: P
Procesna elektronika :	530 MHz CPU s 128 MB RAM
Smart elektronika:	Barometar za korekciju atmosferskog tlaka pri mjerenju lakih elemenata
Baterija:	Punjiva Li-ion baterija; „Hot-swap“ zadržava analizator u radu pri zamjeni baterije
Zaslon:	32 bit QVGA rezolucija, zaslon osjetljiv na dodir; 57 × 73 mm
Memorija pohrane:	1 GB microSD™ (~75,000 čitanja)
Prijenos podataka:	USB

## 2.2. CR računalna radiografija

U ovom poglavlju detaljno je opisan radiografski sustav za snimanje u smislu osnovne fizike CR detektora i tehnologije potrebne za stvaranje slike računalnom radiografijom. Računalna radiografija koristi se u industriji već dugi niz godina za ispitivanja i mjerenja na temelju rendgenskih snimaka tzv. radiograma.

Akvizicija slike odnosi se na mehanizam interakcije rendgenskih zraka s fosforim slojem na slikovnoj ploči (IP – eng. *Imaging plate*) kako bi se stvorila latentna slika. Naknadnim skeniranjem slikovne ploče, latentna slika se osvjetljava laserskim snopom kako bi se fotostimulirajućom luminiscencijom (PSL) stvorila digitalna slika na zaslonu računala. Skeniranje slikovne ploče vrši se u skeneru i procesoru za obradu slikovnih ploča. Ovaj postupak očitavanja radiografske snimke sastoji se u osnovi od laserskog skeniranja, detekcije i pretvorbe fotostimulirajućom luminiscencijom te digitalizacije signala iz analogno-digitalnog ispravljača. Slikovna ploča se nakon dobivene digitalne slike na zaslonu računala, briše, i može se ponovno upotrijebiti za sljedeće ispitivanje [5].

Na slici 3 prikazana je shema RTG cijevi s njenim sastavnim dijelovima.



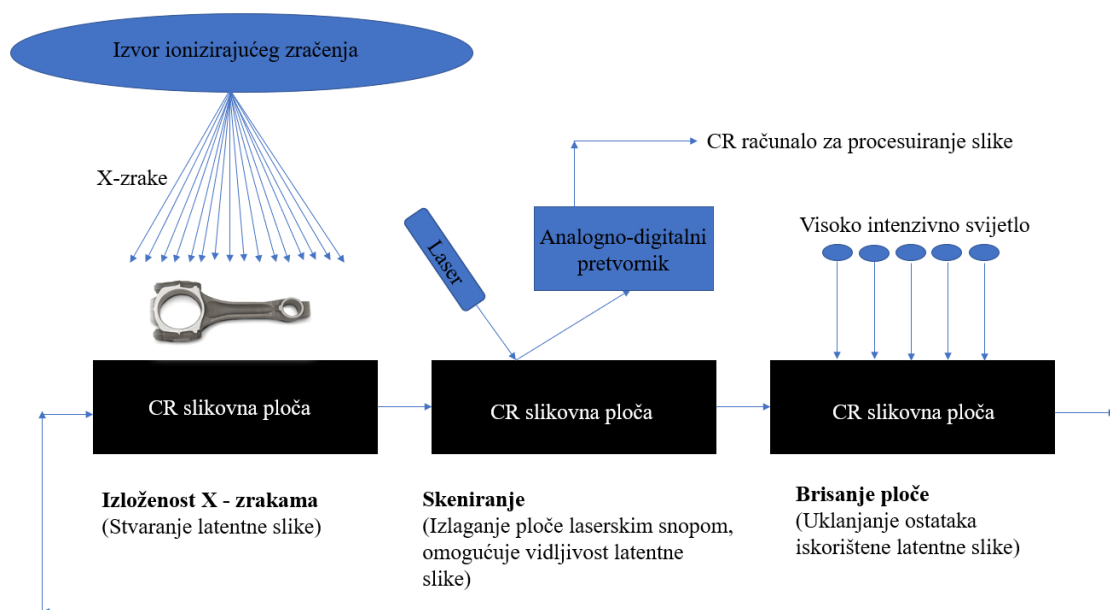
Slika 3. Shematski prikaz RTG cijevi [3]

### 2.2.1. Stvaranje slike

Ioni su atomi s manjkom ili viškom elektrona. Ionizirajuće zračenje je zračenje koje ima dovoljno energije da izbije elektrone iz atoma i tako proizvodi ione. Rendgenske (X) i gama ( $\gamma$ ) zrake oblici su ionizirajućeg zračenja. Ionizacija može pokrenuti kemijske procese, kao što je proces stvaranja fotografske rendgenske snimke [4].

Stvaranje slike odnosi se na izloženost slikovne ploče rendgenskom zračenju. Upravo zbog toga, tehničar mora obratiti pozornost na tehničke detalje, kao što su pozicioniranje, centriranje snopa rendgenskih zraka, odabir odgovarajuće slikovne ploče te ispravni tehnički parametri radiografske izloženosti:

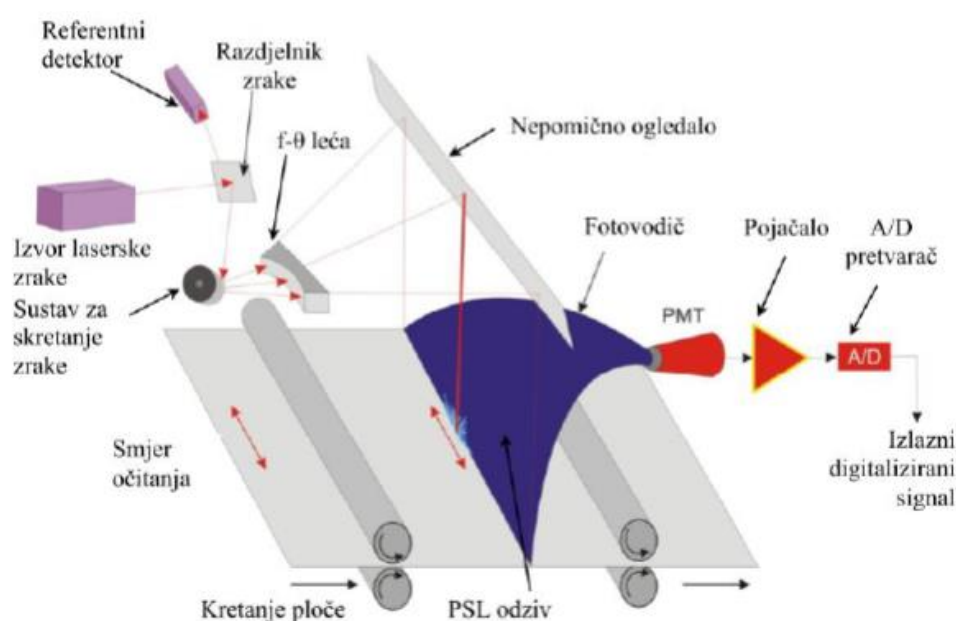
- Napon: [kV]
- Jakost struje: [mA]
- Vrijeme izloženosti: [s]



**Slika 4. Shema stvaranja slikovnog zapisa računalnom radiografijom [5]**

Postupak snimanja računalnom radiografijom, sastoji se od procesa stvaranja slike u tri koraka, kao što je prikazano na slici 4. Predmet koji je postavljen na slikovnu ploču je izložen ionizirajućem zračenju iz RTG cijevi. Slikovna ploča sastoji se od fotostimulirajućeg sloja fosfora za pohranjivanje (PSP). Ako je slikovna ploča izložena

rendgenskom zračenju, ima svojstvo stvaranja i pohranjivanja latentne slike. Da bi latentna slika bila vidljiva, fotostimulirajući sloj fosfora mora biti skeniran tj. osvjetljen laserskim snopom određene valne duljine koji stvara luminiscenciju tj. svjetlost proporcionalnu pohranjenoj latentnoj slici. Nakon laserskog skeniranja, fotostimulirajući sloj fosfora (PSP) na slikovnoj ploči se briše, izlažući ploču svjetlosnom snopu visokog intenziteta kako bi se uklonilo bilo kakav trag preostale latentne slike. Ovaj je korak važan kako bi se slikovna ploča mogla ponovno koristiti za više rendgenskih ekspozicija [5].



**Slika 5. Shema skeniranja fotostimulirajućeg pohranjivog sloja fosfora [1]**

Uređaj kojim je skenirana rendgenska snimka na slikovnoj ploči je VMI 5100MS. Skener stvara radiograme tj. 16-bitne zapise pri razlučivosti od 50  $\mu\text{m}$ . VMI 5100MS može skenirati okrugle, kvadratne ili pravokutne slikovne ploče, bilo koje veličine do formata 43 x 80 cm. Sustav prema kojem radi skener daje potpunu zamjenu za snimke na filmovima i kemijsku obradu slike. Parametri koji određuju kvalitetu slike tj. skenera su veličina piksela koju može snimiti, jačina sive boje te brzina skeniranja. Parametri skeniranja prikazani su u tablici 2, dok je shema skeniranja prikazana na slici 5, a uređaj za skeniranje na slici 6.

**Tablica 2. Parametri skeniranja**

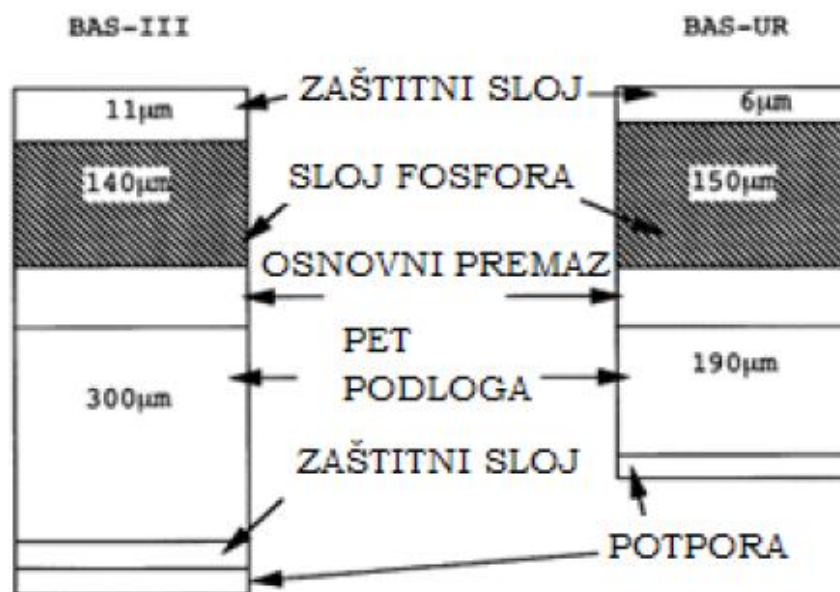
Parametar	Iznos
Rezolucija	50 $\mu\text{m}$
Snaga lasera P	15 J/m <sup>2</sup>
PMT	5,25 V

**Slika 6. Skener VMI 5100MS [6]**

### **2.2.2. Slikovne ploče (IP)**

Snimka izrađena računalnom radiografijom, pomoću slikovne ploče (IP), dobiva digitalni oblik na zaslonu računala. Presjek slikovne ploče koji prikazuje glavne strukturne slojeve prikazan je na slici 7. Osnovni bazni sloj slikovne ploče (IP) je fotostimulirajući fosforni sloj (PSP), a iznad i ispod njega, nalaze se zaštitni slojevi koji imaju više uloga u sustavu slikovne ploče. Gornji zaštitni sloj mora biti izveden tako da

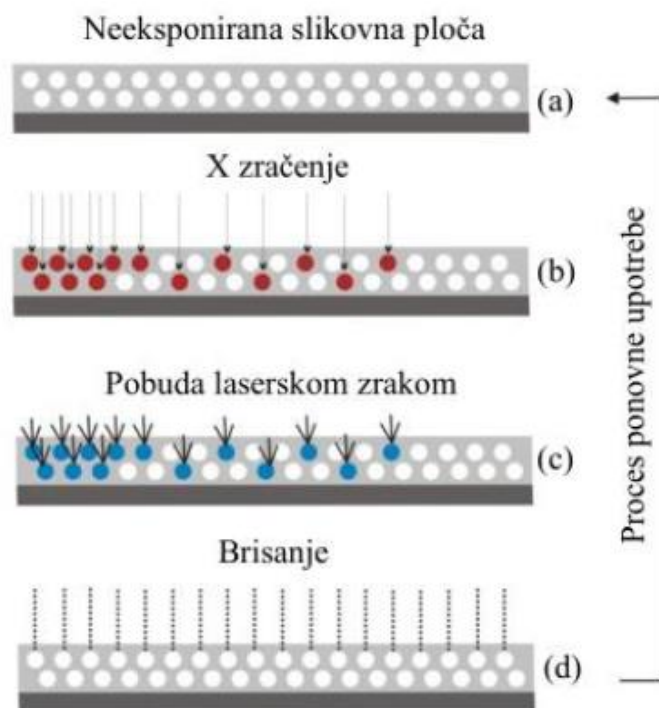
osigurava trajnost tijekom višestruke uporabe i sprječava mehanička oštećenja fotostimulirajućeg fosfornog sloja. Isto tako, gornji zaštitni sloj mora dopustiti da kroz njega prolazi svjetlost lasera i stimulirana svjetlost. Svrha osnovnog premaza je smanjiti probleme prilikom skeniranja slikovne ploče skenerom i probleme sa statičkim elektricitetom koji mogu pogoršati kvalitetu slike. PET podloga drži ostale slojeve slikovne ploče na okupu i pruža mehaničku čvrstoću ploče zajedno s potpornim slojem.



Slika 7. Presjek slikovne ploče (IP) [1]

Oštrina slikovnog zapisa ovisi o debljini fotostimulirajućeg fosfornog sloja na način da tanji fosforni sloj stvara manje bočno širenje laserskog svjetla. Slikovne ploče imaju manji kontrast od snimaka na radiografskom filmu koji se koristio kroz povijest. Za stvaranje 2D slikovnog zapisa korištene su slikovne ploče proizvođača „Carestream“. Korišteni model slikovne ploče „Carestream Industrex Flex, XL Blue“ s tankim slojem fotostimulirajućeg fosfora (PSP) koji stvara manje bočno širenje laserskog svjetla i daje veću oštrinu 2D slikovnog zapisa. Veličina korištene slikovne ploče je 25,4 cm x 30,48 cm.

Proces ponovne upotrebe prikazan je na slici 8.



Slika 8. Proces ponovne upotrebe slikovne ploče [1]



### 3. ISPITNI UZORCI

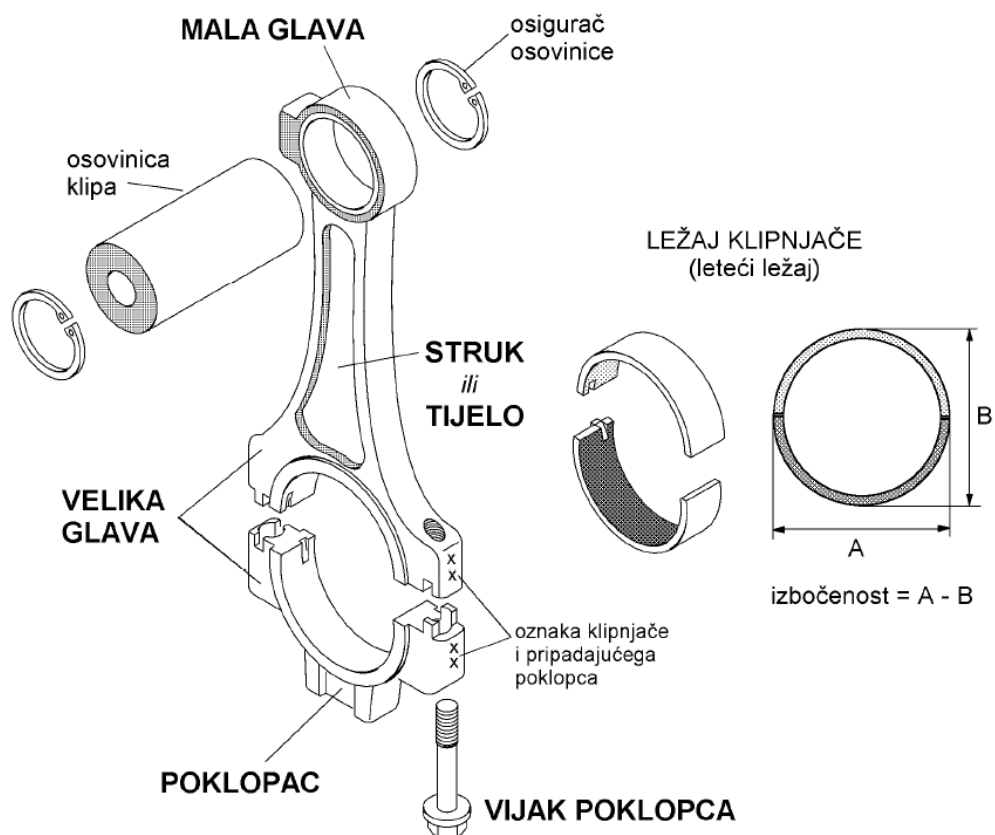
Predmeti mjerenja u ovom radu su dvije klipnjače, za primjenu u konstrukcijski istom motoru s unutarnjim izgaranjem, no izrađene su iz drugačijih materijala, različitim proizvodnim postupcima, te svaka ima različiti kemijski sastav i mehanička svojstva. Uzorci su prikazani na slici 9 zajedno s kalibracijskim kuglicama. Prvi uzorak (dolje) je klipnjača proizvedena lijevanjem u serijskoj proizvodnji jednog od najvećih proizvođača automobila. Drugi uzorak (gore) je klipnjača proizvedena kovanjem u ukovnju u maloj seriji, za primjenu u motorima trkaćih automobila, tzv. trkaćim motorima.



Slika 9. Ispitni uzorci

Osnovni razlog korištenja klipnjače motora trkaćeg automobila je njena manja masa, zbog koje će motor pri većim opterećenjima od onih koje je predvidio proizvođač motora, raditi s većom sigurnošću od pojave havarije tj. krhkog loma klipnjače. Trkaći motor je iz automobila marke Volkswagen, model Golf 1 GTI koji je potrebno pripremiti prema FIA dodatku K, pravilniku o tehničkim propisima za povijesne automobile. Budući da je tehničkim pravilnikom propisano da nije dozvoljena zamjena klipnjača serijskog motora, već samo naknadna obrada istih klipnjača, potrebno je pronaći način na koji se klipnjačama serijskog motora može smanjiti masa, a da se pritom ne ugrozi podnošenje većih opterećenja. Klipnjača trkaćeg motora osim što ima manju masu, izbalansiranija je i pri većoj brzini vrtnje mirnije radi s većom sigurnošću od krhkog loma klipnjače na nekom od kritičnih presjeka.

Klipnjača ili ojnica prenosi s klipa na koljenasto vratilo. Dijelovi klipnjače su mala i velika glava te struk ili tijelo koje ih spaja, a isti su prikazani na slici 10.



Slika 10. Klipnjača sa svojim sastavnim dijelovima [7]

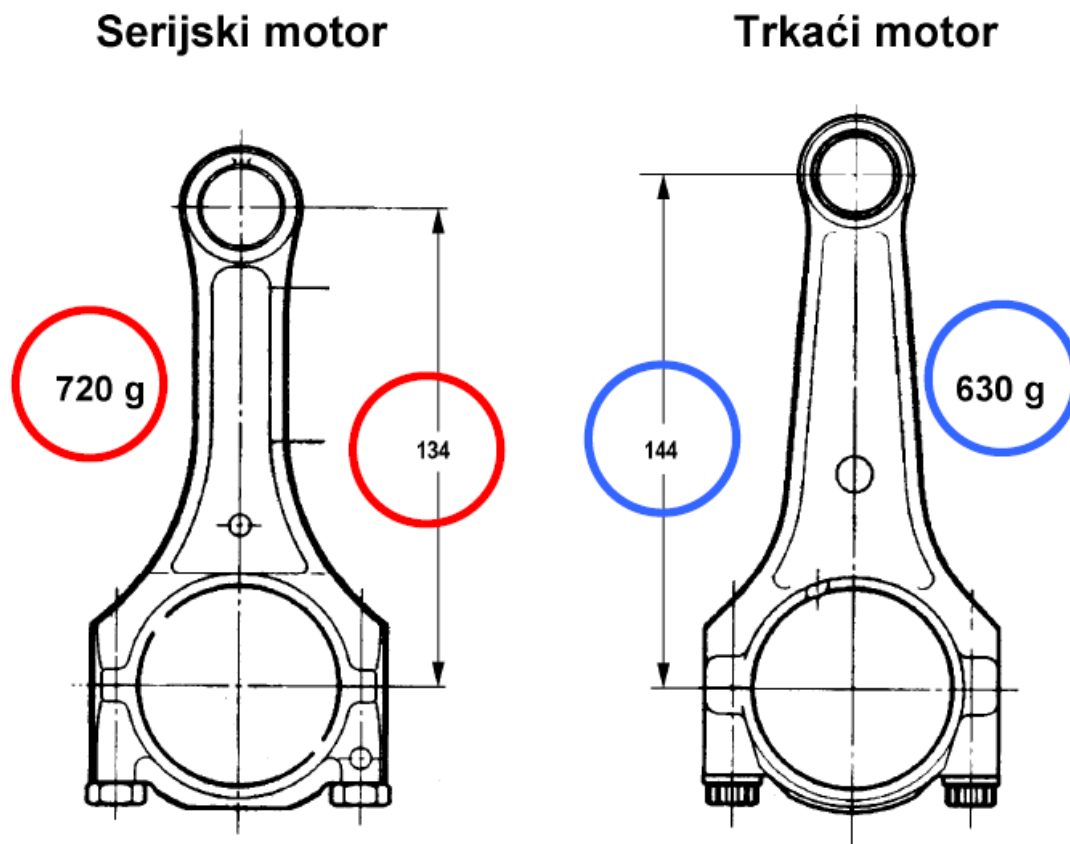
Klipnjača motora s unutarnjim izgaranjem bi trebala imati što manju masu, jer ako je njena masa veća, veće su i inercijske sile u motoru što nije povoljno za njegov rad pri većim opterećenjima i većim brzinama vrtnje. Međutim, klipnjača motora s unutarnjim izgaranjem mora biti i dovoljno kruta, da ne bi došlo do prevelikog tlaka “stiskanja” ležaja uslijed ovalnih deformacija velike i male glave. U slučaju da dođe do prevelikog tlaka “stiskanja” ležaja, moguće je zaribavanje hidrodinamičkog ležaja. Za postizanje potrebne krutosti, tijelo tj. struk klipnjače brzohodnih motora izrađuje se u obliku I-profila, dok je kod sporohodnih motora kružnoga poprečnog presjeka. Klipnjača s poklopcem je uobičajena kod četverotaktnih motora. Razdjelna ploha poklopca i tijela može biti okomita na horizontalnu os klipnjače, ili kosa. Dosjedne plohe tijela klipnjače i poklopca mogu biti ravne ili nazubljene [7].

Klipnjače koje su predmet ovoga rada imaju razdjelnu plohu poklopca i tijela, okomitu na horizontalnu os klipnjače, dok su im dosjedne plohe tijela klipnjače i poklopca ravne.

Načini izrade klipnjača su sljedeći:

- glodanjem iz trupca
- kovanjem
- lijevanjem
- sinteriranjem.

Materijali koji se koriste za izradu klipnjača su različiti, ovisno o namjeni motora. Za manju masu motora i automobila te manja opterećenja na klipnjače motora, one mogu biti izrađene čak i iz aluminijskih legura. Kod trkaćih motora se klipnjače izrađuju od titanija, čime se postiže značajno smanjenje mase u odnosu na druge materijale. Od lijevanih materijala najčešće se koriste nodularni i crni temper lijev. Kovanjem se klipnjača izrađuje u ukovnju iz mikrolegiranih čelika kao npr. 27MnSiVS6. Za visoko opterećene klipnjače koristi se čelik 34CrNiMo6V, koji uz toplinsku obradu odnosno poboljšavanje obradka dostiže vlačnu čvrstoću od 1200 MPa [7].



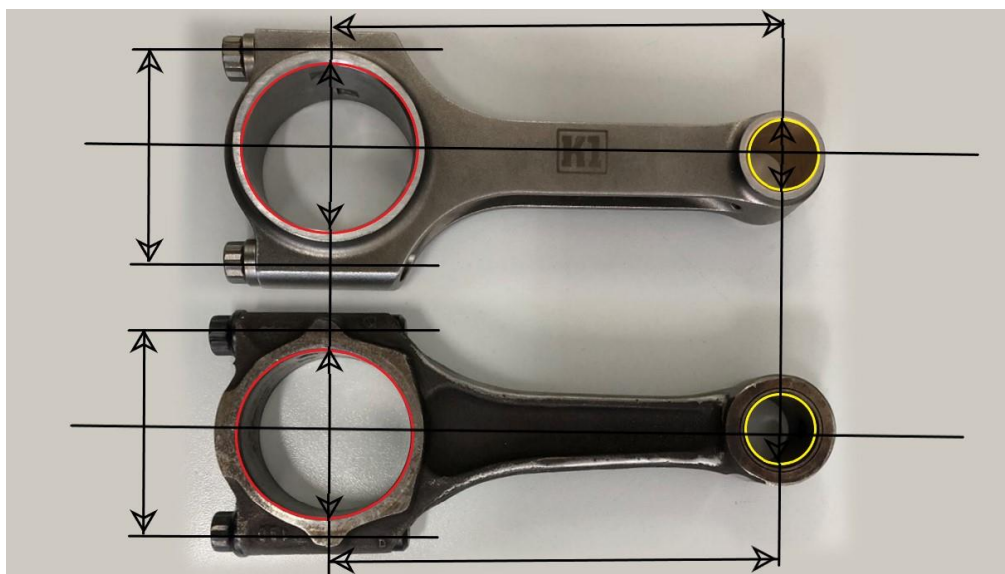
Slika 11. Konstruktivne razlike između klipnjače za serijski i trkaći motor [7]

Na slici 11 prikazana je usporedba klipnjače serijskog i trkaćeg motora (DTM, 1991.) automobila modela „Omega“, njemačkog proizvođača „Opel“. Zahvaljujući optimiranju oblika i boljem materijalu (kovani čelik 31CrMoV9) klipnjača namijenjena za trkaći motor ima manju masu unatoč većoj duljini između velike i male glave. Ako se koriste duže klipnjače s istim koljenastim vratilom tj. hodom klipa, smanjuje se bočno opterećenje klipova, što smanjuje trenje između klipa i cilindra. Također, duža klipnjača s istim hodom klipa u motoru povećava vrijeme zadržavanja klipa u GMT. Zadržavanje kompresije za pola stupnja okretanja radilice oko GMT, poboljšava učinkovitost izgaranja i proizvodi više snage iz smjese zraka i goriva. Motor s dužim klipnjačama proizvest će nešto više snage pri srednjoj do najveće brzine vrtnje motora [7].

Klipnjača serijskog i trkaćeg motora koje su predmet ovog rada, imaju jednake osnovne dimenzije, te je korišteno identično koljenasto vratilo, stoga je identičan i hod klipnog mehanizma.

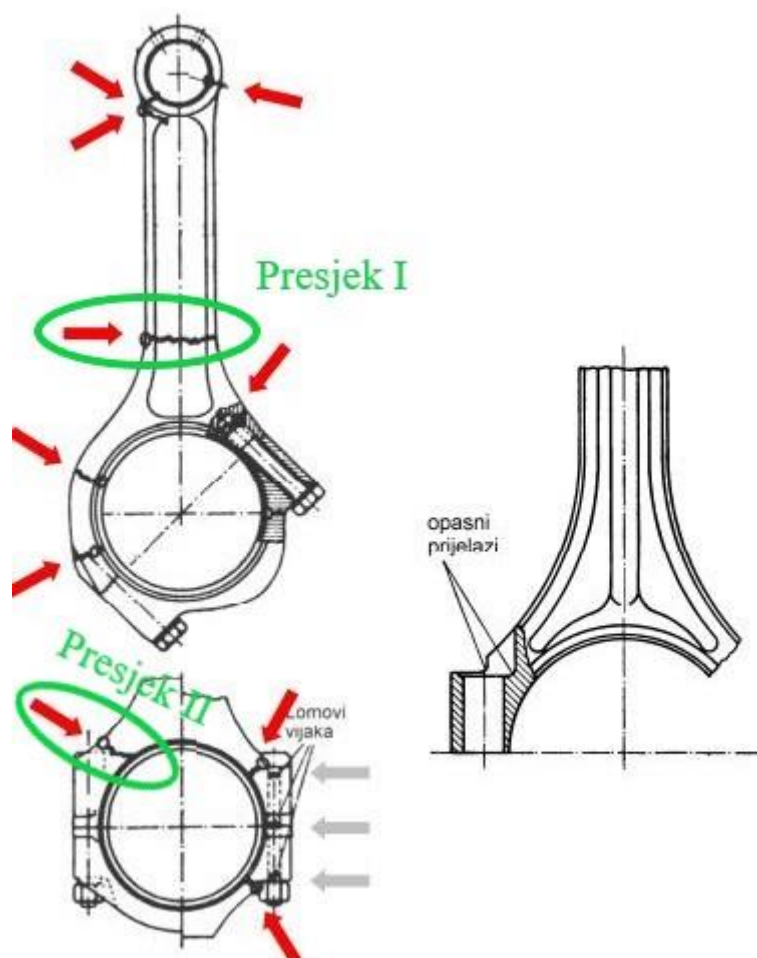
### 3.1. Karakteristike ispitnih uzoraka

Oba uzorka imaju iste dimenzije ležajnih mjesta (provrti) i razmaka između njih, stoga su uzorci analizirani kako bi se utvrdio profil tijela klipnjača, te za usporedbu njihovih kritičnih presjeka. Poznate dimenzije klipnjača prikazane su na slici 12. Budući da je točnost izrade ( $2,5 \mu\text{m}$ ) klipnjače motora trkačkog automobila veća nego što se na radiogramima može izmjeriti udaljenost između piksela ( $50\mu\text{m}$  - razlučivost radiograma), mjerenje dimenzija ne bi bilo dovoljno točno za dobivanje korisnih podataka. Stoga je mjerenje dimenzija na radiogramima korišteno samo za kalibraciju piksela. Nadalje, osim provjere dimenzija piksela na poznatim dimenzijama klipnjača, na uzorcima su ispitivani oblici i dimenzije poprečnih presjeka pa i mase uzoraka na temelju intenziteta piksela sadržanih u radiogramu. Pomoću intenziteta piksela tj. vrijednosti na skali tonova sive boje eng. *grayvalue* (*GV*) na relevantnim dijelovima klipnjača, procjenjivana je debljina materijala za obje klipnjače (stijenke). Kalibracijskim pravcima ostvarena je mogućnost mjerenja debljine materijala na svakom pikselu na kojem je prikazan materijal pojedine klipnjače (tamniji tonovi sive boje). Pomoću debljine materijala na svakom pojedinom pikselu koji sadrži intenzitete između [33 000-55 000], moguće je odrediti masu i težište uzoraka.



Slika 12. Poznate dimenzije klipnjača

Kritični presjeci strojnih elementa su mjesta na kojima su najveća naprezanja i najveće opasnosti od oštećenja. Nakon oštećenja klipnjače, daljnjim gibanjem klipnog mehanizma dolazi do havarije. U trenutku kada nastupa havarija uglavnom se dešava krhki lom klipnjače na nekom od njenih kritičnih presjeka, pa tijelo klipnjače probija blok motora. Kritična mjesta nalaze kod čvrstih spojeva, ležajnih mjesta i prijelaza debljine obratka. Kritični presjeci označeni zelenim krugovima sa slike 13 analizirani su pomoću programskih paketa „ISee!“, „ImageJ“ i „Microsoft Excel“.



**Slika 13. Analizirani kritični presjeci klipnjača [7]**

Poznati podaci o materijalu i proizvodnom postupku pojedine klipnjače su prikazani niže.

Za klipnjaču serijskog motora teško je odrediti točan materijal i proizvodni postupak iz kojeg je izrađena, jer je proizvedena 1980-ih godina. Na temelju literaturnih i iskustvenih podataka iz tog doba, te vizualnog pregleda klipnjače serijskog motora, pretpostavljeno je da je klipnjača serijskog motora izrađena iz Fe-lijeva, proizvodnim postupkom lijevanja u pješčani kalup.

Nodularni tj. žilavi lijev, koji je lijevan u pješčane kalupe, je u doba 1980-ih godina glasio kao najnovija korištena tehnologija za izradu klipnjača motora s unutarnjim izgaranjem. Klipnjače motora izrađene od nodularnog tj. žilavog lijeva imaju dobru obradljivost odvajanjem čestica. Klipnjače motora izrađene od željeznog tj. nodularnog lijeva imaju za nedostatak veliku masu u odnosu na klipnjače izrađene postupkom kovanja [8].

U studiji iz 1993. godine, uspoređivane su klipnjače motora s unutarnjim izgaranjem izrađene temper (kovkastim) lijevom i klipnjače motora s unutarnjim izgaranjem izrađene iz nodularnog (žilavog) lijeva. U ispitivanjima dinamičke izdržljivosti, klipnjače motora izrađene iz nodularnog lijeva pokazale su bolje rezultate od klipnjača motora koje su izrađene iz temper (kovkastog) lijeva [9].

Otpornost materijala prema pojavi umora materijala je mehaničko svojstvo koje se naziva dinamička izdržljivost materijala i ispituje se na uređajima koji primjenjuju promjenjivo opterećivanje strojnih dijelova, a nazivaju se pulzatori ili umaralice [10].

Ispitivanja dinamičke izdržljivosti, izvedena su kako bi izravno oponašala dinamička naprezanja klipnjače motora s unutarnjim izgaranjem.

Prosječni radni vijek klipnjače motora izrađene temper (kovkastim) lijevom koja je ispitana na umor materijala, bio je 764962 ciklusa s 50% ciklusa bez pojave loma na uzorku ili 347734 ciklusa s 90% ciklusa bez pojave loma na uzorku [9].

Prosječni radni vijek klipnjače motora izrađene od nodularnog (žilavog) lijeva, iznosio je 1605902 ciklusa s 50% ciklusa bez pojave loma na uzorku ili 635811 ciklusa s 90% ciklusa bez pojave loma na uzorku [9].

Razlog većeg radnog vijeka klipnjača motora izrađenih iz nodularnog lijeva je kuglasti (nodularni) oblik grafita koji je sadržan u njemu.

U temper (kovkastom) lijevu, čvorići se izlučuju nakon približno 24-satne toplinske obrade na 950 °C i uglavnom su neravnomjerno raspoređeni te prisutnost njihovih oštih rubova uzrokuje povećanje lokalnih naprezanja [9].

Kako kuglasti grafit relativno blago prekida metalnu osnovu, zato nodularni lijev ima znatno višu čvrstoću, istezanje i žilavost od sivog lijeva s listićavim grafitom.

Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev zamijenio je u mnogim aplikacijama sivi, čelični i temper lijev [11].

Uobičajeni primjeri primjene nodularnog (žilavog) lijeva su [11]:

- koljenaste i bregaste osovine motora
- košuljice cilindara motora i kompresora
- zupčanci
- poklopci kliznih ležaja.

Pješčani lijev postupak je lijevanja metala koji se karakterizira upotrebom pijeska kao kalupa. Preko 60% svih metalnih odljevaka proizvede se postupkom lijevanja pijeskom. Kalupi od pijeska relativno su jeftini i dovoljno vatrostalni, čak i za lijevanje čelika, a izrađuju se mješavinom pijeska i odgovarajućeg vezivnog sredstva (obično glina). Smjesa se vlaži, obično vodom, ali ponekad i drugim tvarima, kako bi se razvila čvrstoća i plastičnost gline i agregat učinio prikladnim za lijevanje u kalup [12].

Klipnjače trkaćeg motora su kovane i sačmarene radi poboljšanja otpornosti na umor materijala [13].

Klipnjača trkaćeg motora proizvedena je postupkom kovanja koji uključuje kalupe za klipnjače, veliki dovod topline i pritisak. Matrica je u osnovi negativ klipnjače, slična kalupu. Pripremljeni komad čelika zagrijava se na temperaturu na kojoj materijal postane savitljiv, a zatim se utiskuje u matricu pomoću visokog tlaka, što se često može biti učinjeno i udarcem čekića po poklopcu ukovnja. Metal poprima oblik sirove klipnjače, koja je zatim završno obrađena. Završna obrada uključuje rezanje i dimenzioniranje poklopca velike glave klipnjače te bušenje provrta s dosjedom za



hidrodinamički ležaj u velikoj glavi klipnjače. Za stezni spoj s čahurom u maloj glavi klipnjače, isto tako potrebno je bušenje provrta.

Klipnjače se također mogu popustiti, toplinskom obradom, te fino obraditi brušenjem do odgovarajuće ujednačenosti težine klipnjače koja je bitna pri njenom dinamičkom gibanju. Ujednačavanje zrnatosti strukture ključni je čimbenik čvrstoće kovanih klipnjača motora. Postupak vrućeg kovanja također komprimira i pravilno raspoređuje zrnatu strukturu metala, s ciljem povećanja čvrstoće. Kovani dio preša se na takav način da je zrnatost metala raspoređena onako da najbolje podnosi opterećenja kojima su klipnjače opterećene. Spiralni raspored zrna oko velike glave klipnjače dodatno povećava njenu ukupnu čvrstoću.



**Slika 14. Klipnjača serijskog motora s I-profilom**

Ovisno o vrsti čelika koji se koristi, klipnjače s I-profilom mogu podnijeti velika tlačna opterećenja, s dobrom vlačnom čvrstoćom i načelno imaju manju masu od klipnjača s H-profilom. Sposobnost klipnjače motora da podnosi tlačna i vlačna opterećenja ovisi o površini presjeka profila. Stoga klipnjače s I-profilom obično imaju veći presjek u kritičnim područjima kako bi se povećala čvrstoća [14].

Klipnjače motora s H-profilom, koriste potpuno drugačiju konstrukciju tijela klipnjače u svrhu povećanja krutosti i čvrstoće. Klipnjače s H-profilom imaju dvije velike, ravne stranice s tankim presjekom u sredini. Navedena konstrukcija profila čini ove klipnjače krućima i sposobnijima za podnošenje većih sila kompresije. Klipnjače motora s H-

profilom imaju jaču konstrukciju kad se uzme u obzir otpornost na savijanje, ali ih je kompliciranije odnosno skuplje proizvesti [14].



**Slika 15. Klipnjača trkaćeg motora s H-profilom**

Klipnjače motora s I-profilom je jednostavnije proizvesti, a u nekim slučajevima mogu imati i manju masu od klipnjača s H-profilom. Ako klipnjače imaju ostale karakteristike jednake, konstrukcija klipnjače s H-profilom je otpornija na sve vrste opterećenja.

Bez obzira da li klipnjače imaju I-profil vidljiv na slici 14 ili H-profil vidljiv na slici 15, ukupna čvrstoća i pouzdanost ovise o materijalu, masi i presjeku klipnjača [14].

**Tablica 3. Mase klipnjača izmjerene digitalnom vagom**

	Klipnjača serijskog motora	Klipnjača trkaćeg motora
Masa, $m$ , g	685	527

## 4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su sljedeća ispitivanja:

- Karakterizacija materijala XRF tehnikom.
- Kalibracija veličine piksela pomoću čeličnih kuglica.
- Procjena debljine materijala komponenata.
- Usporedna analiza kritičnih presjeka ispitnih uzoraka.
- Određivanje mase i centra mase odnosno težišta uzoraka.

Uz pomoć nerazornih metoda mjerenja, XRF tehnikom napravljena je okvirna karakterizacija materijala, dok su pomoću računalne radiografije izvedena ostala ispitivanja na ispitnim uzorcima.

### 4.1. Karakterizacija materijala XRF tehnikom

U prvom dijelu eksperimentalnog rada, korištena je XRF tehnika, pomoću koje je moguće analizirati elementarni kemijski sastav uzoraka. XRF metodom ne dobiva se informacija kako su kemijski elementi spajani, već samo kvantitativna klasifikacija kemijskih elemenata u analiziranom predmetu tj. sastav materijala. Kvalitativna i kvantitativna analiza usko su povezane jer se bez poznavanja kvalitativnog sastava ne može napraviti kvantitativna analiza.



**Slika 16. Postupak snimanja klipnjače XRF analizatorom**

Pri analiziranju klipnjače serijskog motora postojale su poteškoće pri očitavanju odziva kemijskih elemenata iz materijala iz više razloga. Poteškoće pri očitavanju odziva, proizlaze iz stanja površine klipnjače serijskog motora koja je proizvedena 1980-ih godina i korištena u eksploataciji više 30 godina. Na klipnjači serijskog motora vidljiv je crni sloj masti koji nije moguće očistiti kemijskim sredstvom, već je potrebno osigurati što čišću površinu kako bi XRF analizator bio prislonjen na čisti dio uzorka bez većih nečistoća.

Budući da XRF analizom na klipnjači serijskog motora, nije prepoznat niti jedan od poznatih materijala iz baze materijala, u tablici 4 je prikazan samo očitani kemijski sastav materijala. Kako klipnjača trkaćeg motora nije korištena u eksploataciji, te nema nikakvih oštećenja i većih površinskih nepravilnosti, XRF analizator je prepoznao čelik s američkim standardom AISI 4340, što odgovara ekvivalentnom niskolegiranoj kovanom čeliku s hrvatskom tj. europskom oznakom 34CrNiMo6. Naziv čelika prikazan je i američkim standardom iz razloga što XRF analizator prikazuje materijale tim standardom.

Nakon XRF analize, na zaslonu uređaja su prikazani kemijski sastavi pojedine klipnjače, vidljivi u tablici 4.

**Tablica 4. Kemijski sastavi očitani XRF analizatorom**

Klipnjača serijskog motora Očitani kemijski sastav nepoznatog željeznog lijeva				Klipnjača trkaćeg motora AISI 4340, EN 34CrNiMo6 Niskolegirani kovani čelik		
Element	%	+/-	Razlika	Element	%	+/-
Si	0,42	0,05	+ 0,04	Si	0,38	0,05
Cr	0,16	0,01	- 0,55	Cr	0,71	0,02
Mn	0,61	0,03	- 0,09	Mn	0,70	0,03
Fe	96,55	0,29	-	Fe	96,75	0,28
Mo	0,04	0,003	- 0,16	Mo	0,20	0,006
Cu	0,15	0,02	-	Ni	1,26	0,07
ostalo	2,07	0	-	ostalo	0	0
Σ elem.	100%	-	-	-	100 %	-

Pri usporedbi kemijskih sastava uzoraka, može se uočiti manji maseni udjel legiranih elemenata u materijalu iz kojeg je izrađena klipnjača serijskog motora. No, prema europskom standardu o definiciji i klasifikaciji razreda čelika EN-10020, čelik iz kojeg je proizvedena klipnjača serijskog motora ne sadrži dovoljne masene udjele legiranih elemenata, da bi bio klasificiran kao legirani čelik. Stoga je materijal klipnjače serijskog motora klasificiran u razred Fe-lijevova.

Vrstu Fe-lijeva klipnjače serijskog motora nije moguće točno utvrditi iz dobivenog kemijskog sastava iz razloga što XRF analizator ne prepoznaje kemijski element ugljik, stoga postotak ugljika može biti jedino procijenjen na temelju baze poznatih materijala koje sadrži XRF analizator.

Bez masenog udjela ugljika, koji je osnovna informacija pri odabiru željeznog materijala, nije moguće točno odrediti o kojem se Fe-lijevu u slučaju klipnjače serijskog motora, radi. Na temelju XRF analize, literature i iskustvenih podataka, klipnjača serijskog motora je vrlo vjerojatno izrađena iz nodularnog lijeva.

**Tablica 5. Usporedba okvirnih mehaničkih svojstava procijenjenih materijala za pojedinu klipnjaču [15], [16], [17]**

Svojstvo	Nodularni lijev	Kovani i poboljšani čelik EN 34CrNiMo6 AISI 4340
Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	550 - 670	850 - 1100
Modul elastičnosti $E$ , GPa	$\approx 180$	190 - 205

Iz tablice 5 može se uočiti kako su vlačna čvrstoća  $R_m$  i modul elastičnosti  $E$  niskolegiraniog kovanog čelika 34CrNiMo6 (klipnjača trkaćeg motora) većih iznosa u odnosu na nodularni lijev (klipnjača serijskog motora). Stoga klipnjača trkaćeg motora ima mogućnost podnošenja većih opterećenja uz veću krutost klipnog mehanizma. Nadalje, klipnjače trkaćeg motora u eksploataciji mogu prenositi veću snagu pri većoj brzini vrtnje motora bez pojave oštećenja ili krhkog loma.

Jedan od najpopularnijih materijala kod izbora materijala za radilice i klipnjače trkaćih motora s unutarnjim izgaranjem je niskolegirani kovani čelik s američkim standardom AISI 4340 čelika odnosno s europskom oznakom 34CrNiMo6 [17].

XRF analiza u ovom radu primijenjena je iz razloga okvirne karakterizacije materijala za pridobivanje informativnih podataka o udjelu kemijskih elemenata, za objektivniju podlogu pri daljnjoj radiografskoj analizi, s obzirom na princip prolaska zračenja i učina apsorpcije X-zračenja.

#### 4.2. Analiza računalnom radiografijom

U drugom dijelu eksperimentalnog dijela rada, tehnikom računalne radiografije ispitane su, klipnjača serijskog motora iz masovne proizvodnje i klipnjača trkaćeg motora izrađena u manjoj seriji za upotrebu samo u trkaćem motoru. Klipnjače su snimljene tj. ozračene uz pomoć RTG uređaja Balteau 300D (maksimalne snage 300 kV i jakosti struje 3-5 mA), a skeniranjem slikovnih ploča dobivaju se 2D slikovni zapisi u *tif* formatu eng. *Tagged Image File* koji su pomoću programskih paketa vidljivi na zaslonu računala. Parametri eksponiranja i skeniranja prikazani su u tablicama 6 i 7.

**Tablica 6. Parametri eksponiranja**

Parametar	Iznos
Napon RTG cijevi, kV	175
Struja eksponiranja, mA	4
Udaljenost između izvora zračenja i predmeta, mm	1000
Vrijeme eksponiranja, s	900
Veličina žarišta, mm <sup>2</sup>	2,2 mm x 2,2 mm

**Tablica 7. Parametri skeniranja**

Parametar	Iznos
Rezolucija, $\mu\text{m}$	50
Snaga lasera $P$ , J/m <sup>2</sup>	15
PMT, V	5,25



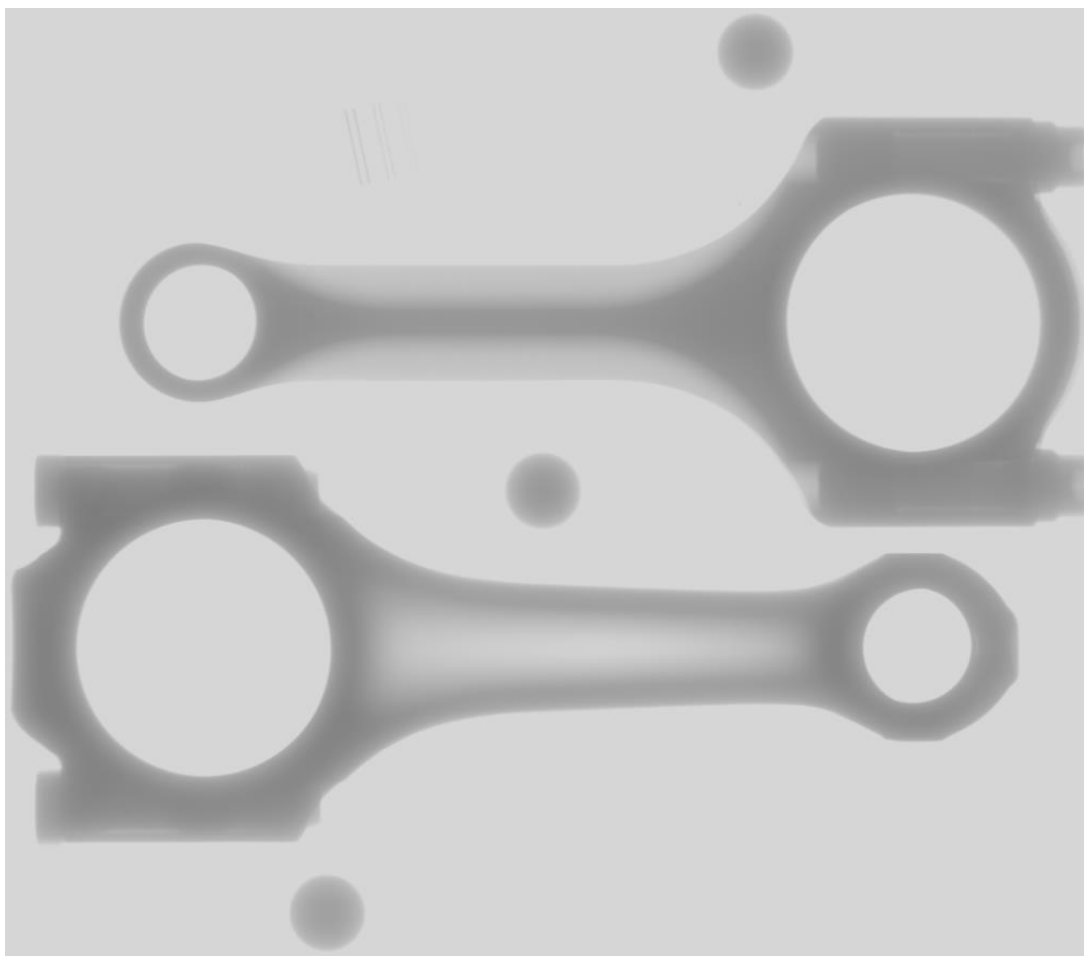
**Slika 17. Postupak prozračivanja RTG uređajem**

Kompozicija radiografskog snimanja prikazana je na slici 17.

Na računalu 2D slikovni zapis izgleda kao na slici 18. Kvaliteta slike bitna je radi što jasnijeg određivanja ruba komponenata, a na nju najviše utječe energija zračenja. Ostali čimbenici su kontrast koji ovisi o kontrastu predmeta i slikovnoj ploči, te neoštrina koja ovisi o veličini fokusa te udaljenostima između izvora zračenja, objekta i fosfornog sloja u slikovnoj ploči.

#### **4.2.1. Prikaz i obrada slike**

2D slikovni zapisi prikazuju se pomoću besplatnih programskih paketa „ISee!“ i „ImageJ“, u kojima se kasnije, objašnjenim koracima izdvajaju se područja od interesa (ROI) s intenzitetima piksela pomoću kojih su napravljene numeričke analize u programskom paketu „Microsoft Excel“. Na slici 18 prikazani su radiogrami komponenata na kojima su provedena sva ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada.



**Slika 18. Radiogram klipnjača**



Kvaliteta slike i sposobnost vizualizacije nepravilnosti više ovise o manipulaciji programskim paketima i obradi slike nakon što je snimljena, nego o prostornoj razlučivosti. Kvaliteta slike dobivena pomoću računalne radiografije djelomično ovisi o kvaliteti zaslona računala.

Prilikom mjerenja dimenzija u 2D slikovnim zapisima dobivenim tehnikom prisutni su brojni utjecaji na rezultate mjerenja. Značajan prinos pogreškama mjerenja predstavlja nepreciznost mjeritelja. U nepreciznost mjeritelja spadaju nepravilnosti kao npr. određivanje okomitosti mjenenog profila u odnosu na kursor, prilikom pomicanja kursora kod upotrebe opcije "ručnog mjerenja", određivanje početka i kraja mjenenog segmenta itd. Veliki utjecaj na točnost mjerenja pridonosi i neizoštrenost 2D slikovnog zapisa koja ovisi o veličini izvora zračenja, te udaljenostima od uzorka ili uzorka od slikovne ploče. Posljedice utjecaja neizoštrenosti slikovnog zapisa mogu se odraziti iz različitih pristupa prilikom kalibracije veličine piksela.

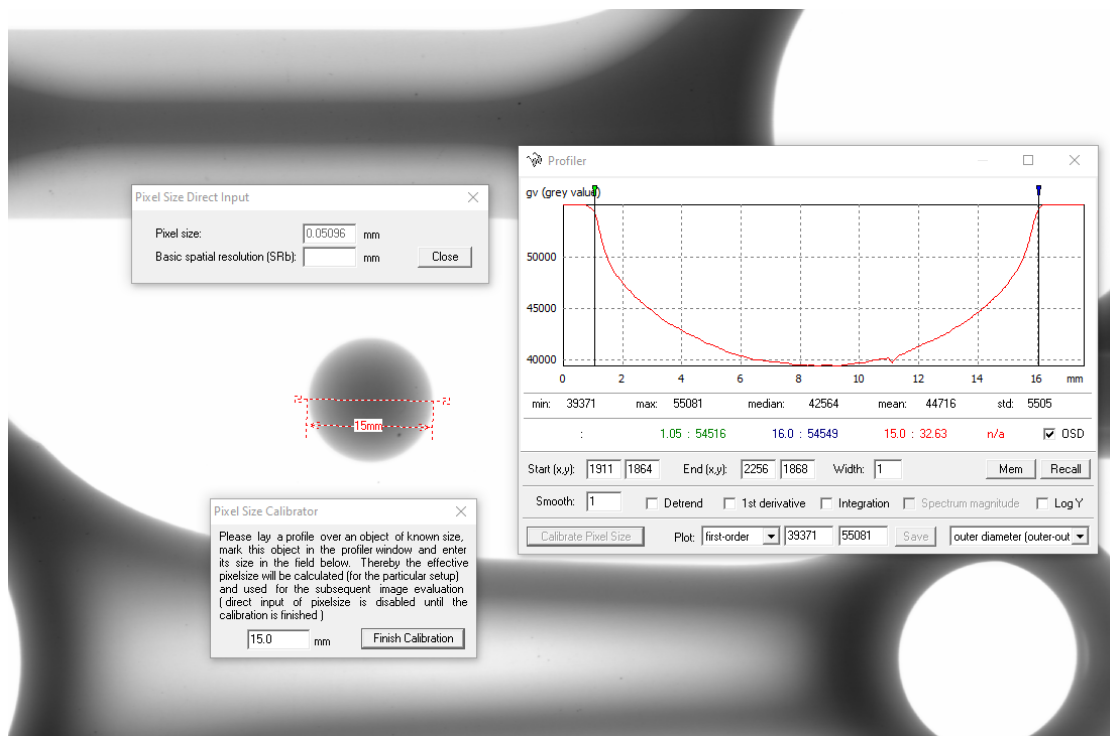
SNR eng. *Signal to Noise Ratio* tj. odnos signal-šum je postavljen za mjerenje u okomitom i vodoravnom smjeru. SNR se mjeri u liniji od 20 piksela, a kao medijan od 55 linija (prema EN 14784-1), pravokutnik od 20 x 55 piksela centriran je oko položaja kursora [18].

#### **4.2.2. Kalibracija veličine piksela**

Nakon obrade slike, radiograme je potrebno pripremiti za usporednu analizu i interpretaciju. Prije analize dimenzija i obrade radiograma, pomoću opcije eng. *Data to screen mapping*, izvedena je optimizacija kontrasta na pojedinom dijelu 2D slikovnog zapisa uzoraka za bolju preglednost i oštrinu rubova ispitnih uzoraka. Pomoću eng. *Profiler* moguće je dobiti uvid u intenzitete piksela i to ručnom metodom eng. *manual measurements* ili metodom prepoznavanja vanjskog ili unutarnjeg promjera eng. *outer/inner diameter*. Kalibraciju veličine piksela moguće je napraviti na više načina, no u ovom radu je kalibracija veličine provedena pomoću čeličnih kalibracijskih kuglica.

Profiler je postavljen preko promjera kuglice uz pomoću metode prepoznavanja vanjskog promjera eng. *outer diameter* te je u prozor eng. *Pixel Size Calculator* upisana vrijednost od 15 mm što je stvarni normirani promjer kuglice. Programski paket izračunava veličinu, odnosno  $x$  i  $y$  dimenzije piksela, s tim da su  $x$  i  $y$  koordinate su jednakih dimenzija.

Kalibracijom veličine piksela dobivena je vrijednost veličine piksela  $0,05096 \text{ mm} = 50,1 \text{ }\mu\text{m}$ , iz koje proizlazi i površina piksela od  $2510 \text{ }\mu\text{m}^2$ .



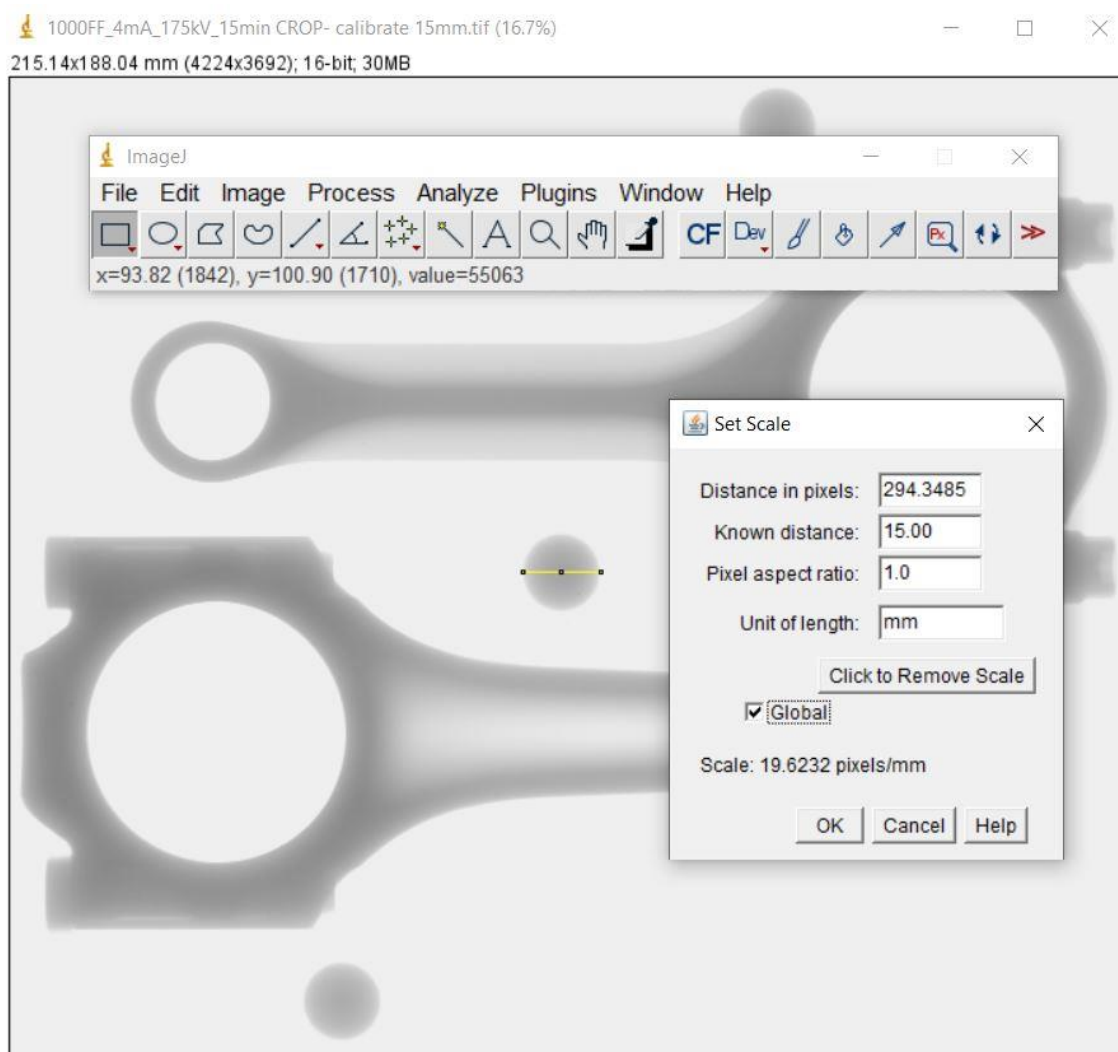
**Slika 19. Kalibracija veličine piksela pomoću čelične kuglice – „ISee!“**

Provrti u velikoj i maloj glavi te njihova međusobna udaljenost na obje klipnjače izrađeni s većom klasom točnosti (tolerancije  $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ ) od točnosti duljine između dva piksela ( $50,1 \text{ }\mu\text{m}$ ). Stoga se podaci o izmjenjenim dimenzijama ne mogu koristiti za točno i precizno mjerenje dimenzija, već mogu biti od svrhe prilikom procjenjivanja debljine komponente i ostalih vizualnih kontrola pri usporedbi uzoraka na radiogramu s relevantnim područjima od interesa (ROI) ispunjenim intenzitetima piksela.

Postupak mjerenja promjera kuglice tj. kalibracije veličine piksela u programskom paketu „ISee!“ prikazan je na slici 19.

Na slici 20 prikazan je postupak postavljanja dimenzija za daljnja mjerenja i obradu radiograma u programskom paketu „ImageJ“. Navedeni postupak napravljen je koristeći funkciju iz izbornika eng. *Analyze > Set Scale*. Kursorom je povučena linija preko

promjera središnje kuglice za kalibraciju, te su upisani poznati podaci koji su dobiveni kalibracijom veličine piksela pomoću čeličnih kuglica u programskom paketu „ISee!“.



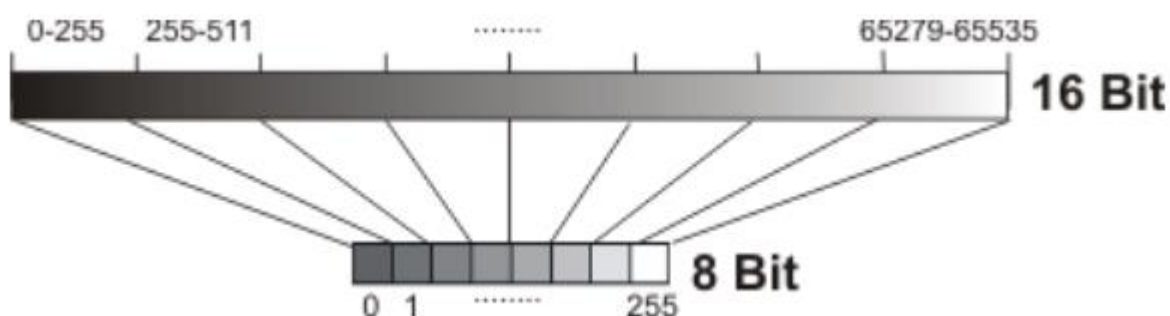
**Slika 20. Postavljanje dimenzija piksela - „ImageJ“**

Udaljenost u pikselima eng. *Distance in pixels* izračunata je kao  $15 \times 0,05\ 096$  što iznosi  $294,3485 \approx 294$  piksela, dok je promjer kuglice od 15 mm upisan u polje za poznatu udaljenost eng. *Known distance*. Omjer dimenzija piksela eng. *Pixel aspect ratio (PAR)* je 1 što ukazuje na iste dimenzije širine i dužine piksela. S navedenim koracima stvorena je skala za daljnja mjerenja i obradu radiograma koja mjeri 1 mm kao 19,6232 piksela tj. 20.

### 4.2.3. Numerička analiza

Numeričkom analizom 2D slikovnih zapisa u kojima je svaki intenzitet piksela odnosno ton sive boje pridružen određenoj brojki, 2D slikovni zapisi postaju 2,5D zapisi. Svaki intenzitet piksela (broj) se određenim postupcima može pridružiti određenoj debljini materijala tj. brojčanoj veličini koja određuje „treću“ dimenziju 2D zapisa.

Analiza profila odnosno vertikalnih presjeka napravljena je pomoću 16-bitnog raspona iznosa tona sive boje odnosno intenziteta piksela. Intenziteti piksela za 16-bitni 2D slikovni zapis sadržani su u brojčanom zapisu [0 - 65 535], za razliku od 8-bitnog zapisa koji ima raspon tonova sive boje od [0 - 255]. U oba slučaja 0 predstavlja crnu boju, dok za 8-bitni zapis broj 255 označava bijelu boju, a kod 16-bitnog zapisa broj 65 535 predstavlja bijelu boju. Ostale vrijednosti između ta dva broja (crno i bijelo) su intenziteti piksela vidljivi na slici 21.



Slika 21. Intenzitet piksela za 8-bitni i 16-bitni zapis [19]

Budući da su intenzitet piksela i vrijednost na skali tonova sive boje, komplementarne vrijednosti, intenzitet piksela od 65 534 (bijelo), može se prikazati i kao vrijednost 1 na skali tonova sive boje. Prema automatskim postavkama programskih paketa, „ISee!“ i „ImageJ“ sadržaj radiograma prikazan je u obliku intenziteta piksela.

Prvi korak pri numeričkoj analizi radiograma je procjena debljine materijala na određenoj klipnjači koja je izvedena pomoću kalibracijskih pravaca za svaku klipnjaču i prema, kojima su kasnije procjenjivane sve ostale promatrane debljine materijala pojedine klipnjače. Kalibracijski pravci pojedine klipnjače korišteni su pri analizi kritičnih presjeka klipnjača te pri određivanju mase i težišta klipnjača.

Podaci sadržani u radiogramu su obrađeni pomoću programskih paketa „ISee!“, „ImageJ“ i „Microsoft Excel“, a odabrani na sljedeći način. Pomoću pravokutnika iste širine, koristeći funkciju iz izbornika eng. *Edit > Selection > Add to Manager*, odabrani su presjeci na istim mjestima i udaljenostima na ispitnim uzorcima u obliku područja od interesa s intenzitetima piksela. Pomoću funkcije iz izbornika eng. *Image > Transform > Image to Results*, podaci o intenzitetu svakog pojedinog piksela koji je dio početno odabranog pravokutnika su kopirani i zalijepljeni u „Excel“ tablicu. Intenziteti piksela koji su dobiveni uprosječivanjem redova u odabranom području od interesa prikazuju poluprofile snimljenih klipnjača. Način i postupak pomoću kojeg su dobiveni cijeli profili u programskom paketu „Microsoft Excel“ objašnjeni su u poglavlju vezanom uz analizu kritičnih presjeka klipnjača.

Postupci i koraci određivanja mase i njezinog centra, pojedine klipnjače, razlikuju se od postupka pri analizi kritičnih presjeka te su objašnjeni u poglavlju koje se odnosi na određivanje mase i težišta uzoraka.

#### **4.2.3.1. Procjena debljine materijala klipnjača**

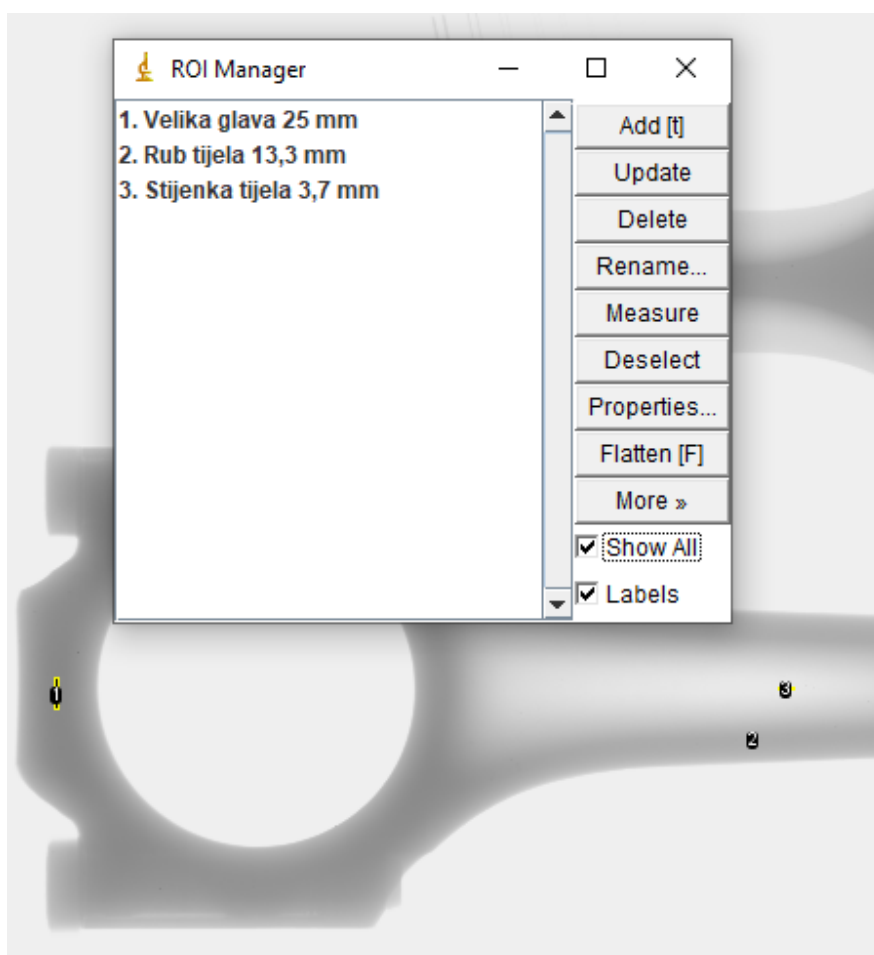
Odnos između količine zračenja i količine fotoluminescencije inducirane skeniranjem slikovne ploče, proporcionalan je intenzitetu zračenja koji doseže slikovna ploča u širokom rasponu nijansi sive boje i stoga je računalna radiografija prikladna za procjenu debljina uzoraka na temelju količine X ili  $\gamma$  zračenja koje je prošlo kroz materijal [20].

Budući da su materijali uzoraka različiti, tako su im različiti i linearni koeficijenti apsorpcije X-zraka. Stoga, izveden je po jedan kalibracijski pravac za svaki uzorak i prema njemu su kasnije procjenjivane ostale promatrane debljine materijala. Regresijski pravac koji je ujedno i kalibracijski pravac izveden je kao regresijski polinom prvog stupnja koji je dobiven procjenjivanjem pravca između tri poznate točke linearnom regresijom.

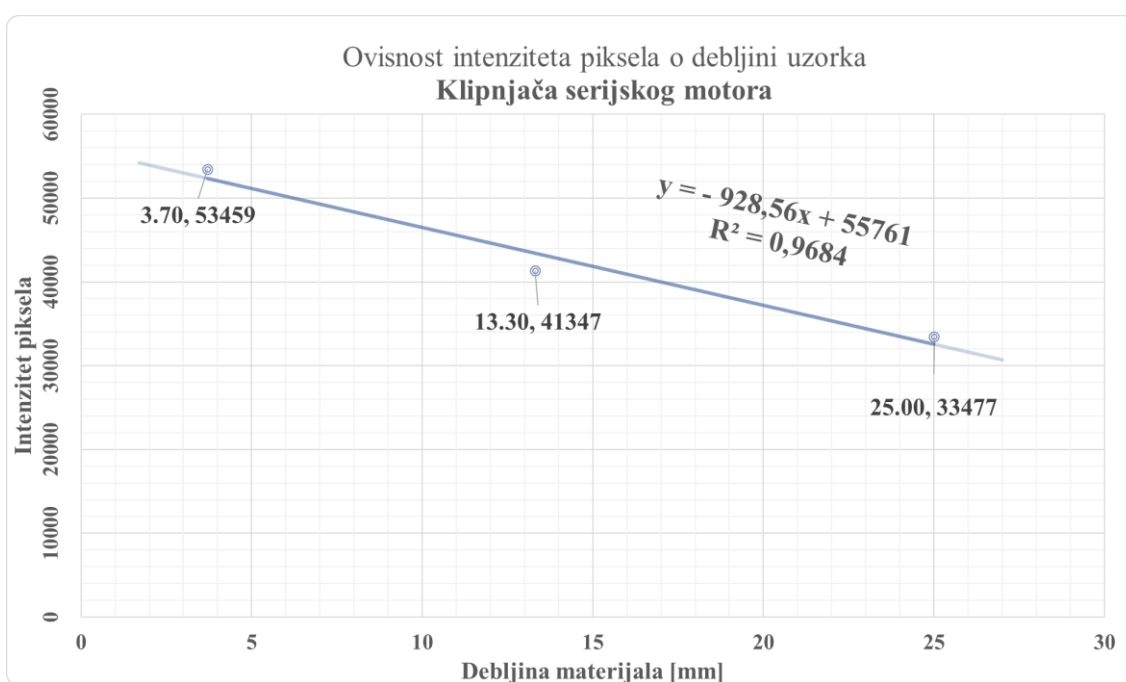
U istoj tablici prikazani su iznosi standardnih devijacija područja od interesa koji pokazuju kolika su odstupanja u intenzitetima piksela u odabranim područjima od interesa. Manji iznos standardne devijacije ukazuje na manji šum u odabranom području od interesa.

**Tablica 8. Izmjerene dimenzije klipnjače serijskog motora pomičnim mjerilom**

	Pozicija	Debljina dijela klipnjače, mm	Intenzitet piksela	Središte ROI (x,y)	Veličina ROI, broj piksela	STDEV ROI, GV
1.	Velika glava	25,00	33477	(X164,Y2489)	13 x 100	59,92
2.	Rub tijela	13,30	(X2310, Y2631)	16 x 32	122,36	
3.	Stijenka tijela	3,70	53459	(X2412,Y2472)	53 x 9	52,69

**Slika 22. ROI za debljinu klipnjače serijskog motora**

Standardna devijacija regresije pokazuje prosječno odstupanje stvarnih od regresijskih vrijednosti zavisne varijable te udio standardne greške regresije u aritmetičkoj sredini zavisne varijable. Procjenjivanjem pravca između poznatih točaka s intenzitetima piksela i debljinom materijala, dobiven je regresijski polinom prvog stupnja kao kalibracijski pravac prikazan na slici 23. Također uz regresijski polinom prvog stupnja prikazuje se i koeficijent determinancije koji je specifičan pokazatelj reprezentativnosti obavljene regresije. Model je reprezentativniji što je koeficijent determinancije bliži broju jedan.

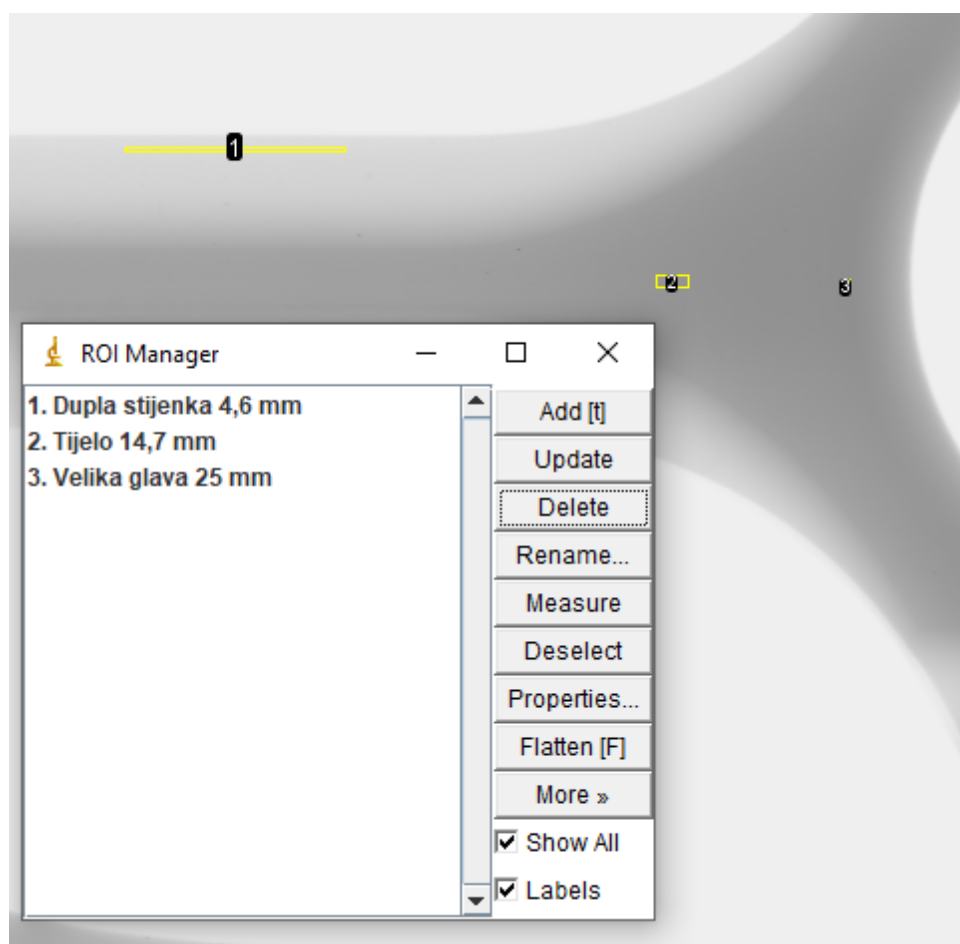


**Slika 23. Ovisnost intenziteta piksela o debljini klipnjače serijskog motora i odgovarajućem regresijskom pravcu**

Za klipnjaču serijskog motora izmjerene su debljine materijala na velikoj glavi, rubu tijela i stijenki tijela pomičnim mjerilom koje su prikazane u tablici 8. Intenziteti piksela na određenim pozicijama dobiveni su uprosječivanjem intenziteta piksela iz određenih područja od interesa eng. *ROI*, koji su također prikazani u tablici 8.

Koeficijent determinancije za procijenjeni kalibracijski pravac debljine klipnjače trkaćeg motora iznosi 96,84 %, što ukazuje na vrlo dobru procjenu kalibracijskog pravca.

Za klipnjaču trkaćeg motora, pomičnim mjerilom izmjerene su debljine materijala na velikoj glavi, sredini tijela i na dvostrukoj stijenki tijela na rubovima. Debljine materijala prikazane su u tablici 9 i na slici 24, te je procjenjivanjem poznatih točaka s intenzitetima piksela i debljinom materijala, dobiven polinom prvog stupnja kao kalibracijski pravac prikazan na slici 25.



**Slika 24. ROI za debljinu klipnjače trkaćeg motora**

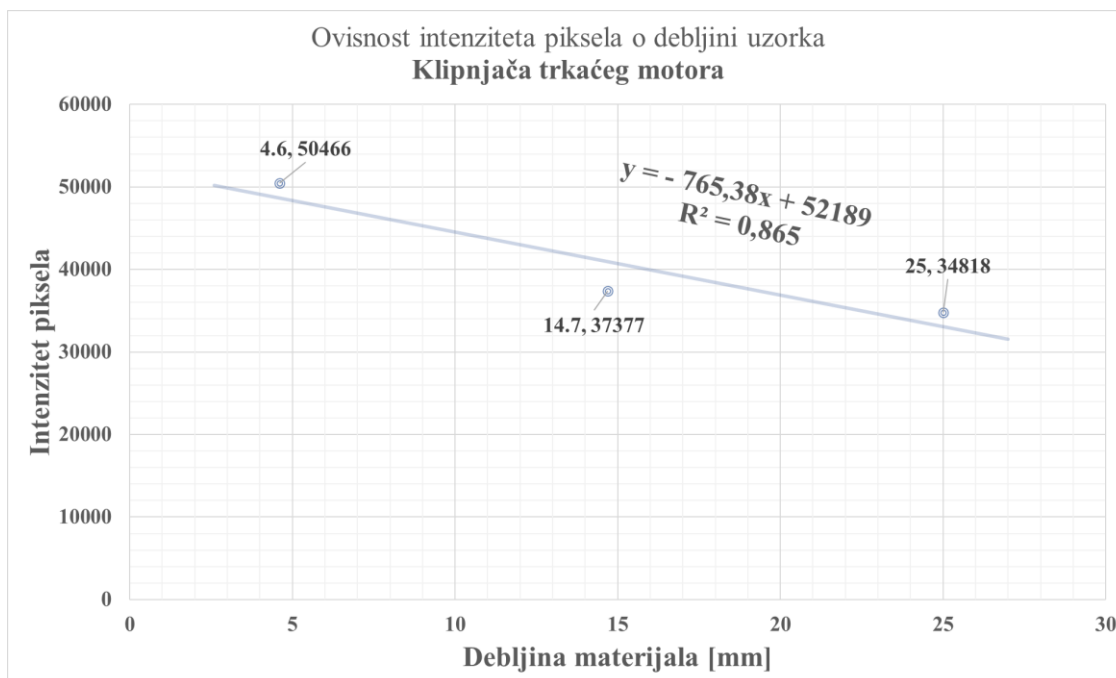
Pomoću podataka o intenzitetu piksela na relevantnim dijelovima (kritičnim presjecima) klipnjača dobivenih analiziranjem radiograma s programskim paketom „ImageJ“ te izmjerenih dimenzija pomičnim mjerilom, utvrđena je ovisnost intenziteta piksela o debljini čelika za primijenjeno rendgensko zračenje i korišteni sustav računalne radiografije. Za obradu podataka i iscrtavanje dijagrama korišten je programski paket „Microsoft Excel“. Budući da je na klipnjačama pomičnim mjerilom moguće izmjeriti samo 3 dimenzije, referentne točke ne leže na samom regresijskom pravcu vidljivom na



slici 25. Ta činjenica dokazuje moguća odstupanja pri računanju ostalih debljina materijala na temelju intenziteta piksela iz radiograma.

**Tablica 9. Izmjerene dimenzije klipnjače trkaćeg motora pomičnim mjerilom**

	Pozicija	Debljina dijela klipnjače, mm	Intenzitet piksela	Središte ROI (x,y)	Veličina ROI, broj piksela	STDEV ROI, GV
1.	Dupla stijenka	2 x 2,3 = 4,6	50466	(X2000,Y1023)	331 x 6	130,28
2.	Tijelo	14,7	37377	(X2658, Y1222)	49 x 19	112,567
3.	Velika glava	25	34818	(X2921,Y1230)	11 x 23	42,58

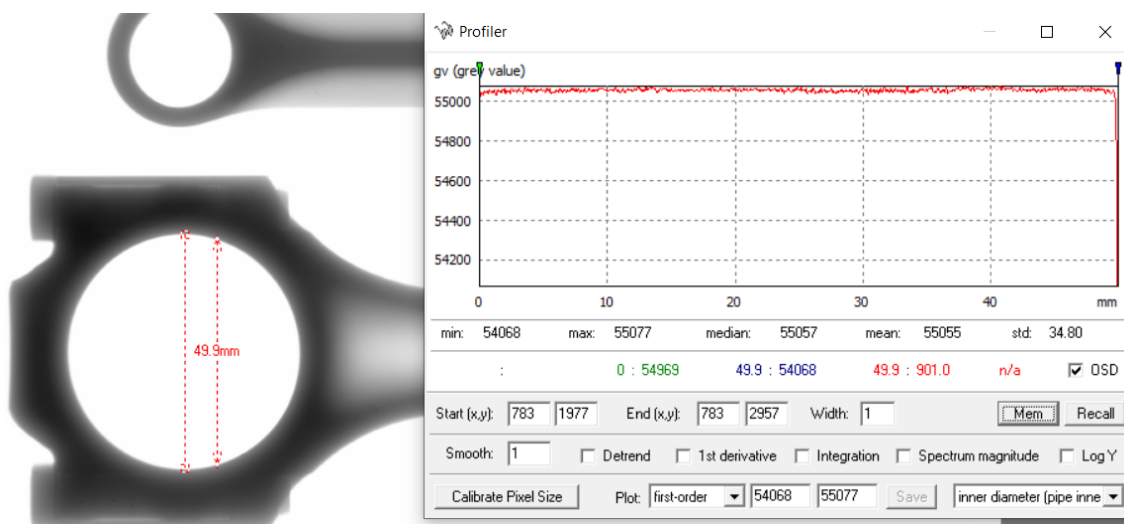


**Slika 25. Ovisnost intenziteta piksela o debljini klipnjače trkaćeg motora i odgovarajućem regresijskom pravcu**

Koeficijent determinancije za procijenjeni kalibracijski pravac za određivanje debljina materijala na klipnjači serijskog motora vidljiv na slici 25, a iznosi 86,5 %. S manjim koeficijentom determinancije može se uočiti nešto veća greška pri procjenjivanju kalibracijskog pravca za procjenu debljine materijala klipnjače trkaćeg motora. Točka koja vidljivo odskače od kalibracijskog pravca je točka na tijelu klipnjače trkaćeg motora. U navedenoj točki intenzitet piksela je nešto manji nego što bi trebao biti jer tijelo klipnjače ne dodiruje slikovnu ploču i duž tijela obje klipnjače postoji određeno geometrijsko uvećanje uzorka, pa tako i intenziteta piksela.

#### 4.2.3.2. Analiza kritičnih presjeka klipnjača

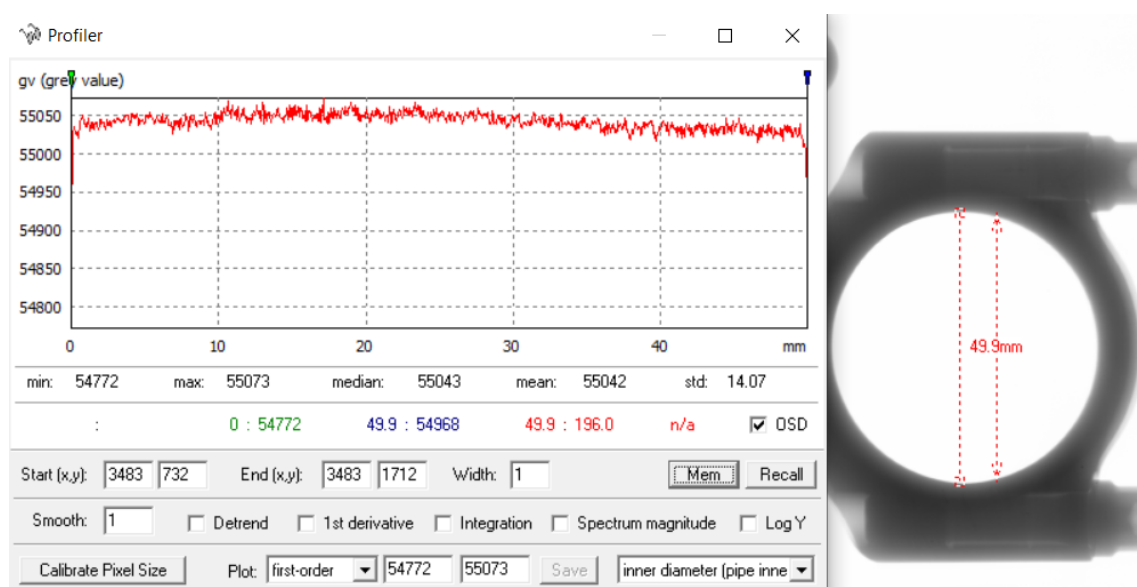
Na 16-bitnim 2D slikovnim zapisima pomoću programskog paketa „ImageJ“ napravljena je numerička analiza kritičnih presjeka. Kritični presjeci odabrani su prema literaturi i prema mogućnostima koje dozvoljavaju dostupni programski paketi zbog složenosti proučavanja podataka. Analizirani kritični presjeci odabrani su prema uobičajenim kritičnim presjecima sa slike 13 i to na jednakim udaljenostima od centra ležajnog mjesta velike glave pojedine klipnjače. Numerička analiza kritičnih presjeka I, za obje klipnjače, napravljena je duž horizontale osi klipnjače.



**Slika 26. Određivanje (x,y) koordinate središta velike glave klipnjače serijskog motora**

Presjeci II nalaze se na velikoj glavi klipnjače i napravljeni su u radijalnom smjeru prema središtu velike glave pojedine klipnjače, čija su središta utvrđena na način prikazan na slici 26.

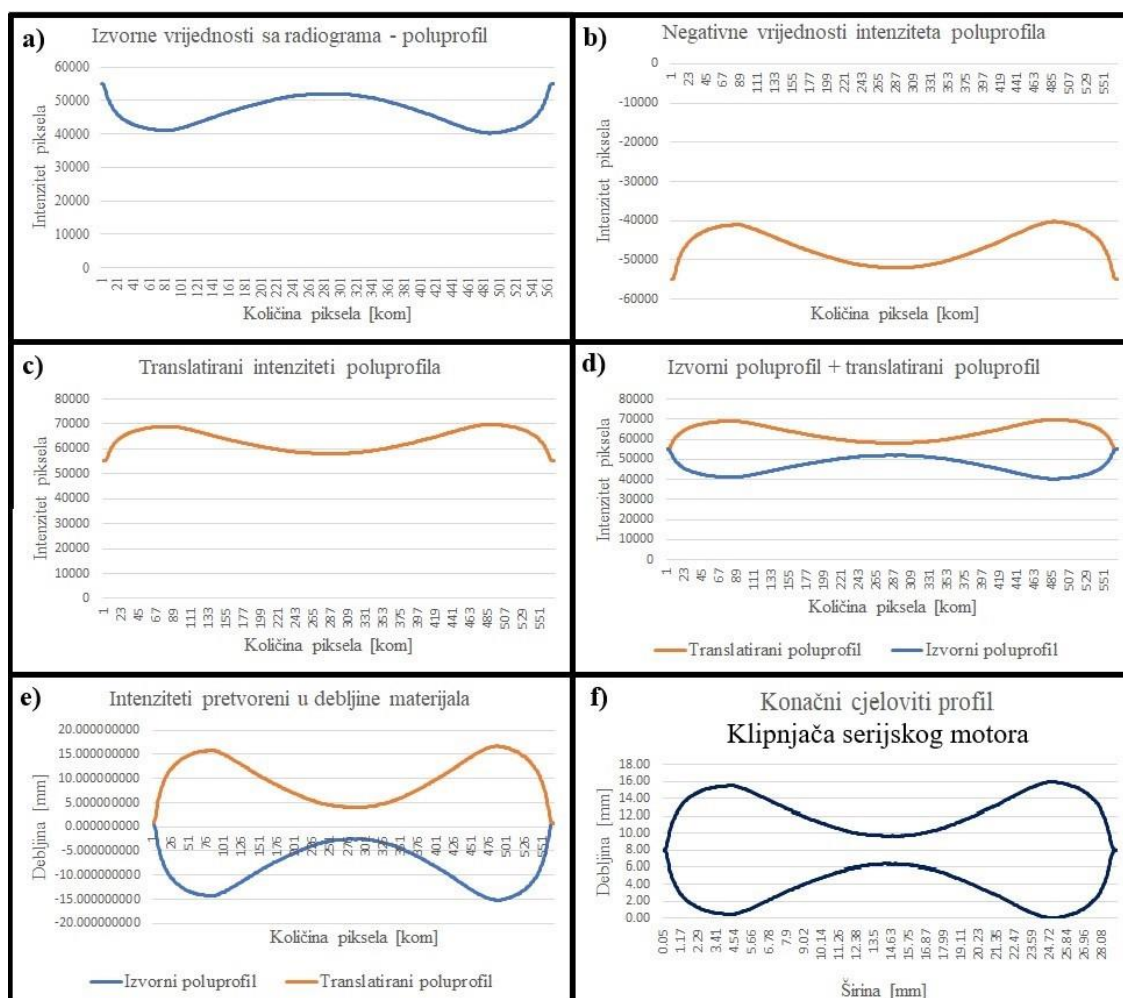
Središte kružnice upisane unutar velike glave klipnjače serijskog motora, točka (X783,Y2467), dobivena je pomoću funkcije za prepoznavanje unutarnjih promjera eng. *inner diameter* u programskom paketu „ISee!“. Središta male i velike glave pojedine klipnjače nalaze se na istoj Y koordinati unutar obrađivanog radiograma. Y koordinata, duž koje se proteže horizontalna središnja linija cijele klipnjače, dobivena je oduzimanjem ili zbrajanjem radijusa kružnice od jedne od vertikalnih točaka na kružnici unutar velike glave. Donja točka Y1977 kada se oduzme od gornje točke Y2957 dobije se promjer ležajnog mjesta na velikoj glavi klipnjače serijskog motora od 980 piksela, odnosno 49,9 mm. Iz određenog promjera pomoću navedene metodologije, može se uočiti određeno geometrijsko uvećanje na radiogramu, jer je promjer provrta velike glave klipnjače, izmjeren pomičnim mjerilom i približno iznosi 49 mm. Radijus ležajnog mjesta na velikoj glavi klipnjače serijskog motora iznosi  $980/2 = 490$  piksela. Ako se na donju točku Y1977 zbroji radijus ležajnog mjesta na velikoj glavi klipnjače serijskog motora od 490 piksela dobivena je Y koordinata središta ležajnog mjesta na velikoj glavi klipnjače serijskog motora od Y2467.



**Slika 27. Određivanje (x,y) koordinate središta velike glave klipnjače trkaćeg motora**

Ostali kritični presjeci sa slike 13 nisu obrađivani radi složenosti postupka njihovog analiziranja. Istim postupkom kao za klipnjaču serijskog motora, definirano je središte ležajnog mjesta na velikoj glavi klipnjače trkaćeg motora, a postupak je prikazan na slici 27.

Intenziteti piksela koji su dobiveni uprosječivanjem redova u odabranom području od interesa prikazuju poluprofile snimljenih klipnjača motora. Postupak dobivanja cjelovitog profila klipnjače u programskom paketu „Microsoft Excel“ prikazan je na slici 28 na kojoj su prikazani dijagrami dobivenih poluprofila i profila te konačni cjeloviti profil s uvrštenim debljinama materijala pomoću kalibracijskog pravca na ordinati i pretvorenih dimenzija piksela u širine profila klipnjača na apscisi dijagrama.



Slika 28. Dijagrami postupaka dobivanja cjelovitog profila

Izvorne vrijednosti sadržane u radiogramu prikazane su na dijagramu a) na slici 28. Navedene izvorne vrijednosti pomnožene s -1 daju negativne vrijednosti intenziteta piksela za izvorni poluprofil, a navedeno je prikazano na dijagramu b) na slici 28. Nadalje, na dijagramu c) na slici 28. prikazan je dijagram s transliranim intenzitetima poluprofila, koji je dobiven zbrajanjem dvostrukih maksimalnih intenziteta relevantnog poluprofila. Na dijagramu d) na slici 28 nalaze se spojeni izvorni poluprofil (sadržan u obrađivanom radiogramu) i negativni translirani poluprofil. Prikazom navedenih poluprofila dobiven je cjeloviti profil klipnjače, koji je potrebno provesti kroz jednadžbu kalibracijskog pravca i izračunati debljine materijala za pojedini intenzitet piksela. Nadalje, potrebno je podijeliti dobivene debljine s brojem 2 za prikaz debljine materijala iz poluprofila. Na dijagramu f) na slici 28. prikazan je konačni cjeloviti profil klipnjače serijskog motora s debljinom profila na apscisi te širinom profila na ordinati u mm. Navedenim postupkom izvedeni su i ostali profili, odnosno kritični presjeci, prikazani kasnije u radu.

U tablici 10 prikazane su izračunate  $(x,y)$  koordinate točaka na opasnim prijelazima tj. kritičnim presjecima za lakše centriranje pravokutnika unutar radiograma. Navedene vrijednosti izračunate su na način da je udaljenost izmjerena pomičnim mjerilom u mm, pretvorena u udaljenost u pikselima.

**Tablica 10. Karakteristike odabranih presjeka**

Klipnjača serijskog motora									
Presjek	(x,y) koordinate centra kružnice velike glave klipnjače	(x,y) koordinate središnje točke kritičnog presjeka	Horizontalna udaljenost presjeka od središta kružnice, mm / piksel	Kut rotacije radiograma	Širina ROI, broj piksela	Visina ROI, broj piksela	Površina presjeka $P$ , mm <sup>2</sup>	Volumen presjeka, $V$ , mm <sup>3</sup>	Masa odreska, $m$ , g
I	(X783,Y2467)	[X1755,Y2467]	49 / 962	0°	20	549	267,6	272,74	21,27
II	(X756,Y1332)	[X756,Y2083]	+ 26 / - 510	45°	20	257	232,6	237,07	18,49
Klipnjača trkaćeg motora									
Presjek	(x,y) koordinate centra kružnice velike glave klipnjače	(x,y) koordinate središnje točke kritičnog presjeka	Horizontalna udaljenost presjeka od središta kružnice, mm / piksel	Kut rotacije radiograma	Širina ROI, broj piksela	Visina ROI, broj piksela	Površina presjeka $P$ , mm <sup>2</sup>	Volumen presjeka, $V$ , mm <sup>3</sup>	Masa odreska, $m$ , g
I	(X3483,Y1222)	[X2512,Y1222]	49 / 9612	0°	20	489	229,96	234,38	18,28
II	(X3560,Y2360)	[X3565,Y1656]	+ 23 / + 451	45°	20	259	257,60	262,55	20,48

Pomoću kalibracijskog pravca za svaku klipnjaču određene su visine odnosno debljine materijala pa je tako izračunata i površina poprečnog presjeka. Površina poprečnog presjeka je izračunata uz pomoć površine ispod dijagrama izrađenih u programskom paketu „Microsoft Excel“. Upotrebom gornjih i donjih suma za svaki piksel duž tijela klipnjače (X os) i njegovog relevantnog intenziteta piksela tj. debljine materijala (Y os) dobivena je površina ispod dijagrama poprečnog presjeka pojedine klipnjače.

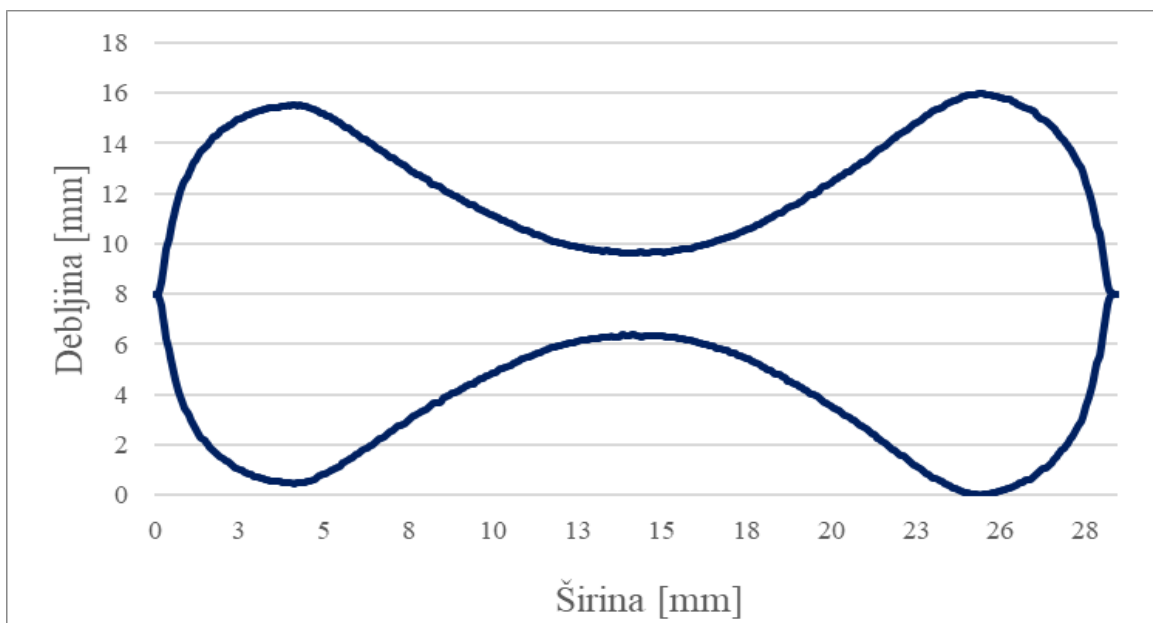
Umnoškom površine (piksel x piksel) s visinom odnosno debljinom materijala dobiveni su volumeni svakog pojedinog “kvadra“ unutar područja od interesa (ROI) s intenzitetima, a kasnije uz pomoć gustoće čelika pridružene su im mase. Suma masa svakog pojedinog “kvadra“ dužine i širine od jednog piksela s visinom koju određuje debljina materijala, ostvaruje mogućnost računanja ukupne mase. Mase odrezaka tj. volumena za 2D ROI računane su s gustoćom od  $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$  za obje klipnjače.

**Tablica 11. Usporedba karakteristike presjeka I**

Klipnjača	(x,y) koordinate centra kružnice velike glave klipnjače	(x,y) koordinate središnje točke kritičnog presjeka	Horizontalna udaljenost presjeka od središta kružnice , mm / piksel	Kut rotacije radiograma	Širina ROI, broj piksela	Visina ROI, broj piksela	Površina presjeka P, mm <sup>2</sup>	Volumen presjeka, V, mm <sup>3</sup>	Masa odreska, m , g
Serijski motor	(X783,Y2467)	[X1755,Y2467]	+ 49 / 962	0°	20	549	267,6	272,74	21,27
Trkaći motor	(X3483,Y1222)	[X2512,Y1222]	+ 49 / 9612	0°	20	489	229,96	234,38	18,28

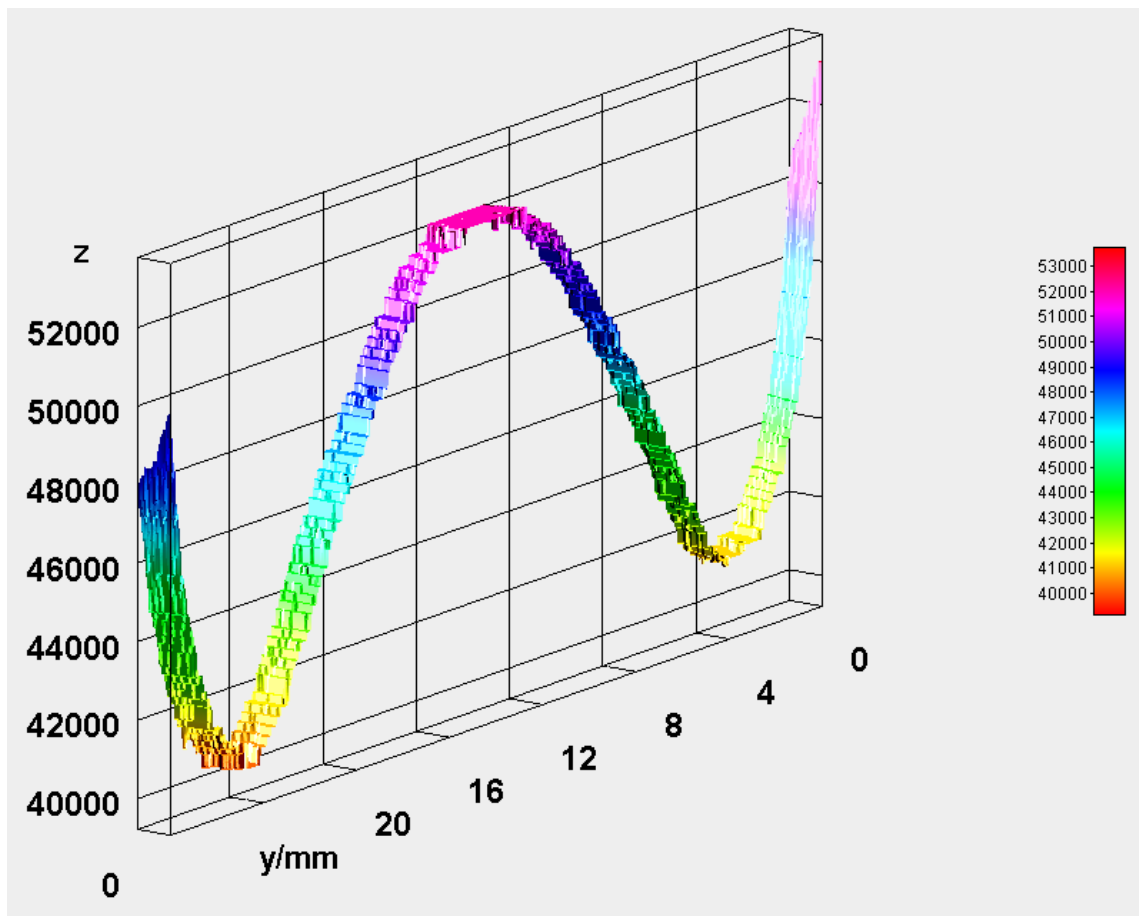
Presjeci I vidljivi u tablici 11, predstavljaju kritična mjesta obje klipnjače na mjestima gdje se mijenja širina tijela klipnjače na udaljenosti od 46mm od središta ležajnih mjesta velikih glava.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako klipnjača serijskog motora u kritičnom presjeku I ima veću površinu presjeka, što ukazuje na jači i izdržljiviji kritični presjek od klipnjače trkaćeg motora. Navedena tvrdnja nije niti upitna, jer je visina kritičnog presjeka I (širina tijela) klipnjače serijskog motora veća za 16%. Razlika između masa odrezaka na kritičnim presjecima I pojedine klipnjače izračunatih pomoću računalne radiografije iznosi 15%, što može ukazati na činjenicu da kada bi presjek bio iste visine presjeka odnosno širine tijela klipnjače, H-profil tijela klipnjače trkaćeg motora bio bi nešto jači i izdržljiviji.



**Slika 29. Kritični presjek I klipnjače serijskog motora**

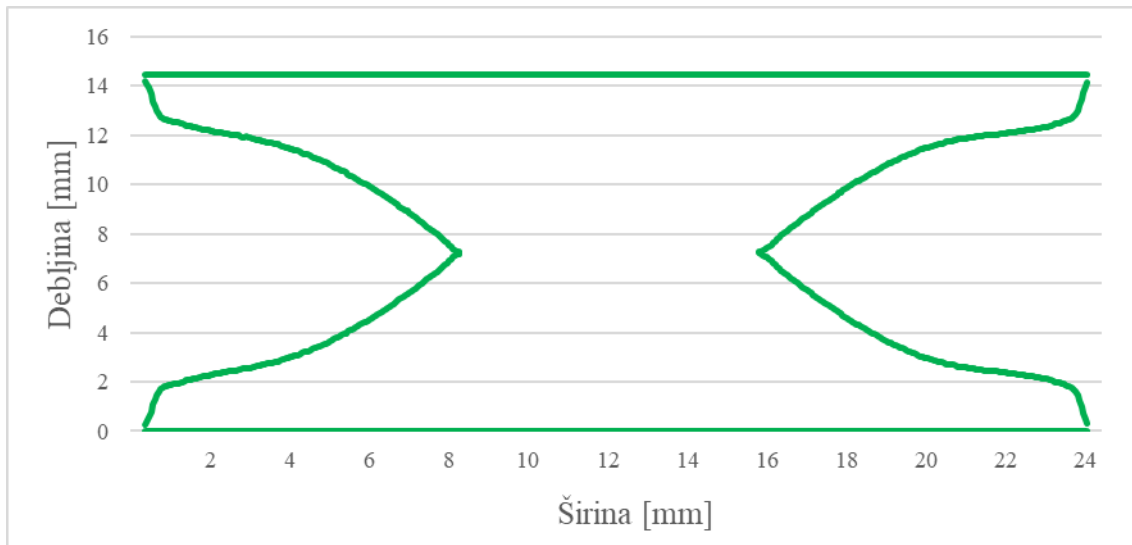
Na slici 29 prikazan je dijagram kritičnog presjeka I, klipnjače serijskog motora, dobiven matematičkim operacijama u programskom paketu „Microsoft Excel“. Na slici 30 prikazan je poluprofil kritičnog presjeka I klipnjače trkaćeg motora kao izrezak iz programskog paketa „ImageJ“. Prema skali boja na slici 30 može se uočiti intenzitet piksela na određenom dijelu poluprofila.



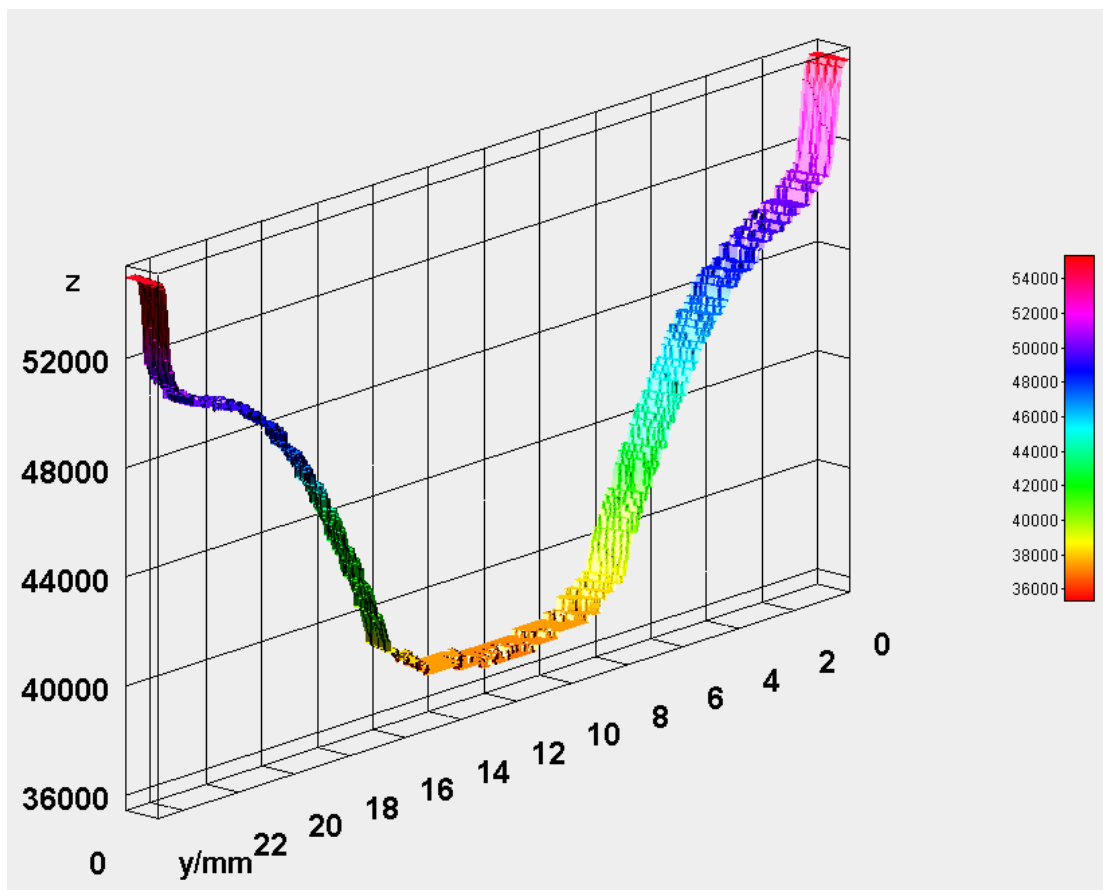
**Slika 30. Interaktivni 3D prikaz poluprofila kritičnog presjeka 1 klipnjače serijskog motora**

Prije usporedbe kritičnih presjeka II, radiograme je potrebno rotirati u programskom paketu „ImageJ“ pomoću funkcije iz izbornika eng. *Image > Transform > Rotate*, i to za  $45^\circ$  u odnosu na centar obrađivanog radiograma. Na taj način dobiveni su vertikalni presjeci, koji se mogu međusobno uspoređivati pomoću jednakih koraka, kao i za kritične presjeke I.





Slika 31. Kritični presjek I klipnjače trkaćeg motora



Slika 32. Interaktivni 3D prikaz površine kritičnog presjeka 1 klipnjače trkaćeg motora

Na slici 32 prikazani su 3D prikazi površine kritičnog presjeka pojedine klipnjače koji su napravljeni koristeći funkciju iz izbornika eng. *Plugins > 3D > Interactive 3D Surface Plot*. Interaktivni prikaz moguće je korigirati s određenim funkcijama kako bi se dobila željena slika.

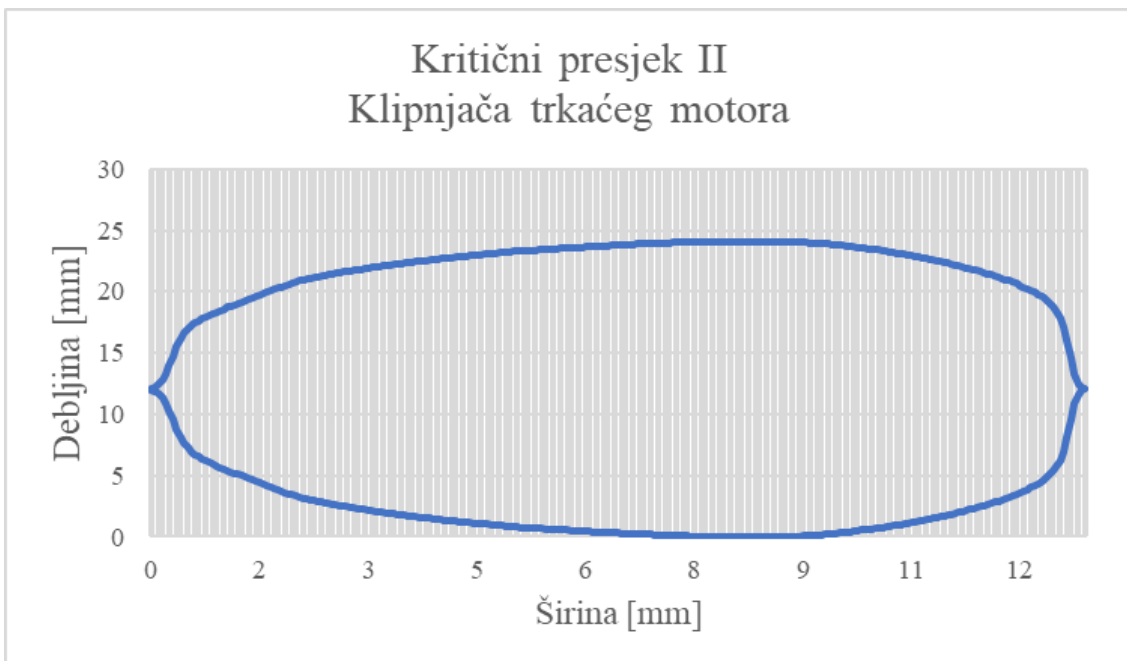
**Tablica 12. Usporedba karakteristike presjeka II**

Klipnjača	(x,y) koordinate centra kružnice velike glave klipnjače	(x,y) koordinate središnje točke kritičnog presjeka	Horizontalna udaljenost presjeka od središta kružnice , mm / piksel	Kut rotacije radiograma	Širina ROI, broj piksela	Visina ROI, broj piksela	Površina presjeka $P$ , mm <sup>2</sup>	Volumen presjeka, $V$ , mm <sup>3</sup>	Masa odreska, $m$ , g
Serijski motor	(X756,Y1332)	[X756,Y2083]	+ 26 / -510	45°	20	257	232,6	237,07	18,49
Trkaći motor	(X3560,Y2360)	[X3565,Y1656]	+ 23 / - 451	45°	20	259	257,60	262,55	20,48

Kritični presjeci II, vidljivi u tablici 12, nalaze se na opasnim prijelazima na krajevima provrta za vijke. Na klipnjači serijskog motora kritični presjek II je udaljen simetrično 26 mm od središta velike glave, dok je na klipnjači trkaćeg motora kritični presjek II simetrično udaljen 23 mm od središta velike glave. Obje udaljenosti kritičnih presjeka II odnose se na udaljenost po horizontalnoj osi pojedine klipnjače od njenog središta velike glave.



**Slika 33. Kritični presjek II klipnjače serijskog motora**

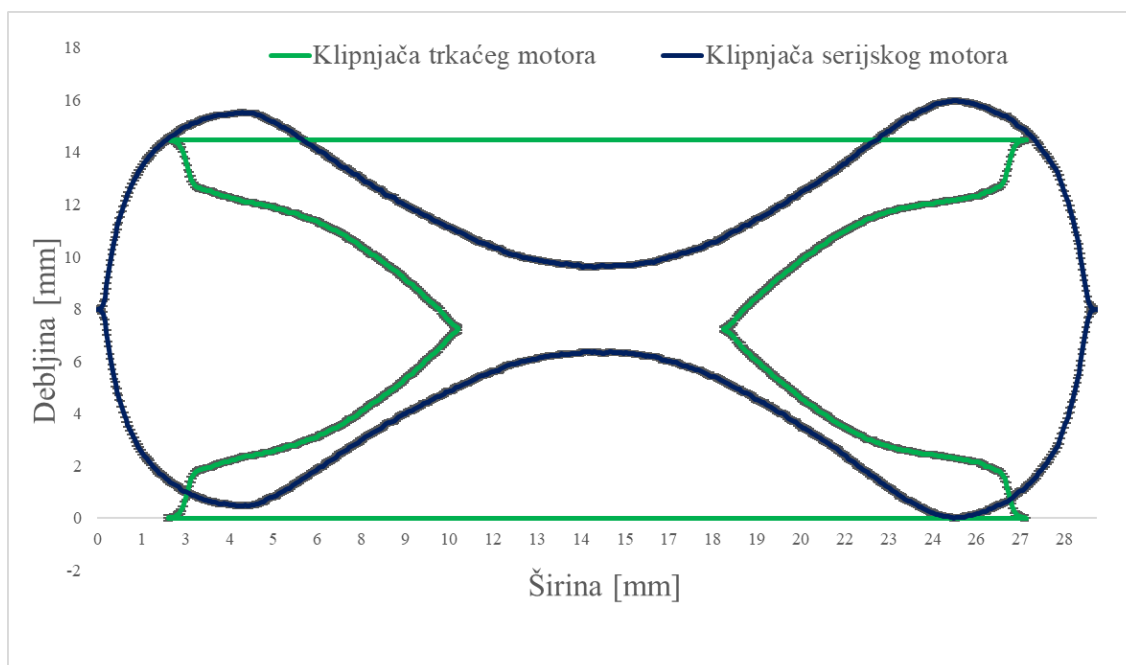


**Slika 34. Kritični presjek II klipnjače trkaćeg motora**

Na temelju rezultata može se zaključiti kako klipnjača trkaćeg motora u kritičnom presjeku II ima veću površinu presjeka, što ukazuje na jači i izdržljiviji kritični presjek od klipnjače serijskog motora. Dijagrami poprečnih kritičnih presjeka II sa širinama

presjeka na apscisi i debljinama materijala na ordinati prikazani su na slikama 33 i 34. Razlika između masa odrezaka na kritičnim presjecima II pojedine klipnjače izračunatih pomoću računalne radiografije iznosi 11%, dok im se visine presjeka ne razlikuju. To ukazuje na činjenicu da je kritični presjek II klipnjače trkaćeg motora izdržljiviji od kritičnog presjeka II klipnjače serijskog motora. Uzevši u obzir da presjek klipnjače serijskog motora ima manju masu, može se zaključiti kako je klipnjača trkaćeg motora izrađena na način da je na kritičnim presjecima ojačana, dok je samom tijelu klipnjače maksimalno smanjena masa, uz generalno izdržljiviji i jači H-profil tijela klipnjače.

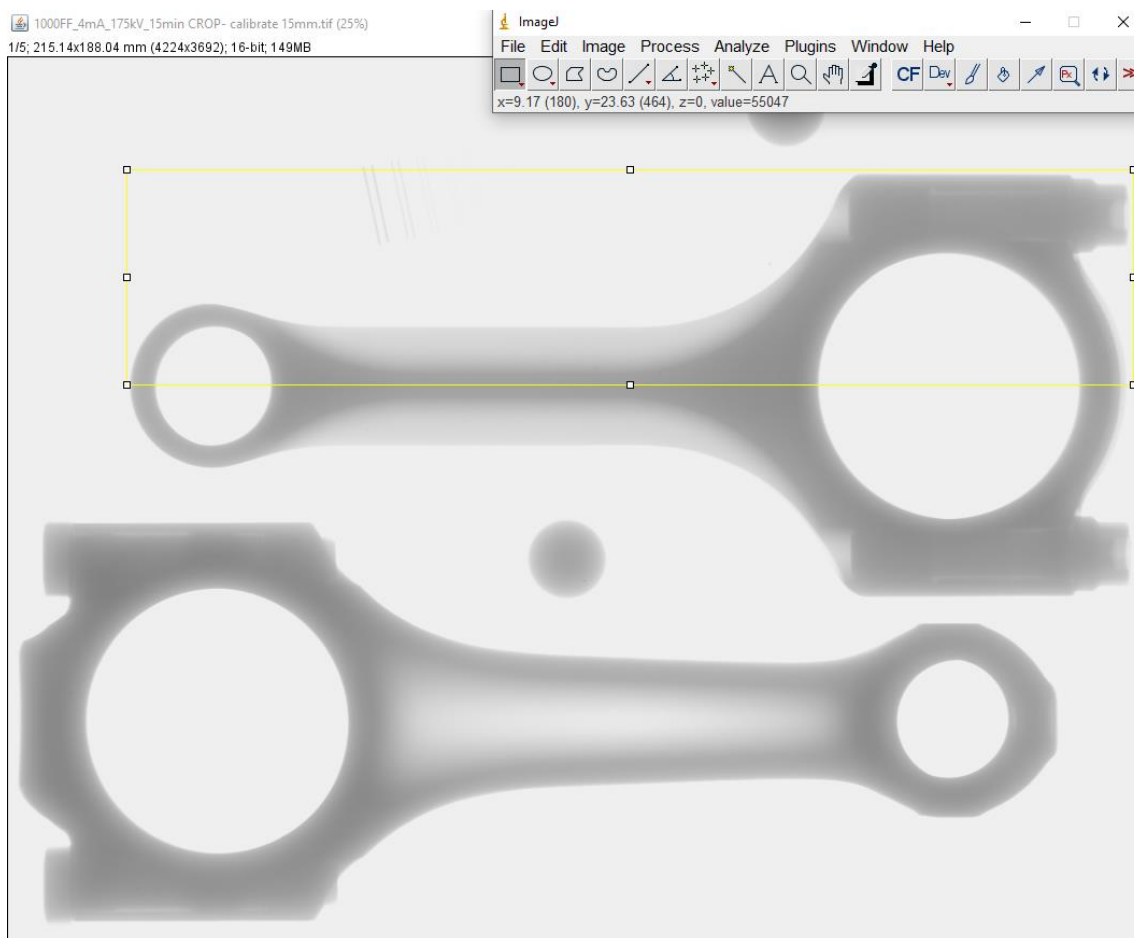
Odabrana područja od interesa na pojedinom uzorku prikazana su u tablici 10. Referentni pravokutnici tj. pravokutna područja od interesa su širine 20 piksela (1,0192 mm) i visine koja je referentna za pojedino područje od interesa za pojedini uzorak u smislu debljine materijala. Uprosječivanjem pojedinog reda dobiveno je područje od interesa širine 1 piksela i debljine materijala koja je referentna za pojedino područje od interesa. Uprosječeni redovi sadržani u jednom stupcu pojedine klipnjače jednostavnom funkcijom u „Microsoft Excelu“ su preklopljeni i grafički prikazani na slici 35.



**Slika 35. Preklopni dijagram kritičnih presjeka I**

#### 4.2.3.3. Određivanje mase i težišta uzoraka

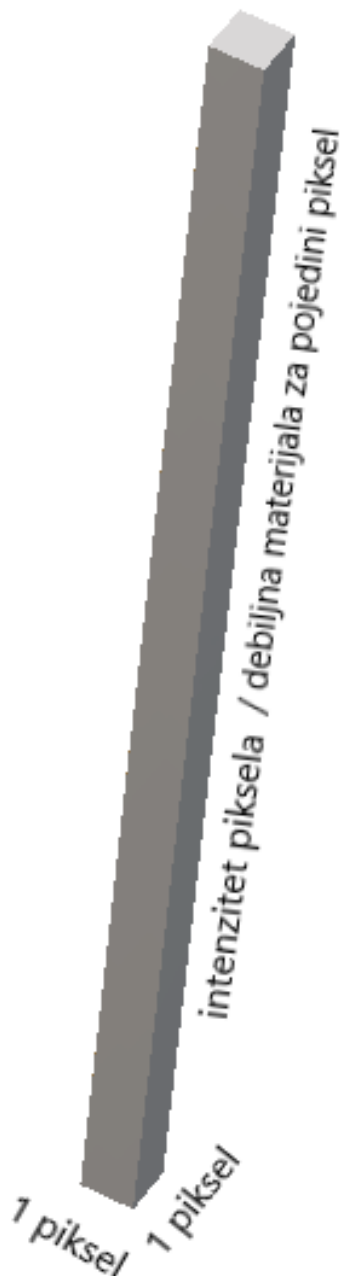
Numeričkom analizom prepolovljenog simetričnog područja od interesa (ROI) vidljivog na slici 36, s intenzitetima piksela pojedine klipnjače motora, napravljeni su izračuni težišta nepravilnog tijela u jednoj od tri dimenzije. Klipnjača kao tijelo simetrična je u dvjema dimenzijama, dok treća dimenzija nije, zbog male i velike glave koje nisu simetrične. Kako bi se pronašla točka težišta u trećoj dimenziji, izračunata je X koordinata centra mase pojedine klipnjače, pomoću već spomenutog postupka.



**Slika 36. Prikaz područja od interesa za procjenu mase klipnjače**

Primjerice, masu je vrlo jednostavno odrediti pomoću vage, ali težište nepravilnog tijela kao što je klipnjača motora s unutarnjim izgaranjem, nije jednostavno odrediti. Za određivanje težišta nekom drugom nerazornom metodom (bez rendgenskog izlaganja) potrebno je izraditi dodatni alat i pribor pomoću kojih bi mjerenje uopće bilo moguće.

Svakako, razornim metodama može se odrediti težište, ali samo s nepovratnim uništavanjem uzorka.



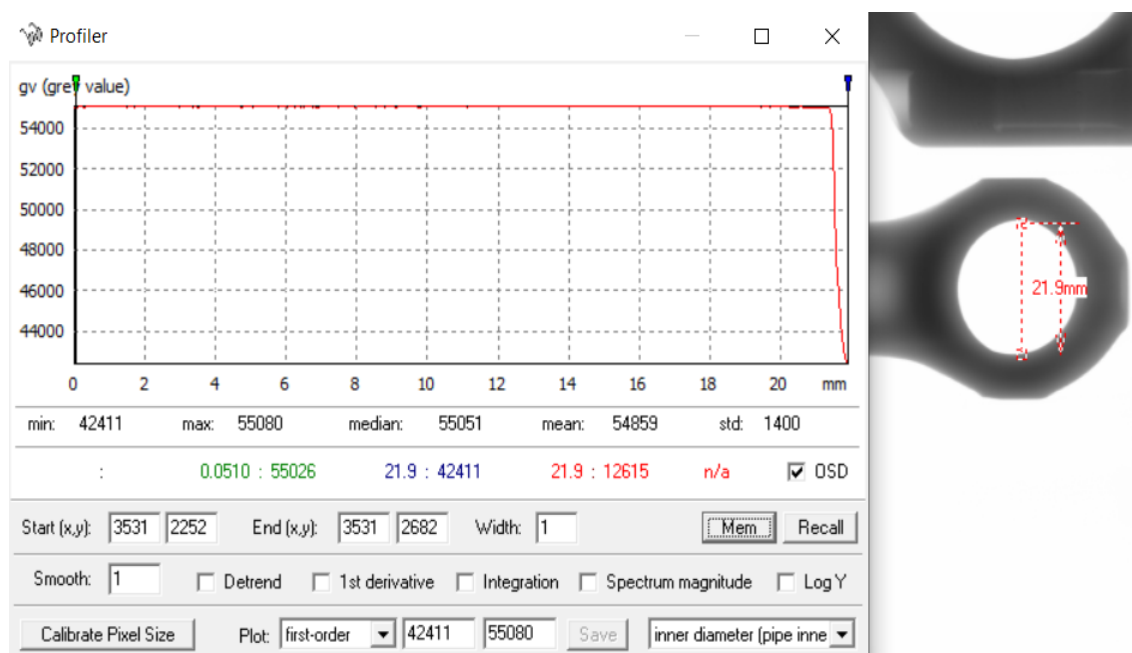
**Slika 37. Prikaz volumena komponente za pojedini piksel**

Pomoću poznate treće dimenzije pronađene su visine svakog pojedinog piksela koji sadrži intenzitete piksela između [33 000 - 55 000]. Prema slici 37, umnoškom površine (piksel\*piksel) s visinom, dobiveni su volumeni svakog pojedinog “kvadra“ unutar

područja od interesa (ROI), a kasnije uz pomoć gustoće pridružene su im mase. Suma masa svakog pojedinog “kvadra“ dužine i širine od jednog piksela s visinom koju određuje debljina materijala, ostvaruje mogućnost računanja ukupne mase i težišta pojedine klipnjače.

Kako bi se mogla procjenjivati masa i težište klipnjača potrebno je označiti kompletno područje od interesa (ROI) na radiogramu koje sadrži sve intenzitete piksela između [33 000 – 55 000], što ukazuje na obradu područja od interesa (ROI) veličine 3730 x 1590 piksela. Bez kvalitetnijeg računala proces obrade navedene količine podataka je skoro pa nemoguć, stoga je područje od interesa (ROI) s intenzitetima piksela prepolovljeno duž horizontalne osi klipnjača. Umjesto s 5 929 110 intenziteta piksela postupak je obavljen s dijeljenjem područja od interesa (ROI) na dva jednaka dijela, te je programski paket trebao procesuirati područje od interesa (ROI) s 2 964 555 brojevanih vrijednosti tj. intenziteta piksela.

Za pronalaženje točke središta male glave pojedine klipnjače korištena je ista metoda kao i za pronalazak središta velike glave, a postupak je prikazan u poglavlju analize kritičnih presjeka klipnjača.



**Slika 38. Određivanje (x,y) koordinate središta male glave klipnjače serijskog motora**

Na slikama 26 i 38, prikazani su postupci određivanja središta ležajnih mjesta na velikoj i maloj glavi klipnjače pomoću funkcije za prepoznavanje unutarnjih promjera eng. *inner diameter* u programskog paketu „ISee!“. Dobivene su dvije točke koje određuju središnju liniju po dužini odnosno horizontalnu os duž klipnjače. Istim postupkom dobivena je horizontalna os duž klipnjače trkaćeg motora. Nakon što je određena horizontalna os, dobiveno je područje od interesa (ROI) s 2 964 555 piksela, kojima su poznate dimenzije te pripadajući intenziteti piksela. Prema kriteriju da su intenziteti piksela manji od 55 000, područje od interesa (ROI) eksponiranog dijela materijala, je prorijeđeno u programskom paketu „Microsoft Excel“ jednostavnim funkcijama koje nudi. Nadalje, izračunati su volumeni pomoću regresijskih polinoma prvog stupnja odnosno kalibracijskih pravaca za pojedinu klipnjaču, te su umnoškom s gustoćom od  $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ , volumenima pridružene mase. Zbrajanjem svakog pojedinog "kvadra" ( $\approx 2\,964\,555$ ) koji ima određenu masu, dobivena je masa poluprofila klipnjača po horizontalnoj osi klipnjače. Pridruživanjem drugog poluprofila dobivena je ukupna masa pojedine klipnjače. Stvarne mase i mase dobivene procjenom debljina pomoću kalibracijskih pravaca, prikazane se u tablici 13.

**Tablica 13. Rezultati numeričke analize mase i težišta uzoraka**

Značajka	Klipnjača serijskog motora	Klipnjača trkaćeg motora
Stvarna masa [g]	685	527
Masa RTG modela [g]	736	638
Udaljenost težišta od središta velike glave [mm]	36,80	32,30
X koordinata težišta	X1505	X2803
Y koordinata težišta	Y2467	Y1222

Ako je pronađena masa svakog uskog dugačkog "kvadra" od njih  $\approx 2\,964\,555$ , s volumenom (duljina piksela x širina piksela x debljina materijala), moguć je i pronalazak centra mase pojedinog "kvadra", jer su dvije dimenzije "kvadra" jednake veličine, što znači da je centar mase svakog pojedinog "kvadra" u polovici njegove treće dimenzije koja je u ovom slučaju debljina materijala.



Za svaki sustav  $i$  u svakom trenutku u vremenu postoji jedinstveno mjesto u prostoru koje je prosječni položaj mase sustava. To mjesto tj. točka, naziva se centar mase, koje se obično označava s  $R_{cm}$ , a u većini slučajeva može se poistovjetiti s točkom težišta nekog tijela. Rutinski, ali vrlo važan proces je pronaći središte mase složenog stroja.

Danas se spomenuti rutinski proces često obavlja pomoću CAD programskih paketa, no potrebno je znati i osnovni postupak računanja, za provjeru ispravnosti računarskih izračuna. Primjerice, takav postupak se koristi pri procijeni može li se automobil prevrnuti pri određenim manevrima na ravnom terenu. Centar mase čamca mora biti dovoljno nisko kako bi čamac bio stabilan. Svaka pogonska sila na svemirskoj letjelici mora biti usmjerena prema centru mase kako ne bi došlo do nekontroliranih rotacija. Bilo koji rotacijski dio stroja mora imati svoj centar mase na osi rotacije kako ne bi dolazilo do velikih vibracija unutar stroja. Također, mnogi proračuni u mehanici uvelike su pojednostavljeni korištenjem centra mase jednog ili više sustava. Središte mase sustava nalazi se u točki na X osi, dok je jednadžba (1), pomoću koje je izračunata X koordinata težišta, prikazana niže [21].

$$x_{cm} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \quad (1)$$

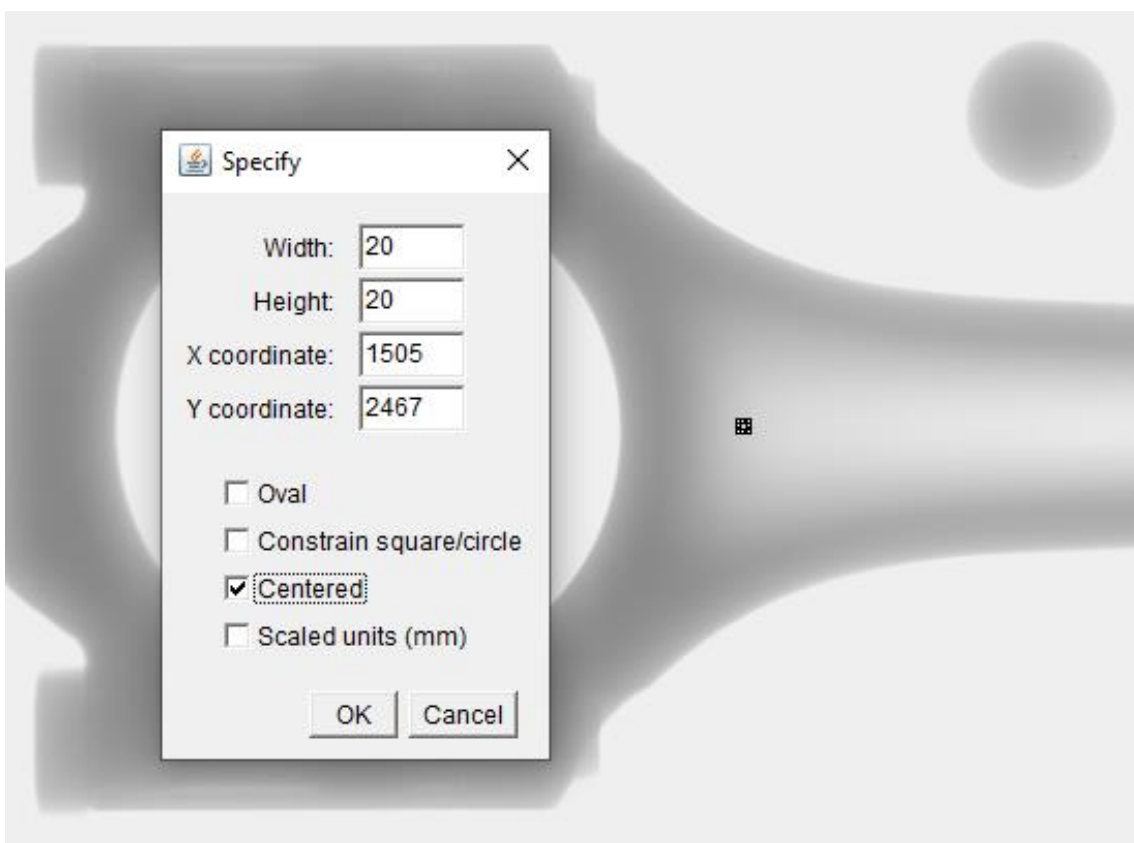
Gdje je:

$x_{cm}$     mm    udaljenost centra mase od nulte točke

$m_i$     g    masa pojedinog “kvadra“

$x_i$     mm    udaljenost centra mase pojedinog “kvadra“ od nulte točke - rub klipnjače na velikoj glavi

Budući da svi “kvadri“ duž klipnjače imaju iste dimenzije dužine i širine piksela, centar masa se nalazi u točki koja je dobivena na sljedeći način. Masa svakog pojedinog “kvadra“ sa svojim centrom mase može činiti podsustav. Centar mase je dobiven kao rezultat zbroja svih podsustava pojedinih “kvadara“ podijeljen s ukupnom masom svake klipnjače motora.

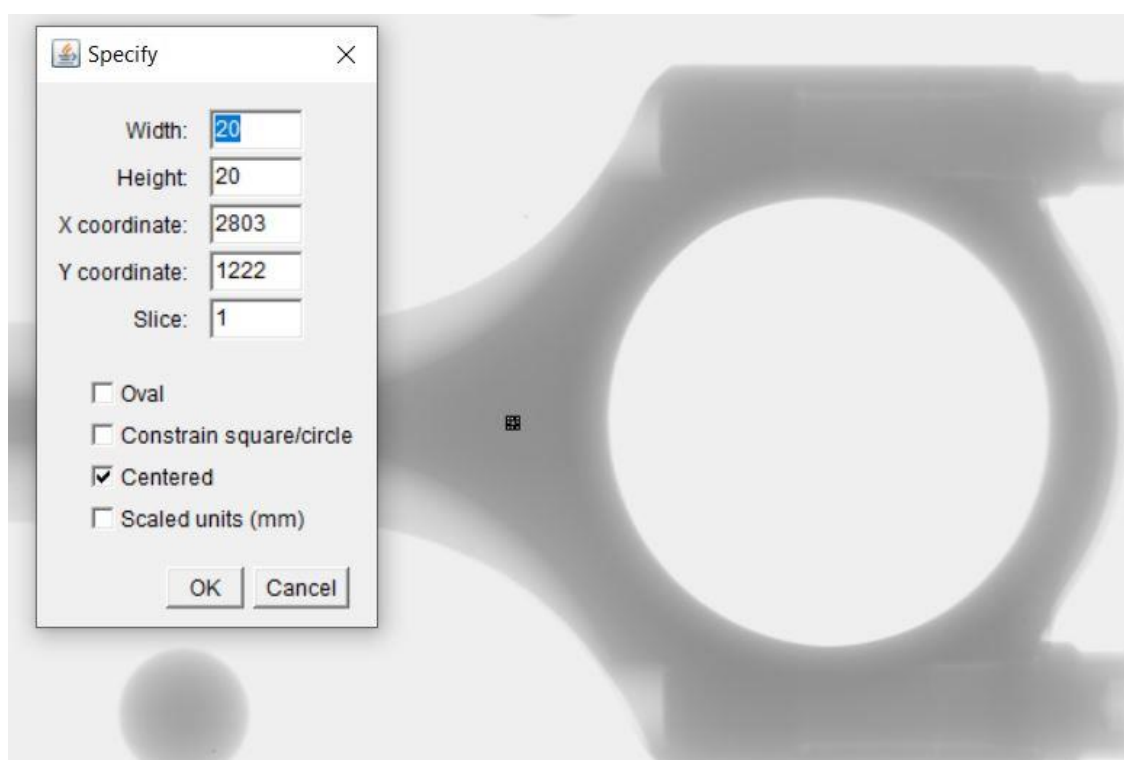


**Slika 39. Točka težišta klipnjače serijskog motora dobivena numeričkom analizom radiograma**

Centar mase je točka koja se nalazi na prosječnoj udaljenosti od pojedinih čestica tijela do hvatišta ukupne vanjske sile koja djeluje na sustav čestica ili na tijelo. Ako se sustav čestica ili tijelo giba pod utjecajem vanjske sile, točka u kojoj se nalazi središte mase, giba se kao da se u njoj nalazi sva masa sustava ili tijela.

Na slikama 39 i 40 su prikazani centri masa svake klipnjače dobiveni objašnjenom metodom. Prema literaturi, dobiveni centri masa odnosno težišta su u pozicijama gdje bi i trebali biti. Nadalje, nešto niži položaj centra mase (težišta) klipnjače trkaćeg motora (14%) u odnosu na centar velike glave oko koje se klipnjača giba, ukazuje na bolja dinamička svojstva klipnjače trkaćeg motora u odnosu na klipnjaču serijskog motora.

Kada je težište klipnjače dislocirano prema centru velike glave klipnjače (prema dolje), iznos sile inercije u maloj glavi klipnjače se smanjuje, što je posebno značajno pri velikoj brzini vrtnje za kakvu je klipnjača trkaćeg motora i predviđena [22].



**Slika 40. Točka težišta klipnjače trkaćeg motora dobivena numeričkom analizom radiograma**

## 5. ZAKLJUČAK

Tehnike nerazornih ispitivanja omogućuju dobivanje velikih količina podataka koji se mogu koristiti u svrhu različitih ispitivanja, karakterizacije te usporednih analiza. U ovom radu NDT tehnike su omogućile klasifikaciju materijala na uzorcima te numeričku analizu radiograma.

Prva i osnovna razlika između uzoraka je kemijski sastav materijala. Materijal klipnjače trkaćeg motora sadrži veći maseni udio legiranih elemenata što ukazuje na kvalitetniji, izdržljiviji i skuplji materijal.

Numerička analiza s velikom količinom podataka provedena je u svrhu procjene profila uzoraka te za usporednu analizu kritičnih presjeka, mase i težišta uzoraka.

Dobiveni rezultati su unutar 10% pogreške, koja je utvrđena kod procjene debljine materijala, a prisutna je zbog neravnomjernog geometrijskog uvećanja na radiogramu. Budući da su ispitivanja usporedne prirode, navedene pogreške nemaju značajan utjecaj na rezultate.

Klipnjača serijskog motora sa svojim osnovnim karakteristikama koje su definirane od strane proizvođača, za potrebe velikoserijske proizvodnje, ne može dostići razinu mehaničkih svojstava klipnjače trkaćeg motora, ali se može obraditi prema uzoru na konstrukciju klipnjače trkaćeg motora. Naknadna obrada ne smije biti značajna kako ne bi došlo do prevelikog stanjivanja materijala na kritičnim mjestima klipnjače serijskog motora. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja, klipnjača serijskog motora se može s većom sigurnošću i efektom obraditi, olakšati i izbalansirati za korištenje u trkaćem motoru.

## LITERATURA

- [1] Markučić, D. Predavanja iz kolegija Rendgenski vizijski sustavi, Zagreb 2019.
- [2] Olympus Handheld XRF Analyzer; User's manual, Rev G, USA 2015.
- [3] Shema RTG cijevi: <https://openclipart.org/detail/274838/illustration-of-crookes-xray-tube>, Pristupljeno: 1. listopada 2020.
- [4] N. Bolf, OSVJEŽIMO ZNANJE, Kem. Ind. 67 (7-8) (2018) 331–332, Ionizirajuće zračenje, FKIT, Sveučilište u Zagrebu
- [5] Seeram E. Digital Radiography: Physical Principles and Quality Control; Second Edition; Springer Nature Singapore; 2019.
- [6] Slika skenera VMI 5100MS: [https://www.vmindt.com/sites/default/files/VMI%205100MS-C\\_2017\\_MR3.2.pdf](https://www.vmindt.com/sites/default/files/VMI%205100MS-C_2017_MR3.2.pdf), Pristupljeno: 30. rujna 2020.
- [7] Mahalec, Lulić, Kozarac: Konstrukcije motora, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [8] Metallurgical Science and Technology; THE HISTORY OF COMPONENTS; The Connecting Rod; Giovanni Riccio; Vol. 3; 1985.
- [9] D Visser, A Comparison of Manufacturing Technologies in the Connecting Rod Industry; Department of Metallurgical and Materials Engineering; Colorado School of Mines; Golden; lipanj 2008.
- [10] Ćorić, D. Alar, Ž. ODABRANA POGLAVLJA IZ MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016./17.
- [11] Bauer, B.; Mihalic Pokopec, I. OSNOVE TEHNOLOGIJE LIJEVANJA. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [12] Definicija lijevanja: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Lijevanje>, Pristupljeno: 30. rujna 2020.
- [13] Specifikacija klipnjače trkaćeg motora: <https://www.k1technologies.com/>, pristupljeno 20. listopada 2020.

- [14] Karakteristike klipnjače trkaćeg motora:  
<https://www.onallcylinders.com/2015/09/11/rod-school-how-to-choose-the-right-connecting-rods/>, Pristupljeno: 02. listopada 2020.
- [15] Specifikacije materijala klipnjače trkaćeg motora:  
<https://www.theworldmaterial.com/astm-sae-aisi-4340-alloy-steel/>, Pristupljeno 20. listopada 2020.
- [16] Rede V., Predavanja iz kolegija Izbor Materijala – Željezni ljevovi. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019
- [17] Specifikacija materijala klipnjače serijskog motora:  
<https://www.tomorrowstechnician.com/under-the-hood-selecting-cranks-rods-and-bearings-for-your-performance-engine/>, pristupljeno 20. listopada 2020
- [18] User manual for the measuring program ISee!, version 1.11.1., prosinac 2013
- [19] Intenzitet piksela za 8-bitni i 16-bitni zapis:  
[https://emsis.eu/olh/HTML/topics\\_glossary\\_16bit\\_image.html#konvertieren](https://emsis.eu/olh/HTML/topics_glossary_16bit_image.html#konvertieren), Pristupljeno: 10. listopada 2020.
- [20] Rakvin, Markučić, Hižman - Evaluation of Pipe Wall Thickness Based on Contrast Measurement using Computed Radiography (CR), Procedia Engineering 69 ( 2014 ) 1216 – 1224; doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.112; Zagreb 2013.
- [21] Mechanics Toolset, Statics, and Dynamics, Andy Ruina and Rudra Pratap 1994-2018
- [22] Dilawar K, Kulkarni M, Mahangade V, Detailed Analysis of CG Variation Effect on Connecting Rod Design of a Turbocharged Diesel Engine; SAE International; 2011. doi:10.4271/2011-01-2231;

## **PRILOZI**

1. CD-R disk
2. Radiogram u tif formatu - 1000FF\_4mA\_175kV\_15min CROP - calibrate  
15mm
3. „Microsoft Office Excel“ datoteke s rezultatima mjerenja