

# Karakterizacija čeličnog bloka iz rimskog doba

---

**Pavlinec, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:057061>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Pavlinec**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Marko Pavlinec

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum: 25. 02. 2016.                | Prilog |
| Klasa: 002-04/16-6/3                |        |
| Ur.broj: 15-1703-16-140             |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Pavlinec**

Mat. br.: 0035187819

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija čeličnog bloka iz rimskog doba**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of steel bar from Roman times**

**Opis zadatka:**

Napraviti metaluršku karakterizaciju čeličnog bloka pronađenog na području grada Siska u rimsko doba. Čelični blokovi išli su u distribuciju kovačima za izradu mačeva, sjekira i druge opreme za rimsku vojsku, a potječu iz razdoblja od početka drugog do kraja četvrtog stoljeća, kada je u Sisku bila najveća produkcija željeza u rimsko vrijeme.

U okviru rada potrebno je prikupiti i proučiti literaturu, a u eksperimentalnom dijelu odrediti kemijski sastav, mikrostrukturu i mikrovrdoću čeličnog bloka. Pokušati rekonstruirati proizvodnju čelika u to vrijeme, kao i izradu predmeta koji se izrađivao iz bloka.

Zadatok zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

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

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

Zadatak zadan:

  
 Izv.prof.dr.sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:

  
 Prof. dr. sc. Zoran Kunica

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Branku Baueru dipl. ing. na uputstvima i savjetima pri izradi ovog rada.

Marko Pavlinec

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| POPIS SLIKA .....                                     | II |
| POPIS TABLICA.....                                    | IV |
| SAŽETAK.....  | V  |
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. POVIJEST LIJEVANJA .....                           | 2  |
| 2.1. Lijevanje prije Krista.....                      | 2  |
| 2.1.1. Mezopotamija - počeci lijevanja .....          | 2  |
| 2.1.2. Egipat .....                                   | 6  |
| 2.1.3. Kina .....                                     | 7  |
| 2.1.4. Tajland i Indija .....                         | 10 |
| 2.2 Lijevanje poslije Krista .....                    | 11 |
| 2.2.1. Povijest lijevanja od 13. do 17.stoljeća ..... | 11 |
| 2.2.1 Povijest lijevanja od 17. do 20. stoljeća ..... | 13 |
| 2.2.2 Ljevarstvo u današnje vrijeme.....              | 16 |
| 3. SISCIA- CENTAR PANONIJE.....                       | 18 |
| 3.1 Kovnica u Sisciji .....                           | 19 |
| 3.2 Čelični blokovi .....                             | 20 |
| 3.3 Metalurgija u okolici Siscije.....                | 22 |
| 4. EKSPERIMENTALNI RAD .....                          | 23 |
| 4.1 Priprema uzoraka.....                             | 23 |
| 4.2 Metalografska ispitivanja .....                   | 28 |
| 4.3 Ispitivanje mikrotvrdoće.....                     | 29 |
| 4.4 Određivanje kemijskog sastava .....               | 30 |
| 5. REZULTATI ISPITIVANJA .....                        | 32 |
| 5.1 Rezultati metalografskih ispitivanja.....         | 32 |
| 5.2. Rezultati ispitane mikrotvrdoće.....             | 40 |
| 5.3 Rezultati kemijske analize.....                   | 41 |
| 6. ZAKLJUČAK .....                                    | 44 |
| LITERATURA.....                                       | 45 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1: Bakrena žaba iz 3200.g. pr.Kr pronađena na području Mezopotamije .....                | 3  |
| Slika 2.2: Otvoreni kameni kalup za lijevanje oštrice koplja.....                                | 4  |
| Slika 2.3: Ilustracija lijevanja bodeža u zatvorenom kalupu. ....                                | 5  |
| Slika 2.4: Prve peći za taljenje metala. ....  | 5  |
| Slika 2.5: Brončana cipela načinjena pomoću jezgre .....   | 6  |
| Slika 2.6: Skulptura mačke pronađene u Egiptu između 600. i 400. g. pr. Kr. ....                 | 7  |
| Slika 2.7: Brončani slon lijevan u dva dijela i naknadno spojen lijevanjem.....                  | 8  |
| Slika 2.8: Najstarija poznata peć za lijevanje željeza iz dinastije Han .....                    | 9  |
| Slika 2.9: Primjer brončanog koplja.....   | 10 |
| Slika 2.10: Figurica „Plesačice“ iz 2500 g. pr. Kr. ....   | 11 |
| Slika 2.11: Top s najvećim kalibrom odliven u Rusiji 1586. godine .....                          | 12 |
| Slika 2.12: Vannoccio Biringuccio i njegovo djelo „De La Pirotechnia“ .....                      | 12 |
| Slika 2.13: Johannes Croning .....   | 15 |
| Slika 2.14: Simulacija popunjavanja kalupne šupljine u „ProCAST-u“ .....                         | 16 |
| Slika 2.15: Top 10 zemalja u proizvodnji odljevaka .....   | 17 |
| Slika 3.1: Položaj Siscije u Panoniji .....  | 18 |
| Slika 3.2: Drveni stupovi sa željeznim dnom.....   | 19 |
| Slika 3.3: Čelični blokovi pronađeni u Sisku 1985.godine .....                                   | 20 |
| Slika 3.4: Jedna od sjekira pronađena u blizini kovnice u Sisku .....                            | 21 |
| Slika 3.5: Čavli pronađeni na dnu rijeke Kupe 1985.godine.....                                   | 21 |
| Slika 3.6: Čelični blokovi pronađeni na području Hrvatske Dubice.....                            | 22 |
| Slika 4.2: Kutni L profil .....  | 24 |
| Slika 4.3: Uređaj za izradu kalupa .....   | 25 |
| Slika 4.4: Stroj za brušenje.....  | 26 |
| Slika 4.5: Uređaj za poliranje .....   | 27 |
| Slika 4.6: Pripremljeni uzorci.....  | 27 |
| Slika 4.7: Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ .....  | 28 |
| Slika 4.8: Elektronski mikroskop .....   | 29 |
| Slika 4.9: Uređaj za ispitivanje mikrotvrdoće .....  | 30 |
| Slika 4.10: Uređaj za rendgensku fluorescentnu analizu, XRF.....                                 | 31 |
| Slika 5.1: Ispitivani čavao sa područja Siscije .....  | 32 |
| Slika 5.2: Makro slika izrezanih dijelova.....   | 32 |
| Slika 5.3: Mikrostruktura dijela 8b.1 .....  | 33 |
| Slika 5.4: Mikrostruktura dijela 8b.2 .....  | 34 |
| Slika 5.5: Mikrostruktura dijela 8b.3 .....  | 35 |
| Slika 5.6: Mikrostruktura snimljena elektronskim mikroskopom (povećanje 800x).....               | 36 |
| Slika 5.7: Mikrostruktura snimljena elektronskim mikroskopom (povećanje 1000x).....              | 36 |
| Slika 5.8: Mikrostruktura čavla ( povećanje 200x) .....  | 37 |
| Slika 5.9: Mikrostruktura čavla (povećanje 1000x) .....  | 37 |
| Slika 5.10: Mikrostruktura kutnog L profila ( povećanje 200x) .....                              | 38 |
| Slika 5.11: Mikrostruktura kutnog L profila (povećanje 1000x) .....                              | 38 |
| Slika 5.12: Mikrostruktura čavla snimljena na elektronskom mikroskopu (povećanje 3670x)<br>..... | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 5.13: Mikrostruktura kutnika L profila snimljena na elektronskom mikroskopu<br>(povećanje 3570x)..... | 39 |
| Slika: 5.14: Kemijski sastav čavla pronađenog u Sisku.....  | 41 |
| Slika 5.15: Kemijski sastav čavla.....  | 42 |
| Slika 5.16: Kemijski sastav kutnog L profila.....   | 43 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 5.1 Mikrotvrdoća čavla.....            | 40 |
| Tablica 5.2 Mikrotvrdoća kutnog L profila..... | 40 |

## SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu prikazana je kratka povijest razvoja ljevarstva. Najprije je opisan razvoj ljevarstva na području drevnih civilizacija, te razvoj i širenje te tehnologije. Zatim je prikazana povijest lijevanja poslije Krista, točnije od 13. stoljeća pa do današnjeg doba, s istaknutim najvažnijim godinama. U drugom dijelu teoretskog dijela opisana je Siscija – rimski grad na području današnjeg Siska. Opisan je rad kovnice koja je postojala na tom području i kratak opis dijelova koji su ondje pronađeni.

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada provedena su metalografska ispitivanja, ispitivanja mikrotvrdoće i određen je kemijski sastav čavla i kutnog L profila iz današnjeg doba. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa rezultatima provedenim na ljubljanskom sveučilištu na čeličnom čavlu s područja Siscije u rimskog doba.

Ključne riječi: povijest, lijevanje, Siscija, mikrostruktura, kemijski sastav

## 1. UVOD

Tema ovog završnog rada je karakterizacija metalnog elementa s područja Siska iz rimskog doba te njegova usporedba s današnjim sličnim elementima. Na važnost ove teme upućuje okupljanje uglednih predstavnika akademske zajednice zagrebačkog i ljubljanskog sveučilišta 2014. godine, kako bi istražili čelične spojne elemente drvenog rimskog broda pronađenog u Sisku.

U današnje vrijeme postoji velik broj tehnologija kojima se izrađuju predmeti koje koristimo u svakodnevnom životu, primjerice: obrada odvajanjem čestica, zavarivanje, deformiranje, kovanje, lijevanje i dr.

Lijevanje je jedan od najstarijih poznatih postupaka kojim su se dobivali predmeti željenog oblika. Spomenutim postupkom najprije se tali sirovina, metal ili legura pomoću toplinske energije, a zatim te taline ulijevamo u kalupe željenog oblika pod utjecajem gravitacijske ili koje druge sile. Skrućivanjem u kalupu dobiva se željeni predmet. [1]

Taj postupak poznat je više od 5000. godina, a s vremenom se postepeno razvijao i postao jedan od najznačajnijih postupaka obrade metala. Iako su suvremeni postupci lijevanja slični onima u prošlosti, u današnje vrijeme možemo lijevati različite materijale velike složenosti. Također, danas postoji velik broj metoda za dobivanje odljevka. Kroz povijest, uloga lijevanja bila je velika te možemo sa sigurnošću reći da svijet koji danas poznajemo ne bi bio kakvim ga znamo bez ovog otkrića. [2]

Završni rad podijeljen je u šest poglavlja. Na početku dan je kratak povijesni prikaz lijevanja, počevši od drevne Mezopotamije i Egipta pa do 21. stoljeća. Nadalje, opisana je Siscija i njena okolica u rimsko doba te je prikazana proizvodnja čeličnih predmeta. Središnji dio rada posvećen je eksperimentalnom dijelu u kojem su provedena metalografska ispitivanja, određivanje kemijskog sastava i mikrotvrdoće današnjih čeličnih predmeta. Cilj eksperimenta bio je dobivenu mikrostrukturu i kemijske sastave današnjih čeličnih predmeta usporediti sa čeličnim čavlom pronađenim na području Siska u rimsko doba. U predzadnjem poglavlju dani su rezultati ispitivanja. Rad završava zaključnim razmatranjem.

## 2. POVIJEST LIJEVANJA

Najstariji predmeti izrađeni od metala stariji su više od 10 000 godina i bili su kovani. To su bili mali, ukrasni predmeti od samorodnog zlata i bakra. Lijevanje metala je pretpovijesna tehnologija, te se točno vrijeme početka lijevanja se ne zna.[3] Pretpostavlja se da ta tehnologija datira iz bakrenog doba, koje je trajalo od 5000.g. pr. Kr pa sve do 3000.g.pr.Kr. [4]

Procesu lijevanja prethode brojni postupci koji su koristili vatru, a njihov skupni naziv je „pirotehnologija“. Upravo ti postupci bili su temelj za razvoj lijevanja. Tako su neki od postupaka: grijanje kamena kako bi bio bolje obradiv, paljenje vapna za pravljenje žbuke i pečenje gline za izradu keramičkog posuđa.

### 2.1. Lijevanje prije Krista

Prvi odljevci pronađeni su 3200. godina prije Krista u Mezopotamiji pa se ta godina ujedno i smatra početkom lijevanja. Pronalaskom bakra, željeza i ostalih metala počelo je novo doba u povijesti čovječanstva. Počeli su se izrađivati različiti predmeti od metalnih materijala, a jedan od postupaka kojima su se proizvodili bilo je lijevanje. Lijevanje se razvilo na području Mezopotamije, a s vremenom se proširilo i na Egipat, Kinu, Indiju, Tajland, a zatim i u Europu.[5]

#### 2.1.1. Mezopotamija - počeci lijevanja

Mezopotamija je bila plodna nizina omeđena planinama na području današnjeg Iraka. To je jedno od najvažnijih područja u povijesti čovječanstva jer su se na tom području razvile brojne stare civilizacije kao što su: Sumerani, Babilonci, Asirci i dr.[6] Na području Mezopotamije pronađen je najstariji odljevak koji datira iz 3200. g. pr. Kr., a to je bakrena žaba prikazana na slici 2.1. Zbog toga pronalaska Mezopotamija se smatra koljevkom lijevanja.

Prvi metalni materijali s kojima su žitelji Mezopotamije radili bili su zlato, srebro i bakar . Ti materijali imaju dobra mehanička svojstva kao što su savitljivost i kovnost, te ih se zbog toga moglo lako oblikovati i upotrebljavati za mnoge prigode. S vremenom se slučajno otkrilo da se bakru valjanjem poboljšavaju mehanička svojstva, te on postaje bolje obradiv. Također je otkriveno da ga je moguće ekstrahirati i iz drugih materijala. Upravo zbog toga bakar je prvi

materijal koji se lijevao. Bakar ima nisku točku tališta pa ga je relativno lako bilo rastaliti i oblikovati.

Najstariji odljevak koji je pronađen, bakrena žaba, vjerojatno je nastala lijevanjem u pijesak. Razlog zašto se vjeruje u to je otežano postizanje trodimenzionalnosti u kamenom kalupu. Prvi proizvodi koji su se lijevali bili su alati za obradu zemlje i oružje.

Kako su ljudi izrađivali oružje i različite alate od bakra, primijetili su da se određeni bakar lakše lijeva od drugih. Kako nisu znali razlog tomu, na temelju boje bakra određivali su koji je bakar povoljniji za lijevanje. Danas znamo da je ta „bolja boja bakra“ zapravo bila bronca. [5]



Slika 2.1: Bakrena žaba iz 3200.g. pr.Kr pronađena na području Mezopotamije [5]

### 2.1.1.1. Lijevanje u otvorene kalupe

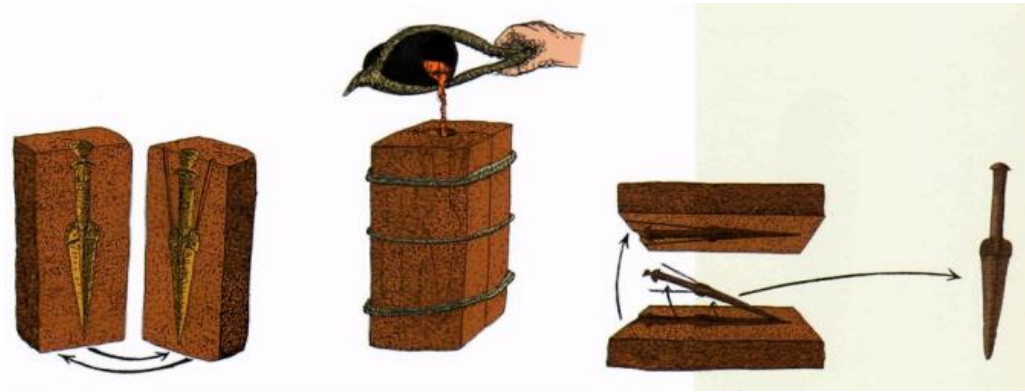
U početku procesa lijevanja koristili su se otvoreni kalupi kako bi se izradili različiti odljevci, a jedan takav prikazan je na slici 2.2. Na samom početku lijevanja korišten je pijesak za izradu kalupa. Ubrzo su zbog svoje složenosti i otežane ponovljivosti izbačeni iz upotrebe, a kao novi materijal kalupa počinje se koristiti kamen, vapnenac i pečena glina.



Slika 2.2: Otvoreni kameni kalup za lijevanje oštrice koplja [7]

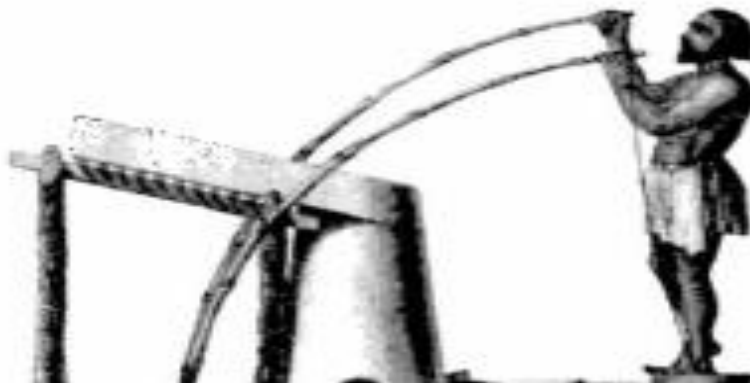
### 2.1.1.2. Lijevanje u zatvorene kalupe

Ljudi su ubrzo shvatili da su zatvoreni kalupi, koji imaju dva dijela, puno bolji od otvorenih. Tako su počeli koristiti kalupe koji su se sastojali od dva simetrična dijela, vidljivi na slici 2.3, kako bi načinili simetrične predmete. Nakon završetka lijevanja, kalup se razbijao kako bi se izvadio dio. Problem ovog načina lijevanja bio je višak rastaljenog metala koji je izlazio na mjestu spajanja dvije polovice kalupa. To se događalo zato što kalupi u koje se lijevali nisu bili precizno rađeni, odnosno postojala je određena zračnost između njih koje je omogućavala izlivanje ulivenog metala. [5]



Slika 2.3: Ilustracija lijevanja bodeža u zatvorenom kalupu. [5]

Razvojem novih materijala kalupa i povećavanjem njihove složenosti, razvijale su i peći za taljenje materijala. U početku se metal talio u retorti iznad plamena. Kako bi plamen bio dovoljno jak za taljenje metala, ljudi bi puhali zrak u njega pomoću bambusova štapa. To je omogućavalo da se kontrolira toplina u peći, a princip rada bilo je jednostavan. Najprije se metal koji se želio taliti stavio na vrh peći. Zatim bi se palila drva ispod nje i po potrebi upuhivao zrak za povećanje temperature. Kako se metal talio, padao je kroz otvor i izlazio van. Tako rastaljen metal skupljao bi se i odmah lijevao u kamene kalupe. Na taj način omogućilo se istovremeno taljenje velike količine materijala uz minimalni uloženi trud. [5]



Slika 2.4: Prve peći za taljenje metala. [5]

### 2.1.2. Egipat

Zbog neposredne blizine i suradnje s Mezopotamijom, Egipćani su se usvojili proces lijevanja s odmakom od nekoliko stotina godina. Otprilike oko 2800. g. pr. Kr. Egipćani su upoznali i savladali proces lijevanja. Zahvaljujući postojećem znanju o izradi posuđa, uspjeli su unaprijediti proces lijevanja.

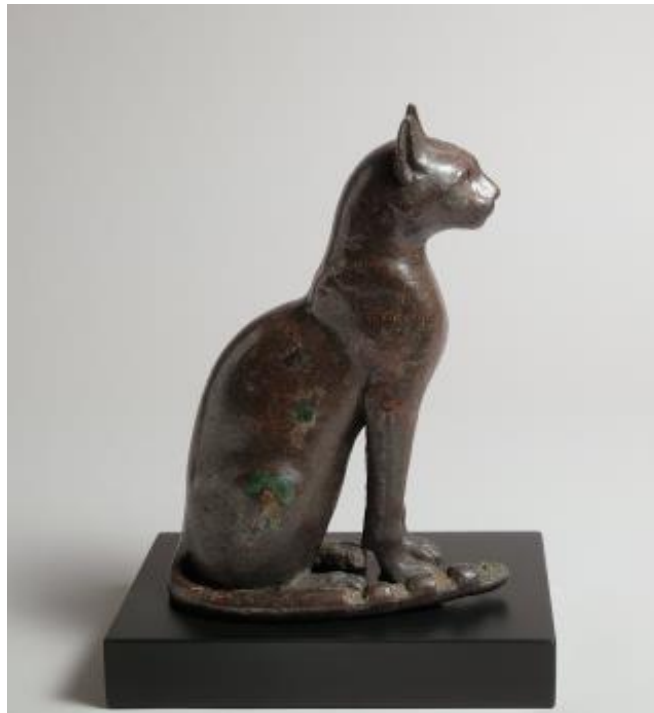
Prvi su uveli u ljevarstvo pojam gornjaka i donjaka koji se i danas koriste. Donjak je bio donji dio kalupa, a sastojao se od ušća i kalupne šupljine. Gornjak je bio gornji dio kalupa i sastojao se od uljevne čaške i kanala za talinu. Rastaljeni metal se ulijevao u čašku i prolazio kanalom do ušća, te nakon toga popunjavao kalupnu šupljinu. Po završetku lijevanja gornjak i donjak su se odvajali, a rezultat toga bio je gotov proizvod. Egipćani su potom počeli uvoditi jezgru u proces lijevanja. Smještali su je u kalupnu šupljinu kako bi dobivali šuplje predmete različitih oblika, a samim time i trošili su manje materijala. Jedan od takvih primjera je i brončana cipela prikazana na slici 2.5. [5]



Slika 2.5: Brončana cipela načinjena pomoću jezgre [5]



Egipćani su napravili značajan korak za ljevarstvo izmislivši precizni lijev. Tim postupkom najprije bi se izradili voštani modeli, čiji je izgled uvelike ovisio o umijeću radnika. Zatim bi se model oprezno oblagao sa glinom, te bi se pekao u peći. Prilikom tog procesa voštani model bi se otopio i istekao van, a ostajao bi samo glineni kalup u koji se ulijevao rastaljeni metal. Na taj način dobivali su se vrlo precizni predmeti komplicirane geometrije kao što su skulpture i nakit. Primjer zahtijevane geometrije i preciznosti vidljiv je na slici 2.6. [8]



Slika 2.6: Skulptura mačke pronađene u Egiptu između 600. i 400. g. pr. Kr. [9]

### **2.1.3. Kina**

Kina, iako je bila velika civilizacija, relativno kasno se počinje baviti ljevarstvom. Brončano doba u Kini počelo je tek 2000 g. pr. Kr. Iako su kasno usvojili proces lijevanja, Kinezi su zaslužni za brojne izume na području ljevarstva. Znanja o tom procesu prenijela su se vrlo vjerojatno preko trgovaca pošto su Kinezi imali jake trgovačke veze. U početku su lijevali sa broncom, i to oko 1800. g. pr. Kr, a ne sa bakrom i zlatom, kao što su to činili u Mezopotamiji i Egiptu.

Zahvaljujući bogatoj i raznolikoj prirodi imali su velika nalazišta bronce i kositra, te su radili različite legure za lijevanje. Tako su razvili leguru koja je imala iznimnu livljivost, što im je omogućavalo lijevanje predmeta sa tankom stjenkom.

Provodeći brojne eksperimente s kontroliranim udjelom pojedinog materijala, napravili su tablice u kojima je bio vidljiv udio pojedinog materijala ovisno o vrsti i boji predmeta koji se želio dobiti. U početku su izrađivali različite posude, bodeže, sjekire, koplja i strelice. S vremenom, glavna svrha lijevanja bronce bila je izrada različitih religijskih objekata i oružja.

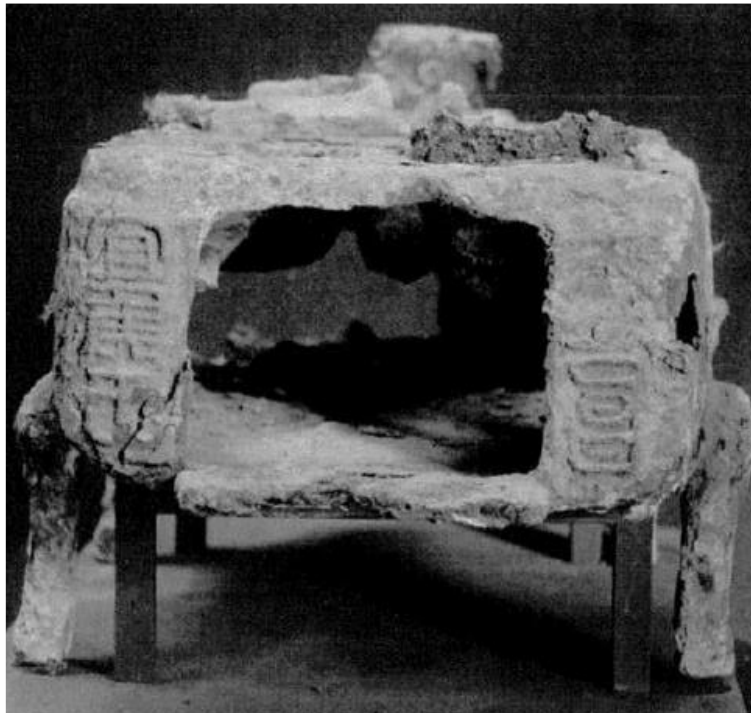
Novi postupak koji su izmislili bilo je lijevanje velikih, kompliciranih predmeta iz više manjih dijelova. Lijevali bi svaki dio zasebno, te bi potom sve zajedno postavili u kalup. Završna faza bila je ulijevanje tekućeg metal između dijelova u kalupu. Nakon njegova skrućivanja dijelovi su bili spojeni u jednu cjelinu. Na slici 2.7 prikazan je brončani slon liven upravo na takav način. [5]



Slika 2.7: Brončani slon lijevan u dva dijela i naknadno spojen lijevanjem [5]

### 2.1.3.1. Lijevanje željeza

Oko 800-te g. pr. Kr Kinezi su proizveli prve željezne odljevke. Bio je to značajan korak u razvoju ljevarstva. Poznavanje svojstva materijala i novi, bolji alati, omogućili su da se lijeva željezo. Željezni odljevci imali su bolja mehanička svojstva od prethodnih pa su stoga omogućili izradu kvalitetnijih alata. Kako je točka tališta čistog željeza oko 1500 °C, te temperature se nisu mogle postići u malim pećima. Stoga su Kinezi morali unaprijediti konstrukciju peći. Razvili su vrhunsku formu mijeha koji je bio sposoban kontinuirano upuhivati zrak u peć i time značajno povećati temperaturu unutar nje. Zahvaljujući takvoj peći mogli su zagrijati željezo do temperature tališta i lijevati različite odljevke. Prva takva peć prikazana je na slici 2.8. [5]



Slika 2.8: Najstarija poznata peć za lijevanje željeza iz dinastije Han [5]

#### 2.1.4. Tajland i Indija

Obje zemlje, Tajland i Indija, također su imale značajnu ulogu u razvoju ljevarstva na Dalekom Istoku. Na Tajlandu su pronađi odljevci koji datiraju iz 1800 g. pr. Kr., a na slici 2.9 prikazani su neki od njih. Pronađene su narukvice, prsteni, koplja, bodeži. Pretpostavlja se da su koristili trajne kalupe načinjene od kamena.



Slika 2.9.: Primjer brončanog koplja [5]

Istraživanja u Indiji su pokazala da su već 3000.g. pr. Kr. ljudi lijevali bakrene alate i oružje u zatvorene kalupe. Ti kalupi bili su od uglavnom od gline. Također su koristili različite metale za lijevanje kao što su: zlato, srebro, kositar i olovo. Ti metali bili su taljeni u lončastim pećima. Iako su Indijci poznavali željezo, nisu ga lijevali sve do 200 g.pr.Kr.

Indijci su također poznavali postupak preciznog lijevanja kako bi izrađivali nakit i razne figurice. Upravo na tim malim figurica, vide se preciznost i umijeće lijevanja Indijaca.[5] Na slici 2.10 prikazana je figura plesačice nastala preciznim lijevanjem.



Slika 2.10: Figurica „Plesačice“ iz 2500 g. pr. Kr [10]

## 2.2 Lijevanje poslije Krista

S vremenom se proces lijevanja proširio u Europu i Afriku. Smatra se da je znanje o lijevanju željeza došlo u Europu sa istoka, točnije iz današnje Palestine i to najprije u Grčku i današnju Italiju. Stoljećima kasnije, Europa postaje centar ljevarstva i ovdje se odvija najmasivnija proizvodnja, a s vremenom raste uloga Amerika u razvoju ljevarstva. U narednim poglavljima bit će istaknute najvažnije godine u razvoju ljevarstva i pripadajući im događaji.[11]

### 2.2.1. Povijest lijevanja od 13. do 17.stoljeća

U Europi se u 13. stoljeću počeo koristiti kalup od ilovače, ponajprije za izradu velikih crkvenih zvona europskih katedrala i izradu topova kao što je jedan od njih prikazan na slici 2.11. Oni su bili lijevani u jednom komadu kako bi se održala njihova funkcionalnost. Zbog pronalaska baruta krajem 13. stoljeća, lijevanje topova u idućih 400 godina bilo je najrašireniji ljevački obrt. [11]



Slika 2.11: Top s najvećim kalibrom odliven u Rusiji 1586. godine [11]

Prvim istinskim ljevačem, tj. „ocem ljevačke industrije“ smatra se Vannoccio Biringuccio, a prikazan je na slici 2.12. On je bio ljevač iz Vatikana te je prvi napisao knjigu o načinima lijevanja metala pod nazivom: „*De La Pirotechnia*“. [12]

U 16. stoljeću u Francuskoj se uveo pijesak kao jedan od materijala kalupa.



Slika 2.12: Vannoccio Biringuccio i njegovo djelo „*De La Pirotechnia*“ [12]

### 2.2.1 Povijest lijevanja od 17. do 20. stoljeća

U 17. stoljeću počelo se intenzivnije razvijati ljevarstvo u Americi. 1619. godine u Južnoj Americi napravljena je prva željezna peć za taljenje metala.

1646. godine u blizini Bostona osnovano je prvo postrojenje za lijevanje željeza „Saugus Iron Works“ koje je proizvodilo lonce. [13]

U 18. stoljeću Engleskoj preuzima vodeću ulogu u razvoju ljevarstva.

**1709. godine** Abraham Darby iz Engleske došao je do dva značajna otkrića koja su unaprijedila proces lijevanja. Razvio je prvi kalupnik čime je moderniziran proces lijevanja, te je prvi upotrijebio koks za proizvodnju sirovog željeza. Na taj način moglo se ekonomičnije proizvoditi sirovo željezu uz postizanje viših temperatura, a koks je postao osnovna sirovina u ljevaonicama željeza.

1750. godine Benjamin Huntsman iznova je počeo koristiti postupak lijevanja čelika u lončastim pećima. Taj je proces, prvotno otkriven u Indiji, s vremenom iščezao. U tom procesu po prvi put čelik je imao ujednačen sastav unutar taline.

Tijekom kasnijih godina 18. stoljeća, počinju se poboljšavati peći za taljenje. Povećava se količina lijevanih predmeta te se mnogi drveni predmeti zamjenjuju željeznim, lijevanim predmetima. Neki od primjera su postavljanje željeznih tračnica umjesto drvenih, postavljanje lijevanih mostova, lijevanje alata za obradu zemlje i dr.

Tijekom 19. stoljeća pojavio se velik napredak u tehnologiji što je ujedno doprinijelo razvoju ljevarstva.

**1809. godine** A. G. Eckhardt of Sohlo razvio je postupak centrifugalnog lijevanja. Pri tom postupku rastaljeni metal se lijevao u metalni kalup koji je rotirao velikim brzinama. Taj postupak brzo je prihvaćen u ljevaonicama cijevi jer je omogućio njihovu jednostavniju izradu.

Početak 19. stoljeća, kako u Europi tako i u Americi, označio je vrijeme razvoja ljevarstva. Tako je 1815. godine u Americi predstavljena kupolna peć, a nešto kasnije usvojen je proces postupak lijevanja čelika u lončastim pećima kojeg je obnovio Benjamin Huntsman u Engleskoj.

1849. godine patentiran je prvi ručno upravljiv stroj za lijevanje olovnih legura u trajne kalupe. Krajem 19. stoljeća počinje se lijevati aluminij koji odmah nalazi primjenu u svakodnevnom životu. Zubar B. F. Philbrook, iznova je primijenio jedan od najstarijih postupaka lijevanja, precizni lijev. Također počinje komercijalna proizvodnja elektrolyčnih peći.

Tijekom 20. stoljeća tehnologija lijevanja značajno je napredovala gotovo na svim područjima. Ponajviše se razvijala zbog Drugog svjetskog rata, pa je u tom periodu postignut veći napredak nego prijašnjih 3000 godina.

Najprije se početkom 1900. uvodi niskotlačno lijevanje, a godinu dana kasnije američka tvornica proizvodi prvi kotač za vagon centrifugalnim postupkom lijevanja. Nekoliko godina kasnije braća Wright za svoj zrakoplov koriste blok motora načinjem lijevanjem aluminija. To je doprinijelo smanjenju mase zrakoplova i omogućilo im prve letove zrakoplovom. 1905. g. H. Doeler patentirao je stroj za tlačni lijev, a prva elektrolyčna peć instalirana je u Sjedinjenim Američkim Državama.

Tijekom 1910-ih došlo je do razvoja metalurškog mikroskopa te se na taj način mogao dobiti uvid u mikrostrukturu odljevaka. Par godina kasnije počinju eksperimenti sa bentonitom. Početak Prvog svjetskog rata označio je dodatni napredak na području ljevarstva. Tako se sve više počinje upotrebljavati aluminij u avio industriji, te se otvara prva, potpuno automatizirana ljevaonica koja je proizvodila ručne granate.

20-ih i 30-ih godina radi se na različitim modifikacijama aluminijevog lijeva. Pokušava se različitim dodacima poboljšati svojstva aluminijevih odljevka, a to je uspjelo Paczu dodavanjem natrija u rastaljeni aluminij. 1924. godine Henry Ford započeo je masovnu proizvodnju automobila, te je zahtijevana bolja kontrola odljevaka. Upravo zbog toga, a i proizvodnje velikog broja odljevaka u avio industriji, odljevci se počinju kontrolirati pomoću rendgenskih zraka.

1940. g. Chvorinov je uspio matematički povezati vrijeme skrućivanja odljevka s geometrijom kalupa. 1943.g Keith Millis. dolazi do otkrića da dodavanjem magnezija u talinu sivog lijeva rezultira promjenom oblika izlučenog grafita. Grafit se izlučuje u obliku nodula.



Za vrijeme Drugog svjetskog rata, Nijemac Johannes Croning koji je prikazan na slici 2.13, razvio je kemijsko vezivo kako bi se povećala produktivnost i postigla veća točnost odljevka. To je omogućilo izradu školjkasti kalupa, a postupak je dobio po njemu ime. Croning postupak postepeno se razvijao i širio kao i primjena fenolnih i furanskih smola u ljevarstvu. U tom periodu stekle su se značajne spoznaje o lijevanju u pješćane kalupe, proučavala se priprema kalupne mješavine i fizikalna svojstva pijeskova. 1953. izumljen je postupak izrade jezgri u vrućim jezgrenicima, a godinu dana kasnije izumljen je CO<sub>2</sub> postupak izrade jezgri i kalupa. Krajem 50-tih godina Harold F. Shroyer je patentirao postupak lijevanja u pune kalupe, a General Electric počinje primjenjivati digitalno računalo kako bi riješili neke probleme tijekom postupka lijevanja.



Slika 2.13: Johannes Croning [14]

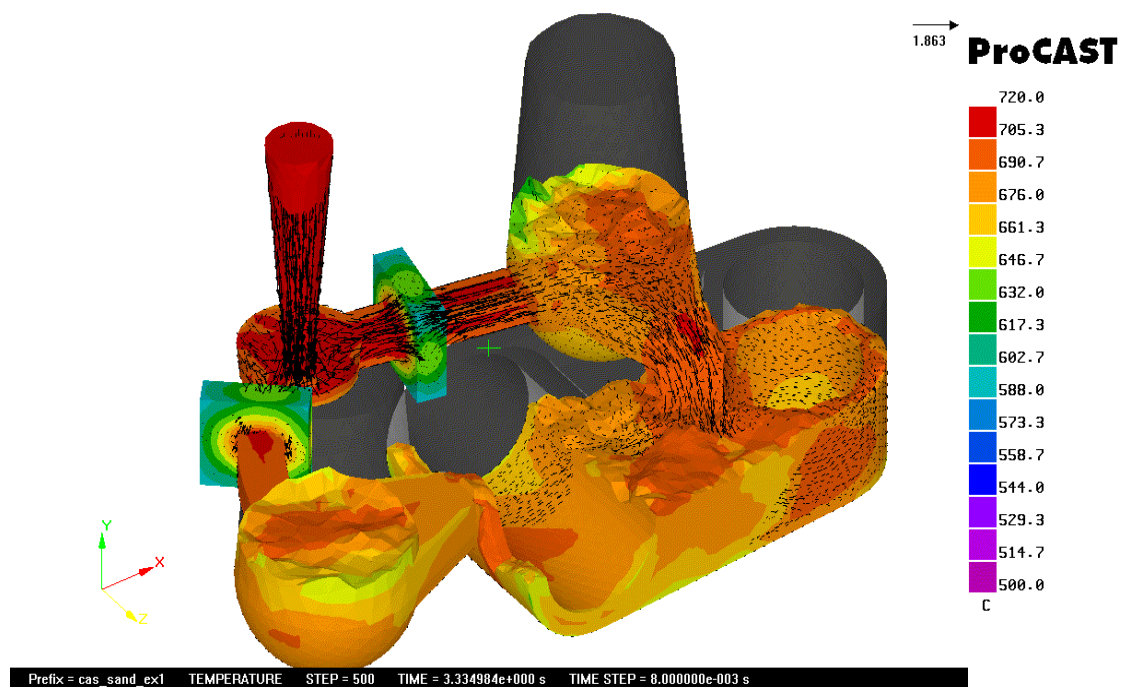
Tijekom 70-tih godina razvijen je „coldbox“ postupak, tj. izrada jezgri u hladnim jezgrenicima kojeg su nekoliko godina prije predstavili Larry Toriello i Janis Robins. Počinje se intenzivnije raditi na smanjenju potrošnje energije tijekom proizvodnje jezgri i kalupa. Postupak proizvodnje jezgri u toplim jezgrenicima predstavljen je početkom 80-ih godina. U procesu lijevanja sve više se počinje upotrebljavati računalo koje simulira proces skrućivanja i tečenja taline, te se razvijaju 3D vizualne tehnike.

90-ih godina razvijena je oprema za lijevanje metala u djelomično rastaljenom stanju. Povećava se preciznost i kvaliteta odljevka koji se masovno proizvode, ponajviše za automobilsku industriju. Razvijen je i postupak za čišćenje jezgrenika i ljevarske opreme tzv. „suhi led“. Predstavljeno je i lijevanje tiskanjem za velikoserijsku proizvodnju komponenti automobila. Sredinom 90-ih razvijena je simulacija kojom se moglo simulirati promjene u mikrostrukturi te su se na taj način bolje razumjeli procesi koji se odvijali za vrijeme lijevanja. To je omogućilo

uspješnije predviđanje svojstva odljevka. Počinje i proizvodnja lijevanih kompozita od aluminijskih legura kako bi se smanjila masa dijelova koji se koriste u automobilskoj industriji.

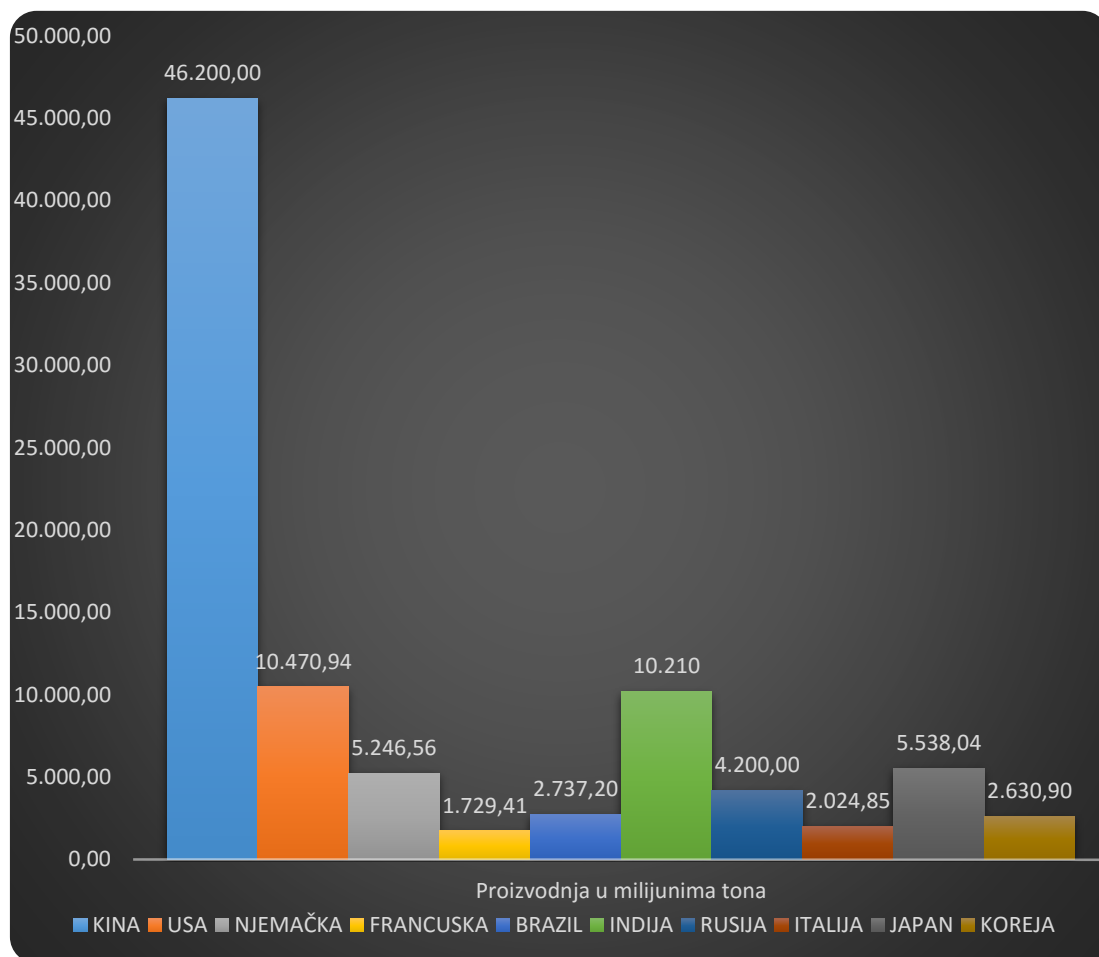
### 2.2.2 Ljevarstvo u današnje vrijeme

Danas je ljevarstvo visoko automatiziran proces, uglavnom kontroliran pomoću računala. Postignuta je velika fleksibilnost automatskih linija u serijskoj i pojedinačnoj proizvodnji. Zahvaljujući primjeni računala i mikroelektronici omogućeno je izravno upravljanje proizvodnim procesom, pa odljevci mogu biti tankih stjenki, ujednačene kvalitete i velike točnosti izmjera.[15] Primjenom 3D softwera kao što su: *MagmaSoft*, *Flow 3D*, *ProCast*, *Salsa 3D* moguće je dobiti optimalne parametre lijevanja. Tako primjerice možemo predvidjeti kako će talina popunjavati kalupnu šupljinu, potencijalna kritična mjesta, odnosno mjesta pojave mjehurića i usahlina. Na slici 2.14 prikazana je simulacija popunjavanja kalupne šupljine u programu ProCast. [16]



Slika 2.14: Simulacija popunjavanja kalupne šupljine u „ProCAST-u“ [16]

Prema podacima iz 2014. godine proizvodnja odljevaka povećana je za 103 milijuna tona u odnosu na 2013. godinu. Time se nastavio pozitivan trend u ljevarstvu, a u narednim godinama planirano je dodatno povećanje proizvodnje. Najveći proizvođač odljevaka je Kina, a slijedi SAD. Na slici 2.15 prikazano je 10 najvećih zemalja proizvođača odljevaka. [17]



Slika 2.15: Top 10 zemalja u proizvodnji odljevaka [17]

### 3. SISCIA - CENTAR PANONIJE

Nakon brojnih neuspjelih pokušaja, Panoniju su 35.g. pr. Kr. uspjeli osvojiti Rimljani. Kako je broj legija koje su dolazile u Panoniju brzo rastao, ubrzo je postala jedna od najvažnijih vojnih provincija u cijelom rimskom carstvu. Razlog leži u njenom povoljnom geografskom položaju, a kao najvažnije naselje istaknula se Siscia, tj. današnji Sisak. [18]

Siscija je povezivala tadašnju Panoniju sa Dalmacijom. Jedna od najvećih prednosti Siscije je bio njen položaj na rijeci Savi. Rijeka Sava nije bila pretjerano široka, no za vrijeme poplava izljuje se iz svog korita i stvarala nizove povezanih močvara kojim se moglo ploviti.



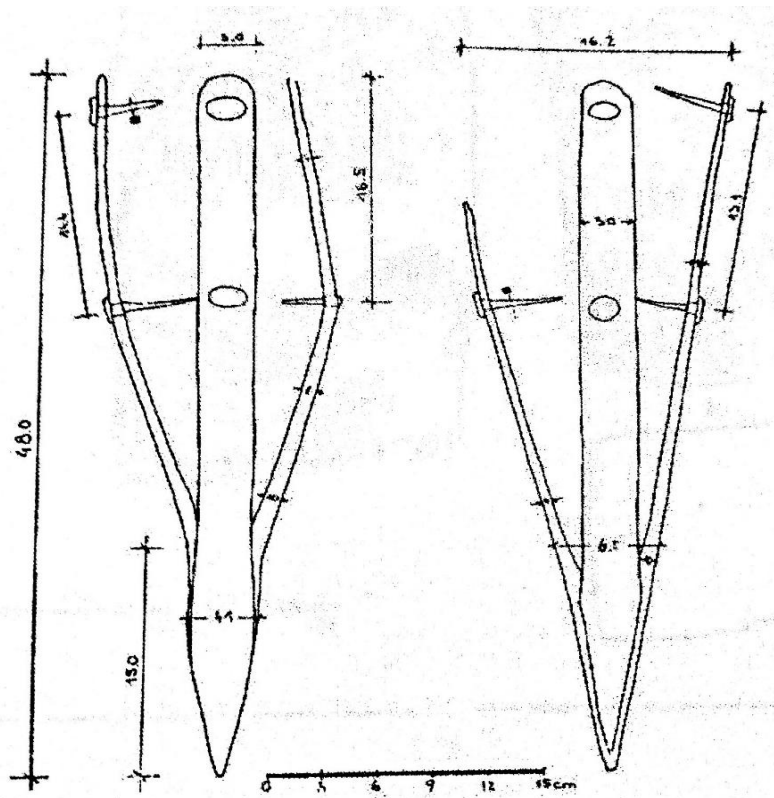
Slika 3.1: Položaj Siscije u Panoniji [19]

Manjak obradive zemlje kao i blizina utjecanja Kupe u Savu, omogućilo je da se na tom području razviju određeni zanati i uspostavi trgovina. Tako je Siscia postala važno trgovačko središte, odnosno centar gdje su se prodavale žitarice i jedan od najznačajnijih centara u preradbi vune.

### 3.1 Kovnica u Sisciji

Siscija je kroz cijelu svoju povijest bila usko povezana sa proizvodnjom čelika i čeličnih predmeta. Upravo su joj ti predmeti bili najvažnija industrijska roba. Jedan od razloga zašto je Siscia bila toliko poveza sa proizvodnjom željeza bila je blizina velikog nalazišta željezne rude. Goleme količine željezne rude nalazile su se na području južno od Siscije, točnije na Trgovskoj gori. Osim željezne rude to je bilo područje bogato olovnom i bakrenom rudom.

1985. godine, M. Šmalcelj došao je do velikog otkrića. Na desnoj obali rijeke Kupe u Sisku, za vrijeme niskog vodostaja, pronašao je preko dvjesto drvenih stupova sa čeličnim dnom. Primjer tih drvenih stupova prikazan je na slici 3.2. Smatra se kako su ti stupovi služili za utvrđivanje obale rijeke Kupe, a ona se prema nekim navodima utvrđivala svakih sedam godina.



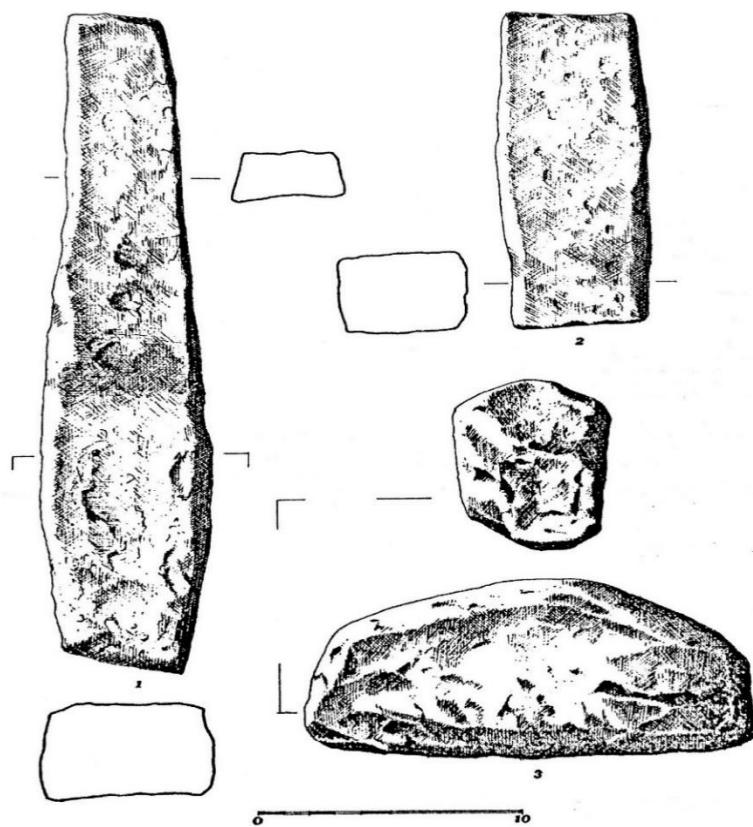
Slika 3.2: Drveni stupovi sa željeznim dnom

Na području gdje su pronađeni drveni stupovi sa željeznim dnom, nalazila se kovnica u rimsko doba. Položaj kovnice sugerira da su kovački mještari bili postavljeni tako da su mogli biti pokretani snagom rijeke, što je bila velika prednost jer je omogućavalo veću proizvodnju. Kovnica je radila od 263. do 423. godine, tj. od vladavine cara Galijena pa do smrti Teodozija II. To razdoblje ujedno je i razdoblje najveće proizvodnje čelika u cijelom rimskom carstvu.

### 3.2 Čelični blokovi

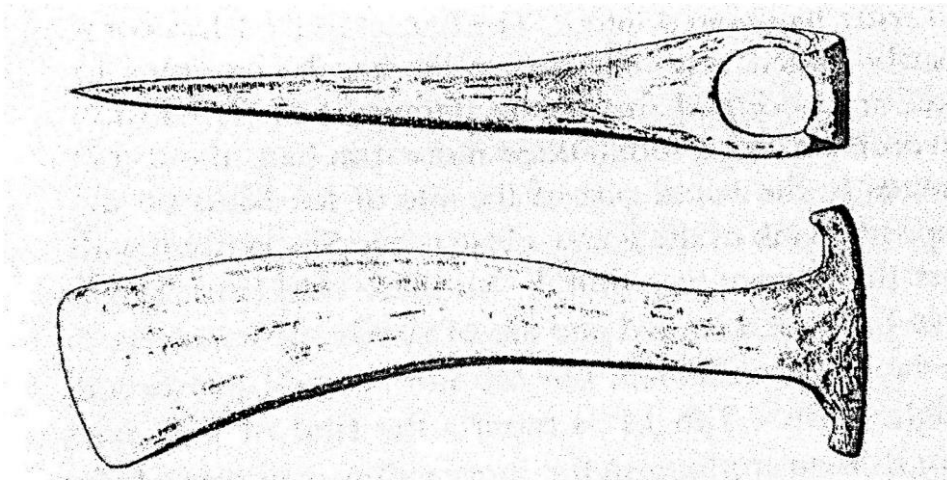
Osim kovnice, tu se vrlo vjerojatno nalazilo pristanište za brodove koji su prevozili čelične blokove. Čelični blokovi koji su bili napravljeni u kovnici, transportirali su se vodenim putem do brojnih manjih kovačnica. Ti čelični blokovi služili su za izradu mačeva, sjekira i ostale opreme potrebne za opremanje rimske vojske.

Profesor M. Bursik iz Siska 1985. godine pronašao je sedam čeličnih blokova. Četiri od njih, prikazani na slici 3.3, čuvaju se u sisačkom muzeju, dva su dana odjelu za arheologiju u Zagrebu, a jedan se smatra nestalim.



Slika 3.3: Čelični blokovi pronađeni u Sisku 1985.godine

Osim čeličnih blokova, te iste godine pronađena je hrpa od devetnaest identičnih čeličnih sjekira čija je dužine 236 mm. Primjer jedne takve sjekire dan je slikom 3.4. U narednim godinama za vrijeme niskog vodostaja provodila su se brojna istraživanja na tom području. Tako je u razdoblju od 1985. do 1995. pronađena velika količina rimskog novca kao i različiti čelični predmeti kao što su čavli, zakovice, spojni elementi drvenih rimskih brodova i drugo. Neki od tih elementa, točnije čavli, prikazani su na slici 3.5.



Slika 3.4: Jedna od sjekira pronađena u blizini kovnice u Sisku



Slika 3.5: Čavli pronađeni na dnu rijeke Kupe 1985.godine

1997. godine, arheolog T. Lolić, jugozapadno od nekadašnjeg mjesta kovnice pronašao je još tri čelična bloka. Svi čelični blokovi pronađeni na području nekadašnje Siscije, sličnih su dimenzija i dobro su iskovani.

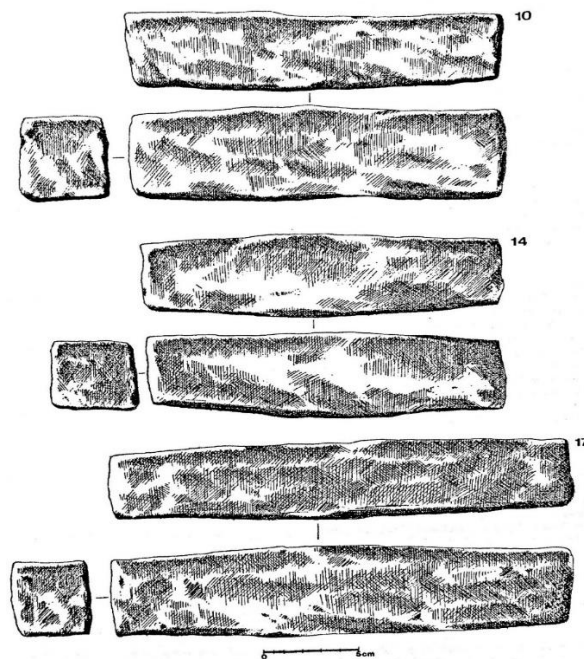
S vremenom je proizvodnja čelika sve više opadala. Tek bi se povremeno intenzivirala i obnavljala. Njen zadnji procvat bio je za vrijeme vladavine kralja Teodorika Velikog.

### 3.3 Metalurgija u okolici Siscije

Kako je Siscija bila najveći centar proizvodnje čeličnih dijelova, njena proizvodnja se postepeno proširila i na okolna područja. Među ostacima šljake u blizini nekadašnje Siscije pronađeni su ostaci glinenih peći, kao i keramičke cijevi različitih dimenzija ispunjene željezom. Opseg rimske rudarske djelatnosti na ovim područjima vidljiv je iz velike količine rimskih novčića koji su pronađeni.

Prema istraživanjima provedenim 1972. godine na području današnje Bosne i Hercegovine, količina šljake u rimskom dobu iznosila je oko 2 milijuna tona. Iako su provedena brojna istraživanja na ovom području, većina njih bila je usmjerena na područja oko velikih građevina, a ne i na područja odlagališta šljake. Na taj način nije dobiven uvid u tehnologiju izrade željeza.

O postojanju velikog broja kovačkih radionica svjedoči pronalazak čeličnih blokova na području Hrvatske Dubice. Nizvodno od Hrvatske Dubice pronađeno je 97 metalnih blokova koji su služili kao materijal za izradu različitih željeznih predmeta. Do danas je očuvano 28 blokova koji se čuvaju u Arheološkom muzeju u Zagrebu. Kvadratnog su presjeka, a njihova duljina varira između 185 i 230 mm kao što se vidi na slici 3.6. Na temelju mase i dimenzija, blokovi su grupirani, te se može zaključiti da je postojao visok stupanj standardizacije njihove izrade.



Slika 3.6: Čelični blokovi pronađeni na području Hrvatske Dubice



## 4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu završnog rada cilj je bio dobiti mikrostrukturu čavla pronađenog u Sisku 1985. godine, te ga usporediti sa današnjim čeličnim profilima, točnije sa današnjim čavlom i kutnim L profilom.

Nakon toga izrađen je plan kojim je određena vrsta i redosljed ispitivanja čeličnih uzoraka:

- priprema uzoraka
- promatranje mikrostrukture pomoću svjetlosnog i elektronskog mikroskopa
- ispitivanje mikrotvrdoće
- određivanje kemijskog sastava

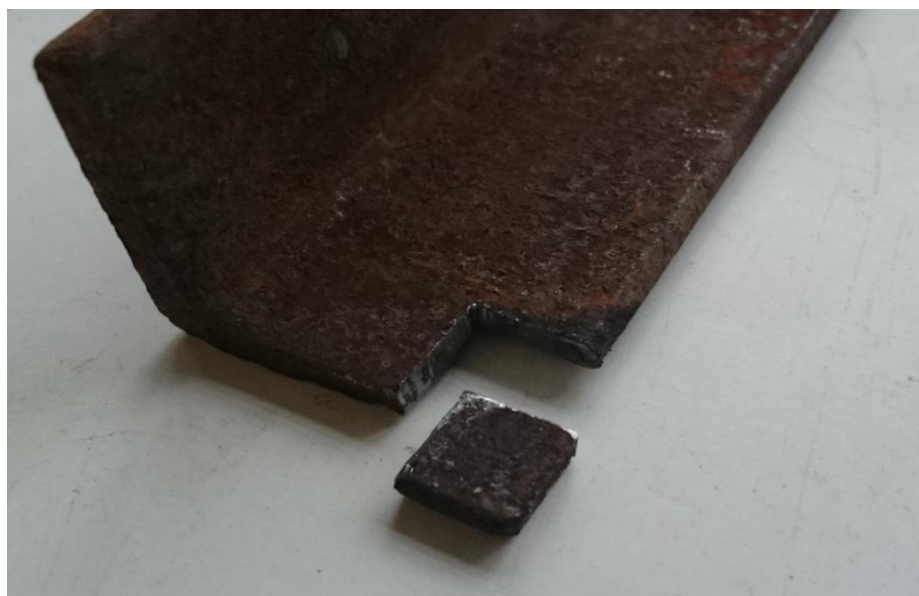
### 4.1 Priprema uzoraka

Kako bi se odabrani uzorci mogli metalografski ispitivati, najprije ih je trebalo pripremiti.

U prvom koraku izrezao se malen dio čavla i kutnog L profila radi njihove lakše daljnje pripreme. Uzorci su izrezani u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a njihove izgred prikazan je slikama 4.1 i 4.2. Uzorci su izrezani pomoću ručne pile kako bi se izbjeglo zagrijavanje i promjene u mikrostrukturi ispitivanih uzoraka.



Slika 4.1: Čavao



Slika 4.2: Kutni L profil

Postupak pripreme uzoraka sastoji se od:

- brušenja
- poliranja
- nagrizanja

Izrezani uzorci čavla i kutnog L profila zalijevaju se u kalup kako bi ih bilo moguće promatrati pod mikroskopom. Nakon što se uzorci postave u kalup stroja prikazanog na slici 4.3, dodaje se prah. Postoji više vrsta prahova, no ovdje se koristio crni prah, koji ima bolju vodljivost i omogućuje bolju sliku na elektronskom mikroskopu. U kalup stroja dodamo grijač te slijedi petnaestominutno zagrijavanje pri temperaturi od 150°C i tlaku od 2,5 bara.



Slika 4.3: Uređaj za izradu kalupa

Nakon što se kalup ohladi slijedi njegovo brušenje i poliranje. Uzorci su ručno brušeni na stroju „Phoenix Alpha“ proizvođača Buehler prikazanog na slici 4.4. Brušenje se izvelo voodtopornim brusnim papirima različite hrapavosti u 5 koraka s izmjenama papira sljedećim redoslijedom:

1. P320
2. P500
3. P1000
4. P2000
5. P4000

Brušenje se vršilo pri brzini od  $300 \text{ min}^{-1}$ , a kao sredstvo za hlađenje i čišćenje koristila se voda.



Slika 4.4: Stroj za brušenje

Poliranje uzoraka napravljeno je na stroju „Struers DAP-V“, vidljivom na slici 4.5, koji ima različite mogućnosti brzina vrtnje od 0 pa do  $600 \text{ min}^{-1}$ . Za poliranje se uobičajeno koristi brzina od  $150 \text{ min}^{-1}$ , a kao sredstvo za hlađenje koristio se lubrikant - mješavina vode i alkohola. Poliranje se odvijalo u dva koraka, a slika stroja je prikazana ispod opisa koraka.

- u prvom koraku korištena je tkanina MD-DAC, a na tkaninu se nanijela dijamantna pasta debljine 3 mikrometara koja se zatim razmazala po uzorku. Poliranje je trajalo 3 minute, a sila pritiskanja iznosila je 30 N.
- u drugom koraku korištena je tkanina MD-NAP, a na tkaninu se nanijela dijamantna pasta debljine 1 mikrometar. Poliranje je trajalo 3 min, a sila pritiskanja je iznosila 25N.



Slika 4.5: Uređaj za poliranje

Završna faza u pripremi uzoraka je njihovo nagrivanje. Pošto je površina uzoraka glatka, ne može se vidjeti mikrostruktura te ju je potrebo nagrivi. Nagrivanje je izvršeno u 3% dušičnoj kiselini u etilnom alkoholu, i to u trajanju od dvije sekunde.

Izgled pripremljenog uzorka vidljiv je na slici 4.6.



Slika 4.6: Pripremljeni uzorci

## 4.2 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja napravljena su pomoću svjetlosnog mikroskopa „Olympus GX 51“, te pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa „Tescan Vega 5136 FM“.

Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ prikazan na slici 4.7, ima raspon povećanja od 50 do 1000 puta. Svjetlosni mikroskop za povećanje slike predmeta koristi snop svjetlosti koji osvjetljava promatrani predmet, te zatim prolazi kroz optički sustav mikroskopa koji omogućuje stvaranje uvećane slike. Optički sustav mikroskopa sastoji se od niza leća. [20]



Slika 4.7: Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“

Elektronski mikroskop ima mogućnost znatno većeg povećanja u odnosu na svjetlosni mikroskop. Postoji mogućnost zumiranja do 200 000 puta, a uobičajeno se koristi povećanje od 10 000 do 20 000 puta. Radi bolje vodljivosti elektrona, na uzorke se lijepi grafitna traka, ili se oni fizikalno neparivaju. Na uzorke u ovom eksperimentalnom radu lijepila se grafitna traka. Kod skenirajućeg elektronskog mikroskopa pomoću sustava elektronskih kondenzorskih leća, elektroni se usmjeravaju u vrlo uzak snop, koji se pomoću leća usmjeri na površinu uzorka i tako ju, točku po točku pretražuje. Djelovanjem snopa elektrona na površinu uzrokuje se emisija sekundarnih elektrona, koje je u emisijskom načinu rada moguće registrirati kao sliku na zaslonu. [21]



Slika 4.8: Elektronski mikroskop

### 4.3 Ispitivanje mikrotvrdoće

Kako bi odredili mikrotvrdoću uzoraka korištena je Vickersova metoda. Ispitivanje se provelo na tvrdomeru proizvedenom u SSSR-u, a prikazan je na slici 4.9. Ova metoda temelji se na mjerenju veličine otiska koji je nastao nakon utiskivanja dijamantnog penetratora pod određenim opterećenjem. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Nakon toga pomoću mjernog uređaja mjere se duljine dijagonale baze piramide otisnute u materijalu. [22]

Za mjerenje mikrotvrdoće primjenjivana je sila utiskivanja od 1,96 N.



Slika 4.9: Uređaj za ispitivanje mikrotvrdoće

#### 4.4 Određivanje kemijskog sastava

Kemijski sastav utvrđen je pomoću Olympusovog uređaja za rendgensku fluorescentnu analizu-XRF. Ova metoda bazira se na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem, što rezultira emisijom fluorescentnog zračenja iz materijala. Te informacije daju nam kvalitetnu i kvantitativnu sliku o elementnom sastavu uzoraka. [23]





Slika 4.10: Uređaj za rendgensku fluorescentnu analizu, XRF

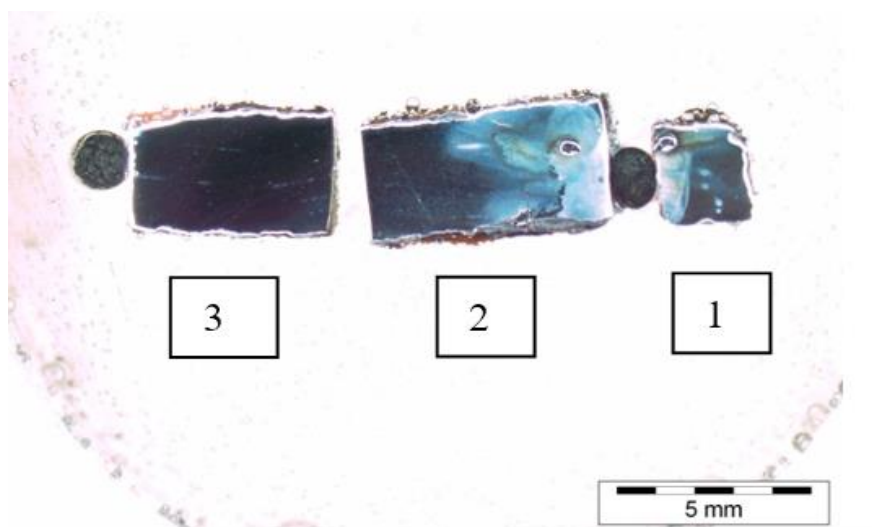
## 5. REZULTATI ISPITIVANJA

### 5.1 Rezultati metalografskih ispitivanja

Ispitivanja mikrostrukture čavla pronađenog u Sisku 1985.g. prikazanog na slici 5.1, provedena su na ljubljanskom sveučilištu („Naravoslovna tehniška fakulteta“) 2014. godine. Čavlu je dodijeljena oznaka 8b, te su pod tom oznakom prikazane mikrostrukture. Kako bi se mogla promatrati mikrostruktura, čavao je izrezan na tri manja dijela. Sva tri dijela različitih su dimenzija. Njihova makro slika prikazana je na slici 5.2, a sva tri uzorka promatrana su pomoću svjetlosnog mikroskopa. Dobivene mikrostrukture prikazane su pri povećanju od 50, 100, 200, 500 i 1000 puta.

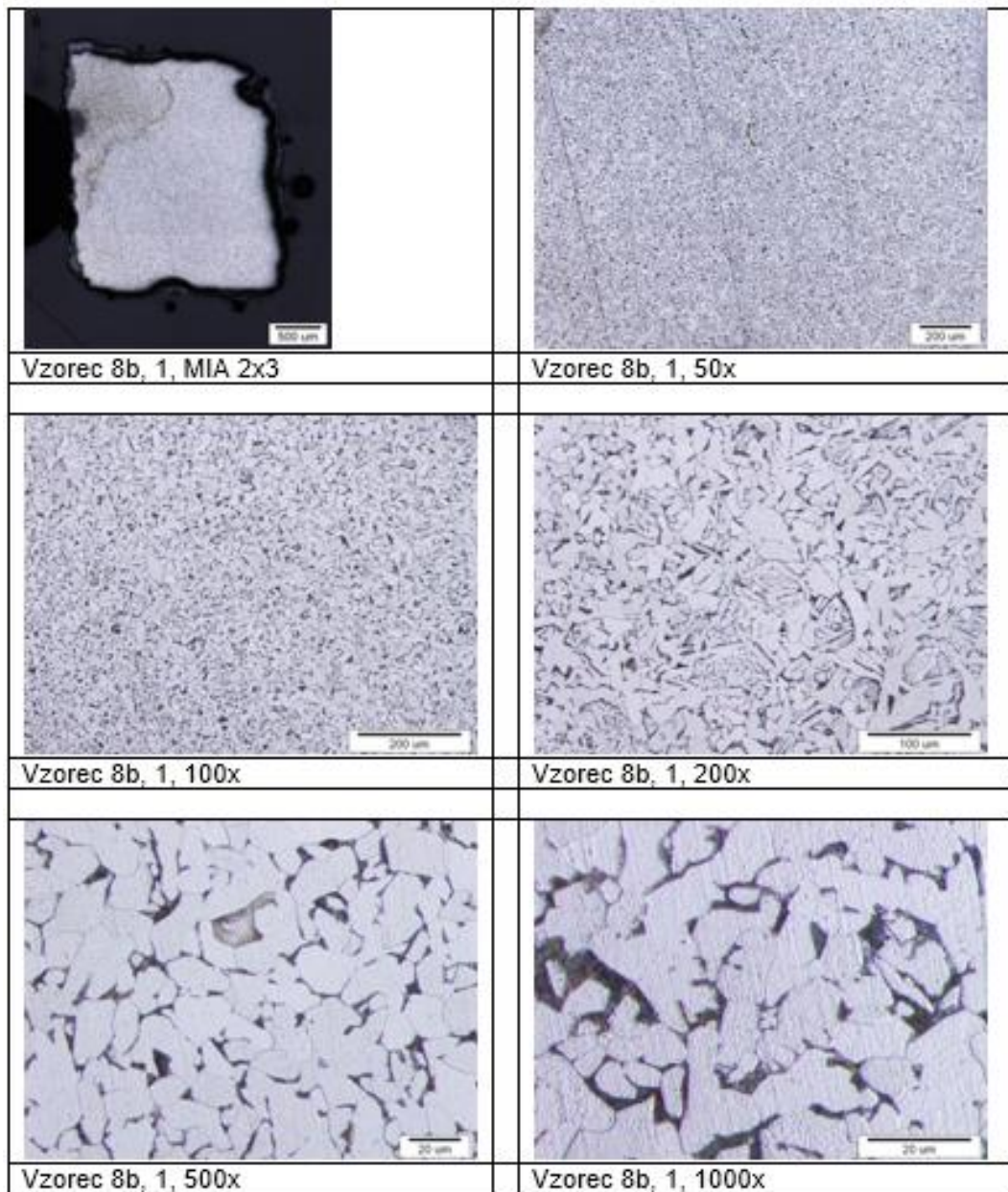


Slika 5.1: Ispitivani čavao sa područja Siscije



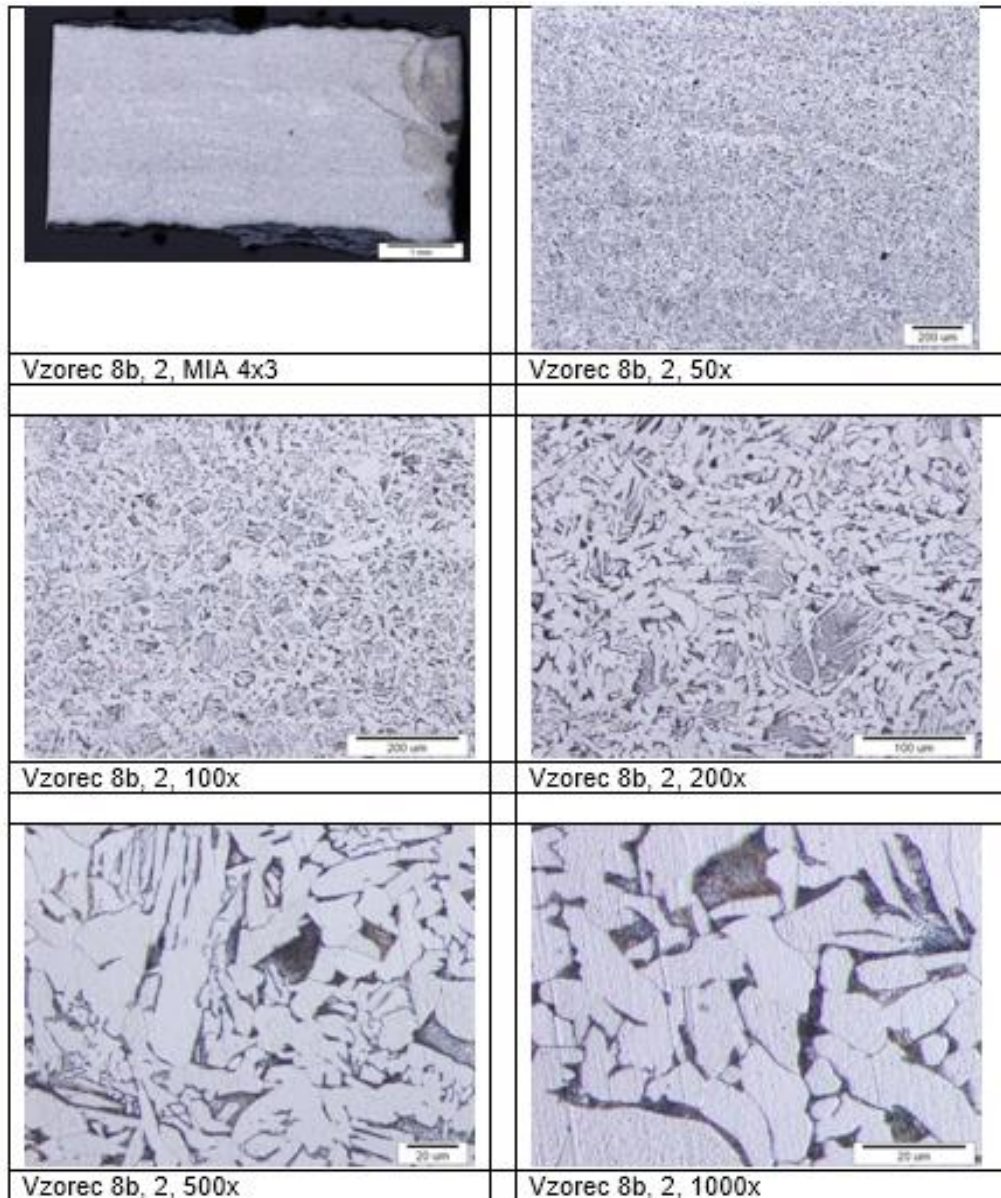
Slika 5.2: Makro slika izrezanih dijelova

Prvi izrezani dio oznake 8b.1 dimenzije je 2x3 milimetra, a njegova mikrostruktura prikazana je na slici 5.3.



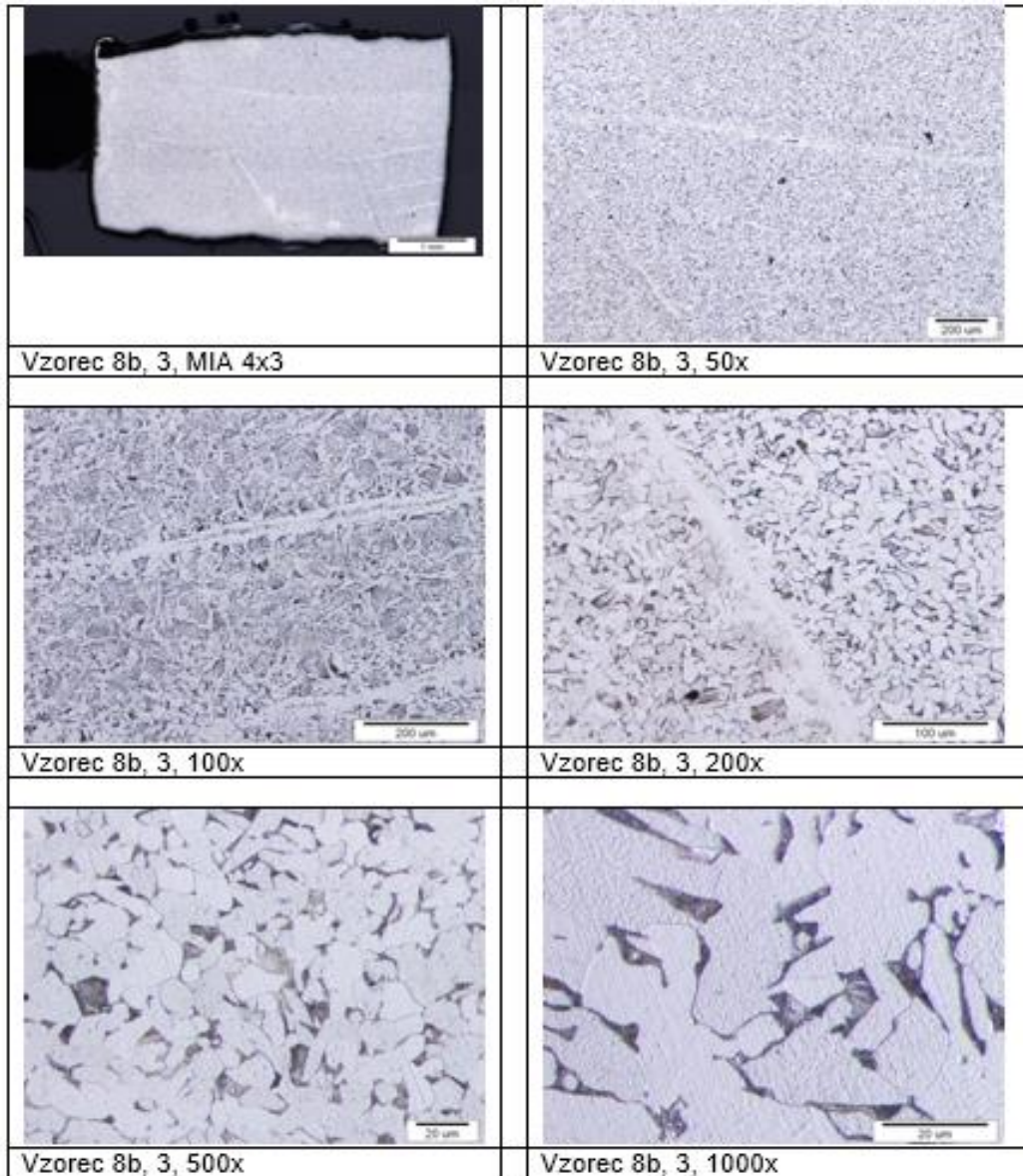
Slika 5.3: Mikrostruktura dijela 8b.1

Drugi izrezani dio, 8b.2 dimenzija je 4x3 milimetra. Njegova mikrostruktura prikazana je na slici 5.4.



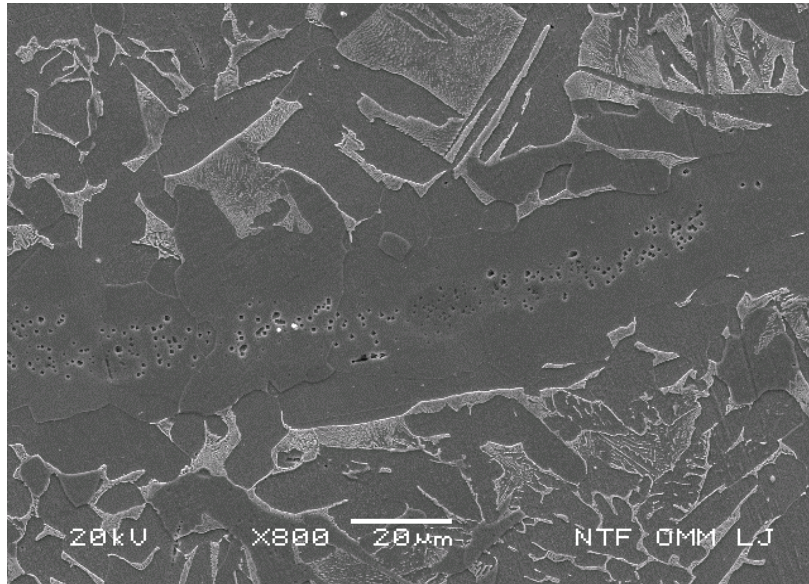
Slika 5.4: Mikrostruktura dijela 8b.2

Treći izrezani dio ima oznaku 8b.3, a njegove dimenzije su 4x3 milimetra. Na slici 5.5 prikazana je njegova mikrostruktura.

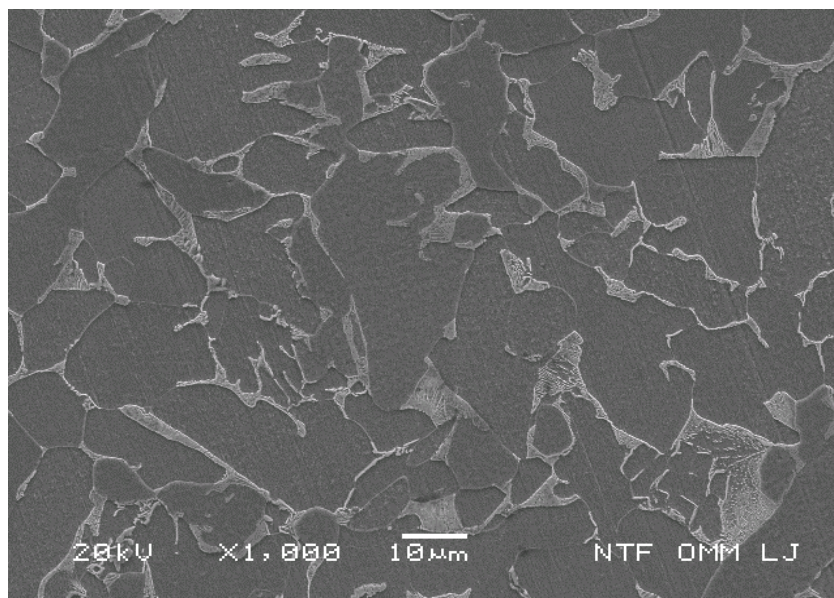


Slika 5.5: Mikrostruktura dijela 8b.3

Uzorak se također promatrao pomoću elektronskog mikroskopa na Naravoslovnom tehničkom fakultetu u Ljubljani. Na slikama 5.6 i 5.7 prikazana je mikrostruktura dobivenih pomoću elektronskoga mikroskopa.

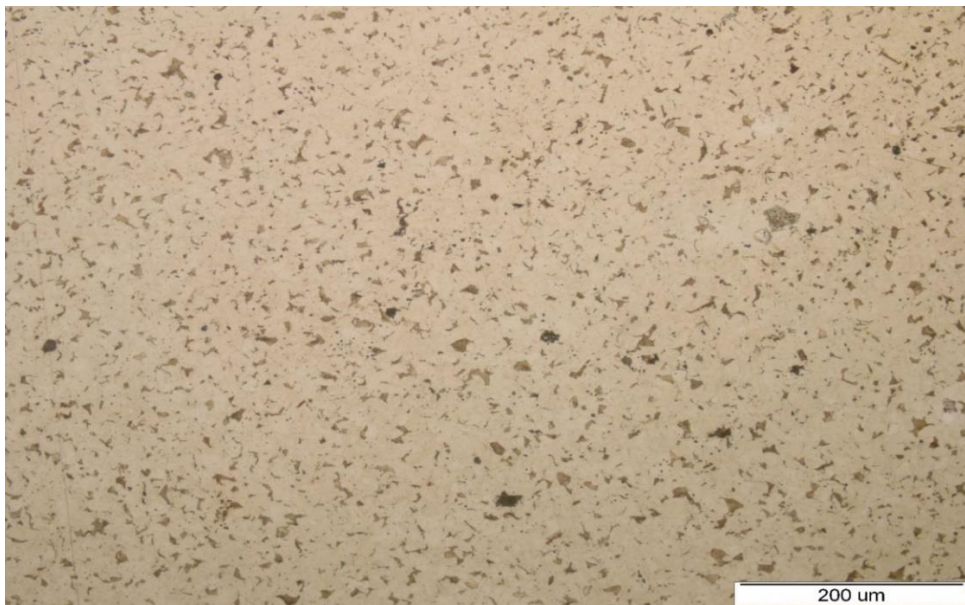


Slika 5.6: Mikrostruktura snimljena elektronskim mikroskopom (povećanje 800x)

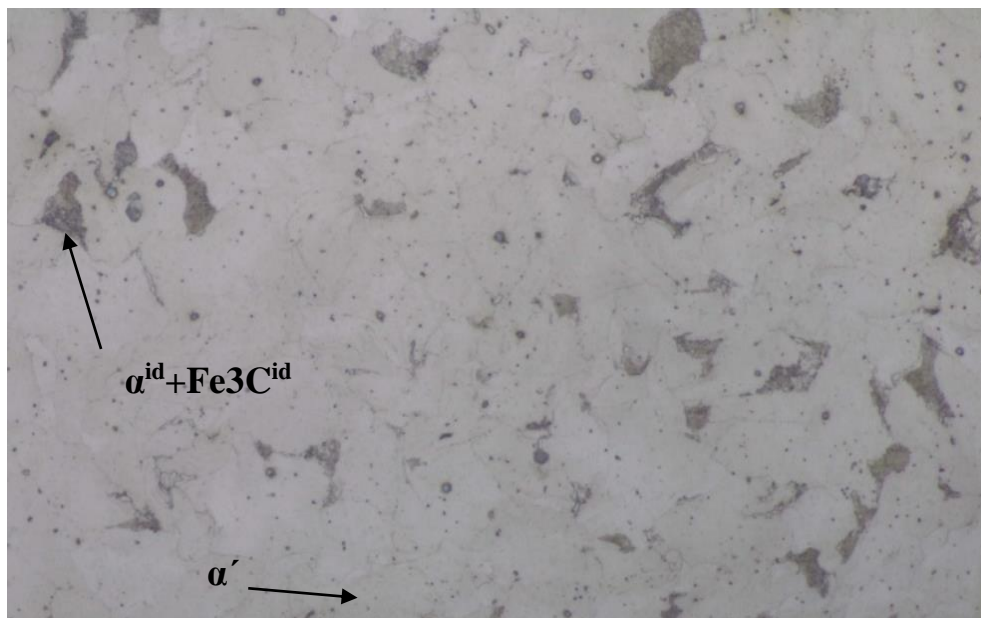


Slika 5.7: Mikrostruktura snimljena elektronskim mikroskopom (povećanje 1000x)

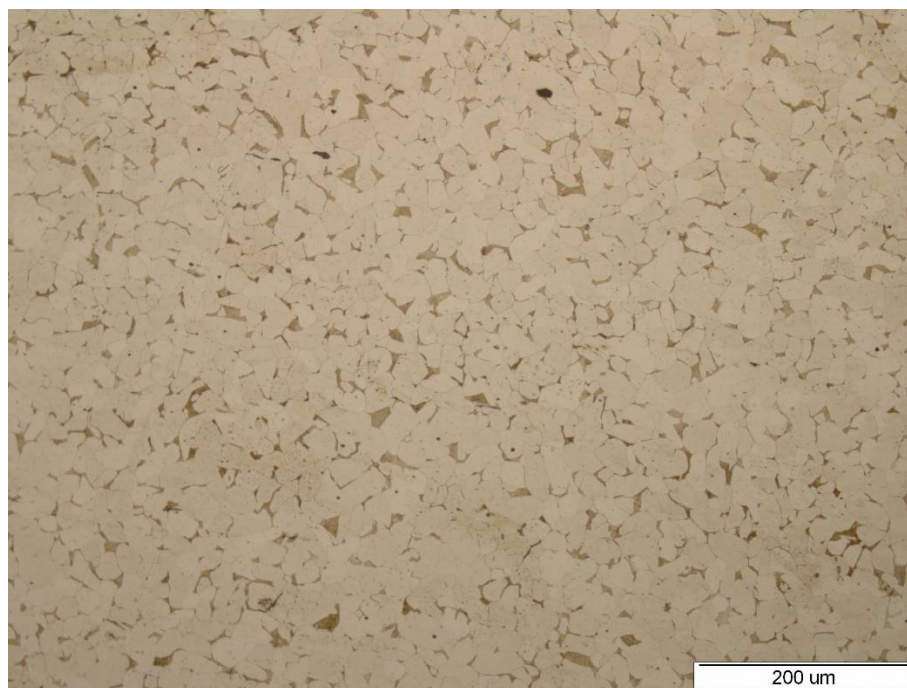
Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pomoću svjetlosnog mikroskopa snimljen je uzorak današnjeg čavla i kutnog L profila. Dobivene mikrostrukture čavla prikazane na slikama 5.8 i 5.9, a kutnog L profila na slikama 5.10 i 5.11.



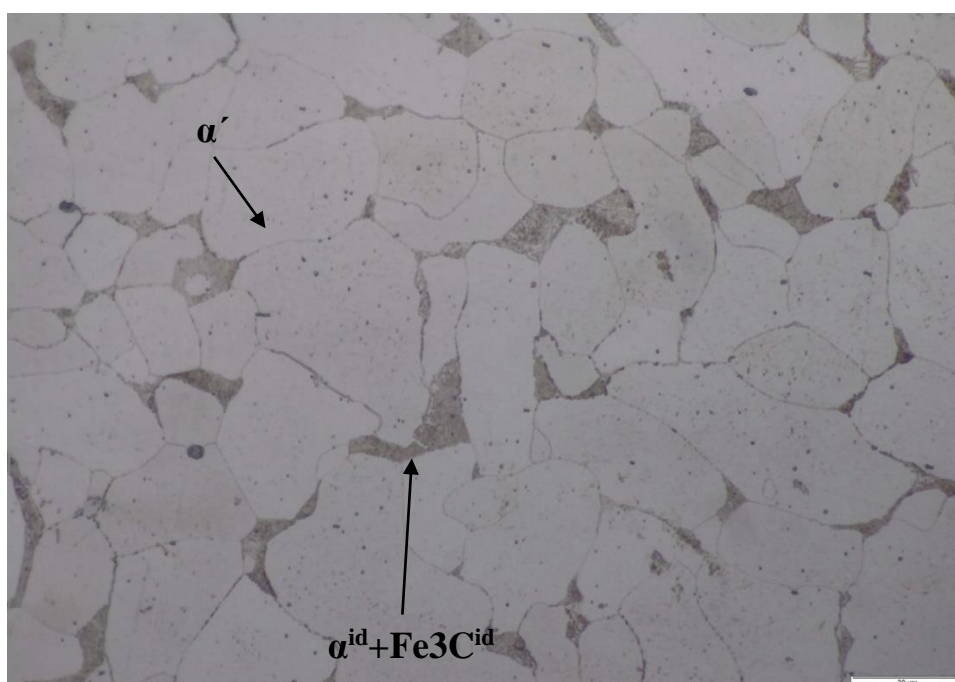
Slika 5.8: Mikrostruktura čavla (povećanje 200x)



Slika 5.9: Mikrostruktura čavla (povećanje 1000x)



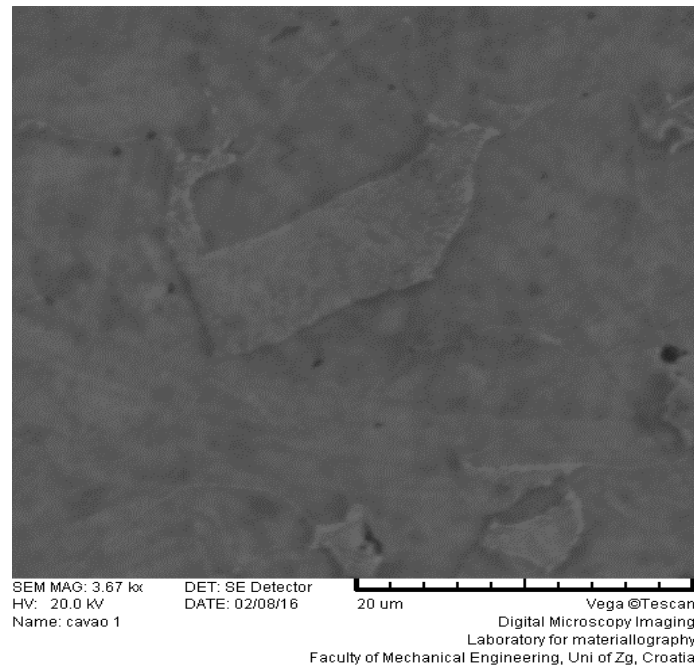
Slika 5.10: Mikrostruktura kutnog L profila (povećanje 200x)



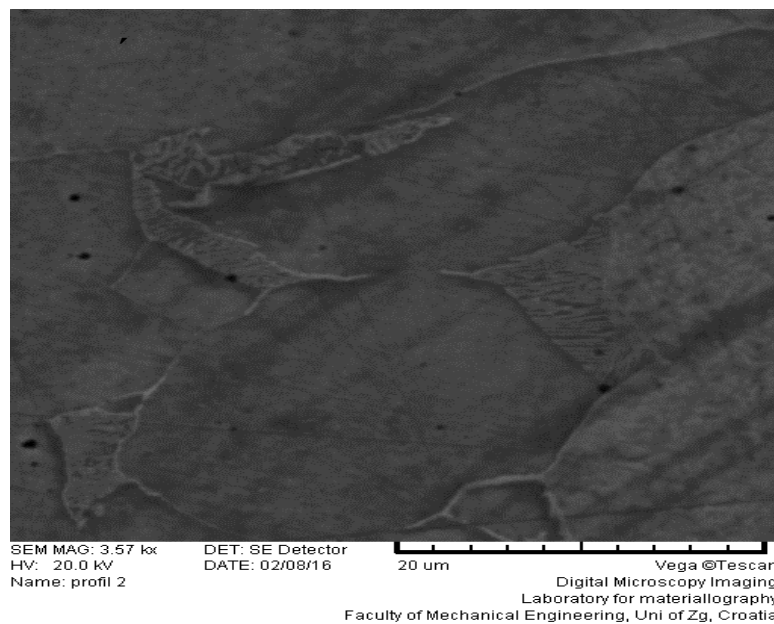
Slika 5.11: Mikrostruktura kutnog L profila (povećanje 1000x)



Uzorci su također su promatrani pomoću elektronskog mikroskopa „Tescan Vega 5136 FM“. Dobivena mikrostrukture čavla vidljiva je na slici 5.12, a mikrostruktura kutnog L profila dana je slikom 5.13.



Slika 5.12: Mikrostruktura čavla snimljena na elektronskom mikroskopu (povećanje 3670x)



Slika 5.13: Mikrostruktura kutnika L profila snimljena na elektronskom mikroskopu (povećanje 3570x)

Iz dobivenih slika mikrostruktura vidljivo je da se današnji čavao i kutni L profil sastoje od ferita i perlita. Ferit je na dobivenim slikama svijetle boje, a crne boje je perlit. Perlit se sastoji od eutektoidnog ferita i eutektoidnog cementita.

## 5.2. Rezultati ispitane mikrotvrdoće

Provedena su tri mjerenja mikrotvrdoće, a u tablicama 5.1 i 5.2 prikazani su rezultati ispitivanja za uzorke čavla i kutnog L profila.

Tablica 5.1 Mikrotvrdoća čavla

| <b>Čavao</b>  |                      |
|---------------|----------------------|
| Broj mjerenja | Mikrotvrdoća [HV0,2] |
| 1.            | 355                  |
| 2.            | 308                  |
| 3.            | 303                  |

Tablica 5.2 Mikrotvrdoća kutnog L profila

| <b>L profil</b> |                      |
|-----------------|----------------------|
| Broj mjerenja   | Mikrotvrdoća [HV0,2] |
| 1.              | 204                  |
| 2.              | 207                  |
| 3.              | 257                  |

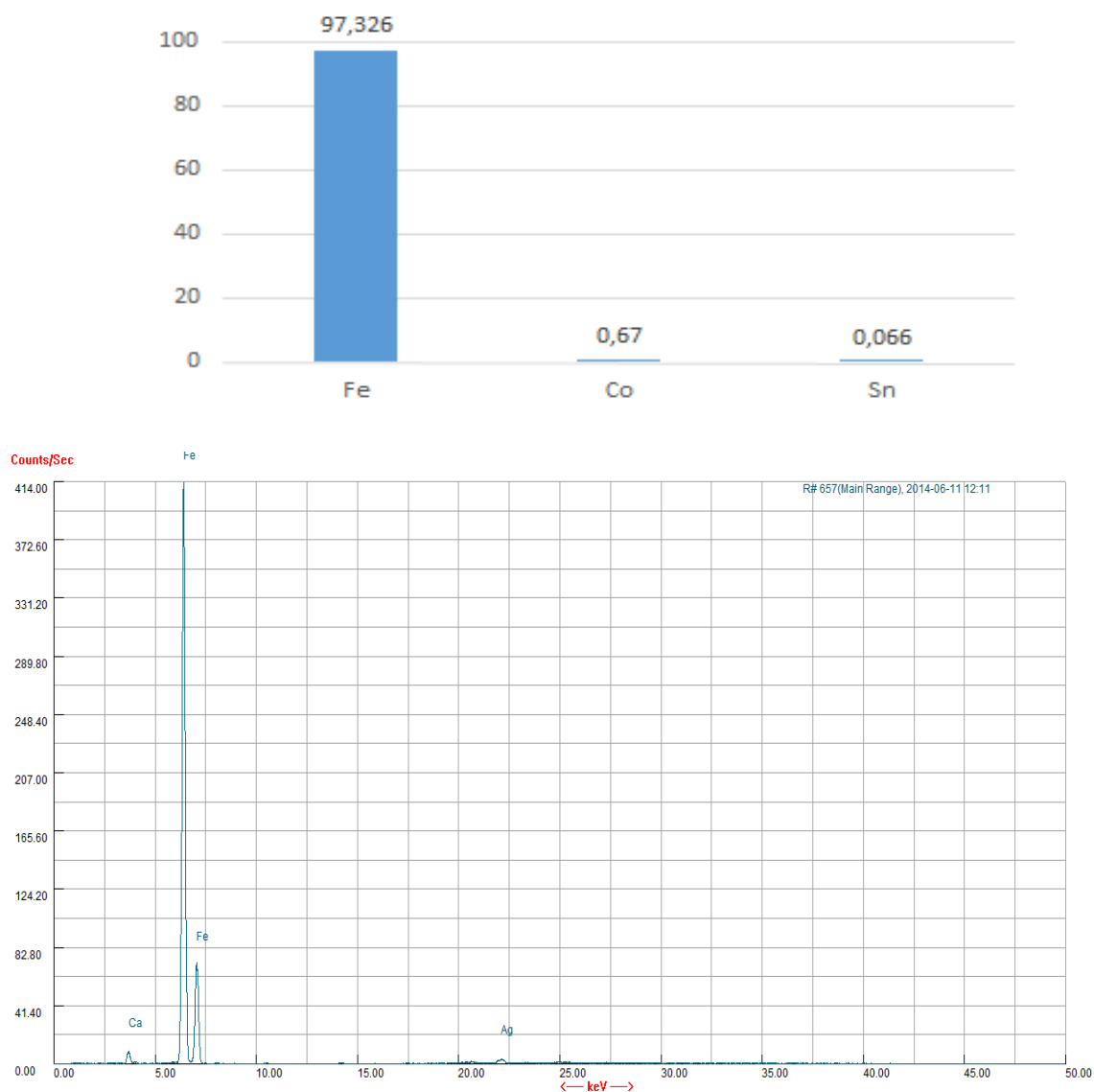
Iz gore navedenih tablica dobiveno je da je prosječna mikrotvrdoća čavla iznosi 322 HV, a kutnog L profila približno 223 HV. Te tvrdoće otprilike odgovaraju tvrdoći perlita čija tvrdoća iznosi oko 220 HV.

### 5.3 Rezultati kemijske analize

Kemijskom analizom čavla iz Siska na Naravoslovnom tehničkom fakultetu u Ljubljani 2014. godine, XRF metodom utvrđen je sljedeći kemijski sastav:

- 97,326 Fe
- 0,67 % Co
- 0,066 % Sn

Na slici 5.14 prikazan je kemijski sastav ispitivanog čavla iz Siska.



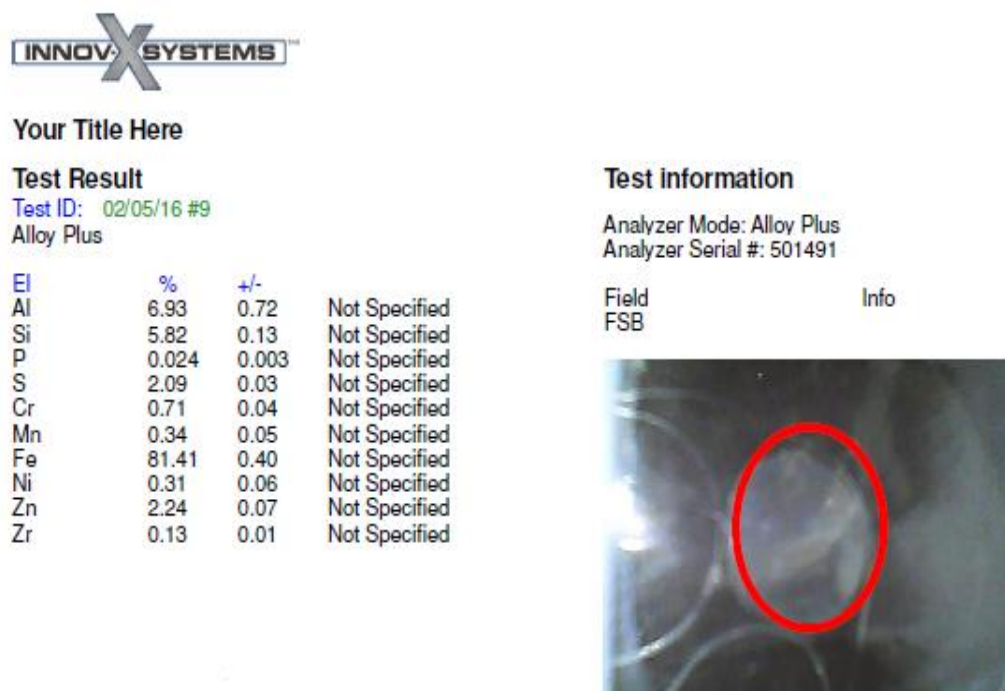
Slika: 5.14: Kemijski sastav čavla pronađenog u Sisku

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu napravljena je kemijska analiza XRF metodom. Analizirani su čavao i kutni L profila.

Kemijskom analizom čavla dobivena su sljedeći udjeli :

- 81,41 % Fe
- 6,93% Al
- 5,82 % Si
- 2,09 % S

U obzir nisu uzeti svi elementi dobiveni analizom, jer je prilikom snimanja uređajem zahvaćen i dio kalupa. Potpuni rezultati analize su prikazani na slici 5.15

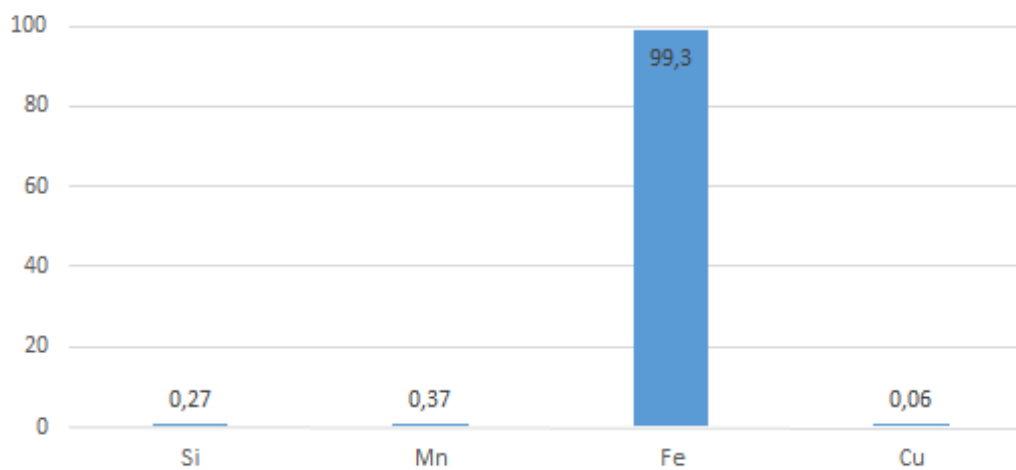


Slika 5.15: Kemijski sastav čavla

Analizom kutnog L profila dobiveni su sljedeći udjeli:

- 99,3 % Fe
- 0,37 % Mn
- 0,06 % Cu
- 0,27 % Si

Rezultati kemijske analize prikazani su i na slici 5.16.



Slika 5.16: Kemijski sastav kutnog L profila

## 6. ZAKLJUČAK

Lijevanje je postupak kojim se rastaljeni metal lijeva u kalup, te nakon hlađenja dobivamo odljevak. Prvi odljevci pronađeni su 3200.g. pr. Kr. u Mezopotamiji te se ona smatra koljevkom ljevarstva. Kroz godine se ljevarstvo razvijalo i mijenjalo, ali osnove postupka su ostale iste. Danas je ljevarstvo visokoproduktivan i automatiziran proces koji ide u korak s ostalim suvremenim tehnologijama.

U rimsko doba na području današnjeg Siska nalazio se grad Siscija. Siscija je bila centar Panonije i na tom području nalazila se kovnica, gdje su pronađeni brojni ostaci različitih čeličnih predmeta kao što su čavli, sjekire i dr. Siscija je predstavljala najvažniji kovački centar onog doba i tu se odvijala najmasovnija proizvodnja čeličnih predmeta u rimsko doba.

U eksperimentalnom dijelu napravljena su metalografska ispitivanja, ispitivanja mikrotvrdoće, te je utvrđeni kemijski sastav današnjih čeličnih elementa s ciljem usporedbe sa sličnim elementom iz rimskog doba s područja Siscije.

- metalografskim ispitivanjima utvrđeno je da su čavao sa područja Siscije i današnji elementi slične mikrostrukture, tj. da se sastoje od perlita i ferita. U današnjim čeličnim elementima perlit je sitniji u odnosu na čavao iz Siscije.
- kemijskom analizom utvrđeno je da se čavao pronađen na području Siscije većim dijelom se sastoji od željeza, te vrlo malog udjela kobalta i kositra. Na temelju toga može se zaključiti da željezu nisu dodavani legirajući elementi, već su oni bili dijelom iskopane rude. Kemijskom analizom današnji elementa, čavla i kutnog L profila, utvrđeno je da osim željeza sadrže i legirajuće element kao što su silicij, mangan, bakar.

## LITERATURA

1. [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20\\_10\\_2011\\_15683\\_ljevarstvo-2011.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20_10_2011_15683_ljevarstvo-2011.pdf), 2.12.2015.
2. <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Casting>, 2.12.2015.
3. Skupina autora:, ASM Handbook Vol.15, Casting.1992.
4. [https://hr.wikipedia.org/wiki/Povijest#Metalno\\_doba](https://hr.wikipedia.org/wiki/Povijest#Metalno_doba), 10.12.2015.
5. Greer, S.E.: *A Comparison of the Ancinet Metal Casting Materials and Processes to Modern metal Casting Materials and Processes*, 2009.
6. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Mezopotamija>, 10.12.2015.
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/Molding\\_\(process\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Molding_(process)), 11.12.2015.
8. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lost-wax\\_casting](https://en.wikipedia.org/wiki/Lost-wax_casting), 20.02.2015.
9. [https://www.google.com/culturalinstitute/usergallery/eQKya7qWJ\\_8iKg?hl=en&position=0%3A3](https://www.google.com/culturalinstitute/usergallery/eQKya7qWJ_8iKg?hl=en&position=0%3A3), 15.12.2015.
10. [https://en.wikipedia.org/wiki/Dancing\\_Girl\\_\(Mohenjo-daro\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dancing_Girl_(Mohenjo-daro)), 18.12.2015.
11. Glavaš, Z.: Osnovne lijevanja metala, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
12. [https://en.wikipedia.org/wiki/De\\_la\\_pirotechnia](https://en.wikipedia.org/wiki/De_la_pirotechnia), 20.12.2015
13. Prucha, E. T., Twarog, D., Monroe, W. R.: *Histry and trends of metal casting*, 2006
14. [https://www.google.hr/search?q=johannes+croning&esqv=2&biw=1366&bih=643&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiWu4Tq-9XKAhWGwBQKHVY9CgYQ\\_AUIBigB&dpr=1#imgrc=W-GIIXRky0VtVM%3A](https://www.google.hr/search?q=johannes+croning&esqv=2&biw=1366&bih=643&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiWu4Tq-9XKAhWGwBQKHVY9CgYQ_AUIBigB&dpr=1#imgrc=W-GIIXRky0VtVM%3A), 10.01.2016.
15. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=37728>, 21.12.2015.
16. <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/casting/procast-quikcast>, 27.12.2015.
17. <http://content.yudu.com/web/y5b2/0A1snzj/ModernCastingDec2015/flash/resources/28.htm?refUrl=http%3A%2F%2Fwww.globalcastingmagazine.com%2Findex.php%2F2016%2F02%2F02%2F49th-census-of-world-casting-production-modest-growth-in-worldwide-casting-market%2F>, 25.01.2016.
18. Durman. A: *Iron resources and production for the Roman frontier in Pannonia*; Historical Metallurgy, Volume 36; Number 1, 2002
19. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Panonija#/media/File:Pannonia02.png>, 27.01.2016.
20. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17657>, 02.02.2016
21. <http://e-skola.biol.pmf.unizg.hr/odgovori132.htm>, 02.02.2016.
22. Ivušić, V., Franz, M., Španiček, Đ., Čurković, L.: *Materijali I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
23. [https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_fluorescence](https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_fluorescence), 05.02.2016.