

Tena Karavidović

Institut za arheologiju

Ljudevita Gaja 32

10 000 Zagreb

## IZVIJEŠĆE

o sudjelovanju na radionici tehnika taljenja željezne rude

### 11<sup>th</sup> IRON SMELTING WORKSHOP 2019: FROM THE SOIL TO THE IRON PRODUCT

Somogyfajsz, Republika Mađarska



Ovo Izvješće napravljeno je za potrebe istraživačkog znanstvenog projekta TransFER (IP-06-2016-5047) kojeg financira Hrvatska zaklada za znanost, a provodi se u Institutu za arheologiju.

Radionica: IRON SMELTING WORKSHOP 2019: FROM THE SOIL TO THE IRON PRODUCT

Organizator: Somogy Provincial Association for Nature Conservation and Green Corridor Public Foundation

Voditelj: dr.sc. Adam Thiele

Datum: od 06. do 11. srpnja 2019. godine

Mjesto održavanja: Somogyfajsz, Republika Mađarska

Sudionici: Tena Karavidović

# UVOD

## Tijek radionice

- 06. srpnja
  - Izgradnja i paljenje ugljenice, izgradnja peći za taljenje
- 07. srpnja
  - posjet arheološkom lokalitetu na kojemu je pronađena srednjovjekovna talionička radionica
  - terenska prospekcija – identifikacija ležišta močvarne željezne rude i prikupljanje/rudarenje sirovine
  - taljenje željezne rude (hematit) i primarno kovanje
- 08. srpnja
  - priprema rude (ispiranje, prženje močvarne željezne rude, usitnjavanje)
  - taljenje željezne rude i primarno kovanje
- 09. srpnja
  - otvaranje ugljenice i priprema ugljena
  - taljenje željezne rude i primarno kovanje
  - sekundarno kovanje – izrada predmeta
- 10. Srpnja
  - čišćenje radionice i odlazak prema Zagrebu

Tijekom pet dana trajanja radionice, rekonstruiran je cjelokupni proces proizvodnje željeza iz željezne rude. Proces je podrazumijevao: prospekciju terena u svrhu identifikacije ležišta močvarne željezne rude, rudarenje, pripremu sirovina (ugljen, glina), izgradnju peći za taljenje i kovačke peći te taljenje, primarno kovanje (kompaktiranje ili konsolidaciju spužvastog željeza te oblikovanje ingota), sekundarno kovanje (izradu predmeta od uzoraka željeza). Svi procesi su detaljno dokumentirani te su prikupljeni referentni uzorci za daljnu obradu. Ukupno je izgrađeno četiri peći, u kojima se simultano odvijalo taljenje tijekom 3 dana radionice. Početak taljenja tempiran je između peći kako bi se postupak konsolidacije i kompaktiranja spužvastog željeza mogao odvijati neposredno nakon vađenja spužvastog željeza iz talioničkih peći obzirom da je jedno kovačko ognjište aktivno korišteno. Sve peći su dokumentirane fotografski, a osmišljen je eksperiment proveden u peći 1. Uz eksperimentalno testiranje i prikupljanje referentnih uzoraka cilj boravka na radionici bio je zabilježiti prostornu organizaciju radioničkog prostora. Ovaj prostor korišten je kao sezonska radionica, jednom godišnje kroz proteklih 11 godina u svrhu izvođenja eksperimenata, ali i izrade željeza koje će biti korišteno od strane profesionalnih kovača. Organizacija prostora nije ciljano rekonstruirana prema radionicama poznatim iz arheoloških izvora već

podliježe karakteristikama odabranog prostora i zahtjevima te redosljedu pojedinih postupaka vezanih uz proces proizvodnje željeza.

## 1. NABAVA I PRIPREMA SIROVINA

### 1. 1. RUDA

U eksperimentima je korištena ruda hematit (podrijetlo: Brazil) dobavljena iz obližnje tvornice čelika Dunaujavaros te močvarna željezna ruda prikupljena na dva položaja u okrugu Somogy.

#### 1.1.1. PROSPEKCIJA TERENA I RUDARENJE – MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA

Prospekcija terena odrađena je drugi dan, 07. 07. 2019. Položaj obližnje leće močvarne željezne rude identificiran je u ranijoj prospekciji terena (lok. Somogyfajs, (Kercsmár Z., Thiele A. 2015)). Ruda je prvi puta zamijećena u otvorenim profilima potoka. Sam potok je dovoljno plitak da se kroz njega nesmetano može hodati, vodostaj je nizak obzirom na sušni dio hidrološke godine. Unutar potoka zamijećeni su manji ulomci rude te mjestimično obojena voda crvenim površinskim filmom. Ulomci rude dospjeli su u potok erozijom tla a obojenost je odraz otopljene jalovine (glinastih dijelova) zasićenih željeznim oksidima ili ukazuje na prisustvo bakterija koje djeluju kao katalizator pri procesu taloženja željeza u tlu. Ruda se formirala u naizgled kompaktnom sloju, oko 30 – 40 cm ispod površine tla (gornji rub). Ukupna debljina sloja relativno je jednolična, oko 25 – 30 cm. Sloj je bilo moguće pratiti oko 3- 4 metra dužinom profila nakon čega nestaje. Ovakva mjestimična formacija, poput leća u tlu, karakteristična je za močvarne željezne rude. Ispod sloja rude nalazi se sloj vrlo pjeskovite gline (silt?), kakva je korištena pri izgradnji peći za taljenje.

Sloj rude, makroskopski gledano, nije homogen bojom kao ni konzistencijom. Pravilnost u promjeni boje kroz sloj nije uočena, odnosno, boja neravnomjerno varira u cijelom sloju (Slika 1.). Konzistencija i razina granuliranosti, s druge strane, čini se uslojenom. U donjem dijelu sloja je čvršća konzistencija i nisu površinski vidljive "kuglice" dok je u gornjem dijelu sloja prisutnost kuglastih tvorevina veća i izraženija te se sloj čini rahliji. Struktura (površinski) rude naizgled je konglomerat kugličastih tvorevina manjih i većih dimenzija. Boja varira između crvenkasto – narandaste, crvenkasto smeđe, crno smeđe.

Prikupljeno je oko 40 kg rude te prenešeno u radionicu na daljnju obradu, pripremu za taljenje.

S drugog položaja prikupljena je podjednaka količina močvarne rude. Ova ruda otkrivena je na površini uslijed recentnih radova izgradnje vodovoda i/ili regulacije, pri čemu je na površinu izbačena veća

količina močvarne rude. Makroskopski gledano, ova ruda nije se znatno razlikovala od rude s prethodnog položaja.

Uzeti su uzorci svih ruda, u sirovom stanju.



**SLIKA 1. LEŽIŠTE MOČVARNE ŽELJEZNE RUDE SOMOGYFAJSZ (POLOŽAJ 1.)**

## 1.1.2. PRIPREMA RUDE: EKSPERIMENTALNO TESTIRANJE

Kao priprema za eksperimentalno taljenje, različiti uzorci rude su pripremljeni drugačije:

### a) Močvarna željezna ruda (Somogy okrug)

Položaj 1. - isprana, pržena te usitnjena.

Položaj 2- isprana i usitnjena

### b) Hematit (Brazil)

- usitnjen

#### Cilj ekspertimenta:

- Definirati utrošak vremena i sirovina
- Definirati uvjete temperature pri prženju na otvorenoj vatri
- Definirati izmjene u svojstvima rude (makroskopska razina – boja i promjene u teksturi, volumenu tj. težini, mikroskopsku / kemijsku analizu – definirati promjene i usporediti s arheološkim nalazima rude)
- Dokumentiranje tragova prženja te usporedba s arheološkim zapisom

## PRŽENJE I USITNJAVANJE RUDE: Močvarna željezna ruda (Somogyfajsz – Položaj 1.)

### Opis postupaka:

#### a) Ispiranje – čišćenje od jalovine

Močvarna željezna ruda iskopana na položaju 1. je grubo očišćena od jalovine ispiranjem u potoku, odmah po kopanju iz ležišta. Pri ispiranju, veće odlomljene gromade su se mjestimično usitnile bez fizičkog pritiska te su ostali ulomci rude, očišćeni od jalovine poput glinice i pijeska u sloju.



SLIKA 2. ISPIRANJE RUDE U POTOKU, NEPOSREDNO DO LEŽIŠTA

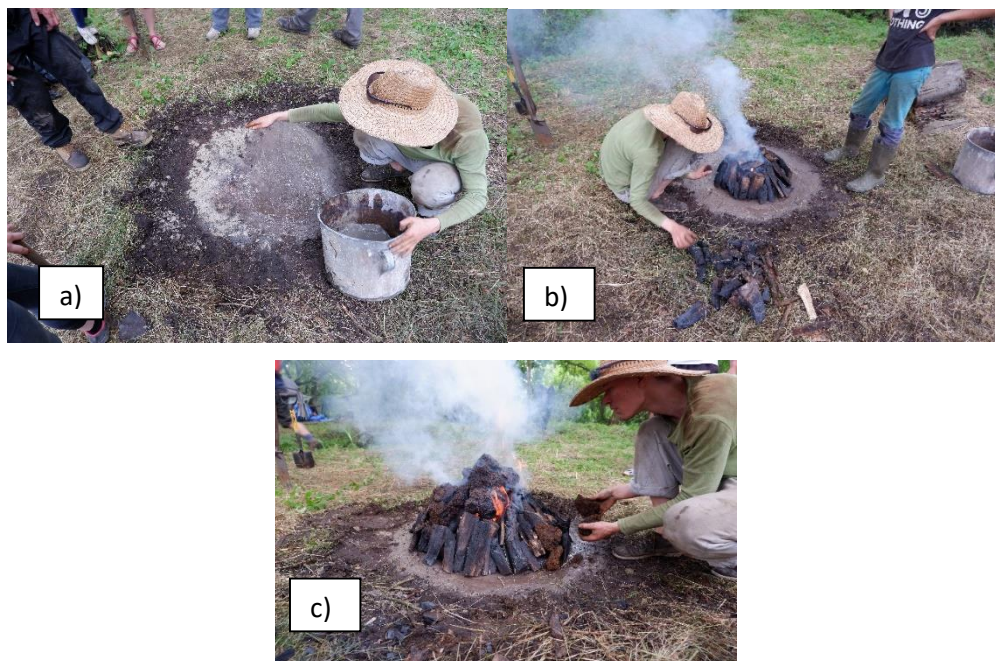


a)

c)

b) Sušenje i prženje  
**SLIKA 3. RUDA NAKON ISPIRANJA A) SVA PRIKUPLJENA RUDA, CCA. 40 KG B) STRUKTURA ISPRANE RUDE – VIDLJIVA KUGLIČASTA STRUKTURA (KONGLOMERAT) C) “KUGLICE” ODVOJENE OD GRUMENA RUDE PRI ISPIRANJU – UKAZUJU NA POROZNOST STRUKTURE I RAHLOST TE UPUĆUJU NA NAČIN FORMACIJE RUDE**

izradi ugljena). Kružna površina od oko 1 m promjera je očišćena od površinskog raslinja te je humusno tlo zamazano glinom (ista kao i za peći) kako bi se izbjegao utjecaj vlage iz tla na gorenje. Izgrađena je konstrukcija od komada pougljenog drveta u obliku krnjeg stošca (dim. R1= 60 cm, R2= 10 cm V= 40 cm) te su ulomci rude smješteni na površinu (Slika 4.). Pojedini veći komadi rude su razlomljeni, te su na vatru stavljeni ulomci različitih veličina (5-15 cm). Tijekom eksperimenta mjerena je temperatura vatre s infracrvenim pirometrom<sup>1</sup> na ukupno 4 položaja (Slika 5.); vanjske površine ulomaka rude (temperatura djelovanja vatre na vanjsku stranu grumenja rude, položaj 1. - 3.) te unutrašnjosti vatre (žarište; temperature djelovanja vatre na unutrašnju stijenku rude, položaj 4.1 - 4.2.). Vremenski razmak pojedinog mjerenja bio je sat vremena. Kako bi se ustanovila razlika u masi sirove i pržene rude, odabrani ulomak je izmjeran prije i nakon prženja. Prikupljeni su uzorci pržene i sirove rude s položaja 1 za daljnu geokemijsku i mikroskopsku obradu.



**SLIKA 4. A) ČIŠĆENJE POVRŠINE, ZAMAZIVANJE GLINE B) I C) IZGRADNJA DRVENE KONSTRUKCIJE VATRIŠTA**

<sup>1</sup> Infracrveni pirometar marke Volcraft IR 2200- 50D postavljen na  $\epsilon = 0.83$





SLIKA 5. POLOŽAJI MJERENJA TEMPERATURE

### c) Usitnjavanje

Nakon prženja ruda je usitnjena na ulomke cca. 3 – 5 cm promjera. Ruda je dosta porozna te se lako lomi. Pojedino grumenje je lomljeno rukom, dok su drugi uzorci ipak zahtjevali lomljenje uz pomoć čekića. Porozniji ulomci bi se pod pritiskom dosta usitnili, gotovo praškasto. Ovi ulomci su provučeni kroz sito (rešetka cca 0.5 cm) te nisu korišteni pri taljenju. Ruda usitnjena u prah, pretpostavljeno, nije pogodna za uspješan postupak taljenja. Usitnjavanjem se povećava redukcijaska površina (odnosno površina reakcije) a ovako usitnjena ruda prebrzo bi prošla kroz okno peći te je upitno dali bi se pravilno reducirala, a potencijalno bi i začepila pore unutar peći. Tijekom radionice pokušalo se taliti prah hematitne rude tehnikom tzv. peletiranja (sličan princip kakvu koriste moderne industrije za proizvodnju čelika). Prah rude je uz pomoć vode (1 taljenje) i vode i gline (2. taljenje) umiješan u kuglice (pelete) tre je obavljen postupak taljenja. Taljenje je

bilo neuspješno, kuglice su se spustile nitz okno peći na mjestu gdje se treba formirati spužvasto željezo no nisu se sinterirale u spužvasto željezo.



**SLIKA 6. USITNJENA PRŽENA MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA**

#### SUŠENJE I USITNJAVANJE: Močvarna željezna ruda (Somogyfajs – Položaj 2.)

##### **Opis postupka:**

Močvarna ruda s položaja 2 prosušena je na zraku nekoliko sati te usitnjena na ulomke cca. 3 – 5 cm promjera. Ruda je relativno porozna te se lomila uz pomoć čekića. Ostaci zemlje su uklonjeni mehanički s grumenja rude pri lomljenju te izdvojeni. Postupak je trajao oko sat vremena.

#### REZULTATI EKSPERIMENTA

##### MAKROSKOPSKA USPOREDBA RUDA POLOŽAJ 1. I POLOŽAJ 2.

Na makroskopskoj razini, rude s dva položaja se u sirovom neprženom stanju razlikuju. Boja obe rude varira te nije moguće na temelju nje procijeniti razliku iako je primjećeno da se ruda s položaja 2 općenito čini svijetlija, žučkastija. Međutim, u strukturi rude s položaja 1 vidljive su kugličaste tvorevine dok se kod rude s položaja 2 one rijetko primjećuju. Rudu s položaja 2. karakterizira mjestimična poroznost u vidu rupica dok se kod rude s položaja 1. takva karakteristika ne pojavljuje.

## PRIPREMA RUDE

Ruda je pržena ukupno 2 sata. Nakon pola sata prženja ulomci rude počeli su zamjetno mijenjati boju koja se postepeno tijekom trajanja procesa mijenjala. Odlučeno je da je proces završen po izgaranju pougljenog drveta i kada su gotovo svi ulomci izmjenili boju. U dva navrata je razmiještana ruda kako bi se ulomci s dna vanjskog ruba približili višoj temperature, izvoru vatre. Ulomci sirove rude bili su nejednolične boje koja je varirala od naračasto – smeđe, žućkasto - oker - smeđe i crvenkaste i crne. Kao posljedica prženja površinska boja ulomaka se izmjenila u vidu intenziviranja boje te promjene u žuto – crvenkasto, intenzivno crveno, smeđe - crno – plavičasto i gotovo roze boje. Razlika u konzistenciji rude je također bila površinski vidljiva, ulomci su porozniji te lakše lomljivi. Utrošeno je ukupno 0.054 m<sup>3</sup> pougljenog drva hrasta<sup>2</sup> za prženje oko 40 kg rude. Težina ulomka koji je izmjeren prije i nakon prženje ukazala je da je ulomak izgubio na težini gotovo 40% (težina 1. = 122 g, težina 2. = 73 g). Pojedini ulomci su se uslijed zagrijavanja odlomili te usitnili na veličine ispod 1 cm. Ovi ulomci su prosijani kroz sito te nisu korišteni pri taljenju. Postupak usitnjavanja trajao je oko sat vremena u oba primjera usitnjavanja.

---

<sup>2</sup> Volumen je izračunat na temelju formule za volumen krnjeg stošca :  $V = \frac{\pi \cdot v}{3} (R^2 + r^2 + Rr)$ . Radijus donjeg dijela konstrukcije je bio oko 60 cm, gornjeg dijela krnjeg stošca oko 30 cm a visina 40 cm.



a)



b)



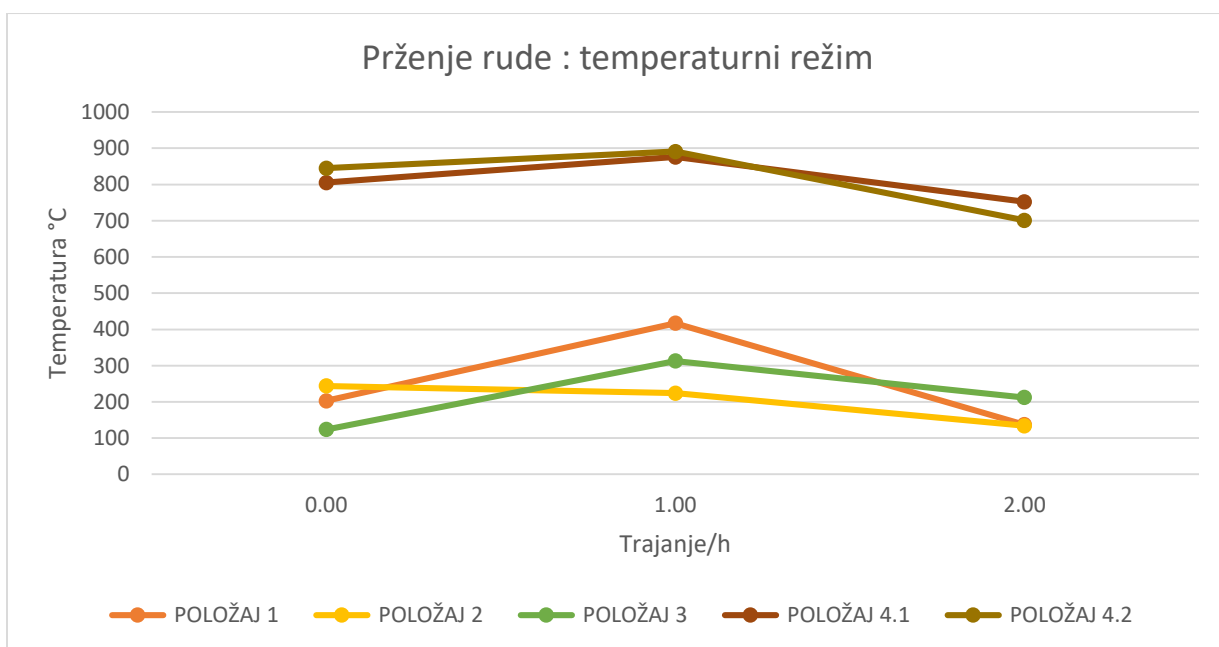
c)

SLIKA 7. A) POČETAK PRŽENJA, B) NAKON 1:00 H PRŽENJA C) NAKON 2:00 H PRŽENJA

Maksimalni raspon temperature između svih mjerenih položaja kroz cijelo vrijeme trajanja procesa je između 173 i 891 °C (Tab 1.). Prosječne temperature po pojedinom položaju i prema vremenu trajanja prikazane su u tablici 1. Temperaturni režim tijekom trajanja procesa pokazuje sličan opći trend kod svih položaja (Slika 8.). Najviše temperature su zabilježene u unutrašnjosti vatre gdje su se kretale od 701 – 895 °C, prosječno 811 – 812 °C. (položaj 4.1. i 4.2.) dok su na istim položajima ali s vanjske strane površine rude istovremeno zabilježene temperature između 134 i 313 °C (položaj 2 i 3), prosječno između 200 i 216°C. Ovim mjerenjem moguće je zaključiti da je proces prženja tekao stabilno (isti trend) i poprilično jednolično na svim dijelovima lomače (1. -3.) no ulomci rude s vanjske strane nisu prelazili temperaturu od 200 – 313 °C dok su s unutrašnje strane temperature znatno više, te su uzorci vjerojatno nepotpuno i nejednolično prženi. Ovo je moguće vidjeti i makroskopski kod pojedinih uzoraka iz koje je jasno vidljiva razlika u boji u presjeku uzorka rude (slika 9.). Dodatno kurenje i utrošak goriva bi produžio proces a uzorci bi se potencijalno u potpunosti ispržili. Također, usitnjavanje rude prije prženja olakšalo bi sam postupak prženja obzirom da bi se time površina reakcije za proces oksidacije i prženja povećala te bi proces tekao brže a moguće i ravnomjernije obzirom na površinu komada. Drugačija konstrukcija vatrišta mogla bi utjecati na ravnomjernije prženje rude. Primjerice, slaganje naizmjeničnih redova horizontalno postavljenog drva (poput rešetke) i rude osiguralo bi ravnomjernije vertikalno raspoređivanje topline te jednoličnije urušavanje. Redoslijed postupaka vezanih uz process proizvodnje spužvastog željeza u direktnoj je vezi s organizacijom rada, ali i uspješnošću postupka taljenja odnosno količini prinosa u željezu. Utjecaj nepotpunog prženja na proces taljenja bilo bi moguće provjeriti sustavnim eksperimentalnim testiranjem različito pripremljene rude, no u toku ovog eksperimentalnog testiranja, testirane su razlike u pripremi između sirove i pržene rude. Zaključeno je da je postupak usitnjavanja pržene rude lakši tj. prženjem ruda dodatno postaje porozna te je usitnjavanje lakše izvesti. Također, zbog izuzetne rahlosti više pržene rude se pretvorilo u prah koji nije korišten u taljenju.

Položaj mjerenja	Trajanje/h			Prosječna temperatura °C /položaj
	1.00	2.00	3.00	
POLOŽAJ 1	203	417	137	252.3
POLOŽAJ 2	244	224	134	200.7
POLOŽAJ 3	124	313	212	216.3
POLOŽAJ 4.1	805	876	752	811.0
POLOŽAJ 4.2	845	891	701	812.3
Prosječna temperatura °C/vrijeme	444.2	544.2	387.2	

TABLICA 1. REZULTATI MJERENJA TEMPERATURE



GRAFIKON 1. TEMPERATURNI REŽIM PRŽENJA RUDE



**SLIKA 8. RAZLIKE U RAZINI PRŽENOSTI VANJSKE I UNUTRAŠNJE STRANE ULOMAKA RUDE**

### 1.1.3. DOKUMENTIRANJE TRAGOVA PRŽENJA RUDE

U svrhu usporedbe s arheološkim zapisom, nakon procesa prženja očišćen je prostor te su dokumentirani nastali tragovi (Slika 10.). Na istom mjestu odvijalo se prženje rude u više navrata tijekom proteklih godina radionice. Prostor je pripremljen zamazivanjem glinom (prethodno opisano). Cijeli prostor (promjera cca 1 m) se blago zapekao, no jače zapečeni trag bio je vidljiv na dijelu gdje je gorjela vatra (složena stožasta konstrukcija) promjera cca 60 cm. Temperatura koja je djelovala na ovaj prostor bila je u prosjeku 811 – 812 °C (položaj 4.1 i 4.2., maksimalni raspon 701 – 891 °C, tab. 1.) kroz dva sata.



**SLIKA 9. OSTACI ZAPEČENOG SLOJA GLINE NAKON PRŽENJA RUDE**

## 1.2. UGLJEN

### 1.2.1. PROIZVODNJA DRVENOG UGLJENA – UGLJENICA

Izgrađene su dvije ugljenice, manja volumena oko  $1 \text{ m}^3$  drva i veća volumena oko  $2.5 - 3^3$  drva. Korišteno je hrastovo drvo, sječeno na cjepanice različitih veličina. Konstrukcija ugljenice je u obliku krnjeg stošca. Prvi korak pri izgradnji je postavljanje središnje osi, konstrukcije četvrtastog presjeka čija funkcija će biti mjesto/otvor za paljenje vatre. Oko njega slažu se cjepanice, vertikalno postavljane, red po red u krug. Veličina i raspored cjepanica su bitni zbog što uspješnijeg procesa te se one slažu prema očekivanoj? temperaturi na određenom dijelu (unutrašnji i vanjski dio) te visini (dno – vrh) ugljenice. Stoga će manje cjepanice stajati s vanjske strane, i to pri dnu, dok će na središnjim dijelima ugljenice (visina ugljenice) stajati veće cjepanice. Tako izgrađena konstrukcija pokrivena je redom slojevima suhe, vlažne trave te vlažne zemlje. Obje ugljenice izgrađene su u toku jednog dana, uz sudjelovanje 10 ljudi. Izgradnja je podrazumijevala i pripremu drva u cjepanice. Nakon izgradnje, kroz središnji se otvor pali vatra. Na gornjem dijelu ugljenice otvorene su rupe promjera  $3 - 5 \text{ cm}$ , pravilno raspoređene kako bi se osiguralo kontinuirano gorenje. Tijekom procesa kroz njih se provjerava da li se drvo pretvorilo u ugljen. Ukoliko je postupak u tom dijelu ugljenice završen, rupe se zatvaraju te se niže otvaraju nove. Trenutak u kojemu je drvo postalo drveni ugljen vidljiv je i prema boji dima koji postaje plavkasto - siv. Manja ugljenica gorila je 2 dana a veća 4 dana. Dugotrajnost procesa ovisi o vrsti i udjelu vlage u drvu te veličini ugljenice tj. količini drveta. Količina dobivenog drvenog ugljena otprilike je 50% mase drveta. Volumen iskorištenog drveta, kod veće ugljenice je bio oko  $2.5 - 3 \text{ m}^3$  dok je volumen ugljena bio oko  $1.25 - 1.5 \text{ m}^3$ . Dio drveta nije se u



potpunosti karbonizirao. Nakon završetka procesa ugljenica je otvorena te hlađena kroz nekoliko sati prirodnim hlađenjem i zalijevanjem vodom. Zalijevanje vodom može značajno umanjiti kakvoću drvenog ugljena. Postignuta temperatura u unutrašnjosti ugljenice bila je između 400 i 600 °C. Za proizvodnju drvenog ugljena odnosno termičku razgradnju suhog drva potrebna je temperatura iznad 275 °C te redukcijski uvjeti (piroliza).



**SLIKA 10. IZGRADNJA I PALJENJE PEĆI**





a)



b)



c)

SLIKA 11. IZGARANJE UGLJENICE, VIDLJIVE FAZE IZGARANJA I SMANJENJE VOLUMENA TE SLIJEKANJE UGLJENICE

### 1.2.2. PRIPREMA UGLJENA

Postupak taljenja zahtijeva određenu veličinu ulomaka ugljena. Ugljen korišten pri taljenju je pripremljen razlamanjem/usitnjavanjem na manje ulomke pomoću drvenog čekića (slika 13.) te je prosijan kroz sito. Rešetke sita su dimenzija 5x5 cm. Dodatno, prah ugljena je izdvojen prosijavanjem kroz drvenu košaru. Vrlo sitni ulomci ugljena potencijalno bi začepili pore unutar talioničke peći te negativno utjecali na process taljenja stoga je prah izdvojen te nije korišten pri taljenju.



SLIKA 12. POSTUPAK PRIPREME UGLJENA; USITNJAVANJE I PROSIJAVANJE

## 2. TALJENJE ŽELJEZNE RUDE DIREKTNIM POSTUPKOM: Eksperimentalno testiranje

Na različitim arheološkim lokalitetima na prostoru Podravine, na kojima se odvijao postupak direktnog taljenja u talioničkim pećima, pronađeni su uzorci termički pripremljene rude (prženje), ali i sirove močvarne željezne rude. Postavlja se pitanje je li sirova močvarna ruda mogla biti korištena za taljenje bez pojedinih postupaka pripreme i kakve su posljedice takvog postupka? Postupci pripreme rude mogu biti: uklanjanje jalovine (ispiranje i/ili fizičko uklanjanje), prženje, usitnjavanje. Svaki postupak pripreme trebao bi osigurati efikasnije i optimalnije taljenje. Uklanjanjem nepotrebne jalovine osigurava se čistoća rude, usitnjavanjem se povećava površina reakcije te pospješuje redukcija. Prženje rude termički je proces koji se odvija na temperaturi između 200 – 800 °C, pri čemu ruda gubi suvišnu vlagu a pod utjecajem topline u oksidativnoj atmosferi događa se promjena u kemijskom sastavu rude. Prženje je izrazito potrebno u slučaju, primjerice, sulfidnih ruda kod kojih se prženjem rude pretvaraju u oksidne i time postaju pogodnije za direktni proces taljenja. Međutim, močvarne željezne rude su najčešće oksidne, porozne i lako se tale te teoretski ne zahtijevaju prženje. Primjena ovog postupka svakako će olakšati taljenje, vjerojatno ubrzavajući proces pri čemu je moguće očekivati manji utrošak ugljena, vremena i energije u toku taljenja. Proces sukladan prženju načelno bi se dogodio u gornjim dijelovima peći za taljenje, no u ovom slučaju potrebno je razmišljati o tome da bi za jednako efikasno taljenje peć koja se puni trebala biti viša. Ako promotrimo proces koji se događa u peći, možemo ga podijeliti na pojedine zone unutar peći. Proces taljenja događa se postepeno pri čemu su elementarni uvjeti redukcijska atmosfera, postepeno dizanje temperature od vrha/tjemena peći do prostora ložišta. Stoga je bitno dobro procijeniti i visinu peći, naročito stoga što viša peć zahtijeva i veći utrošak goriva te dulji vremenski period gorenja. U slučaju taljenja nepržene rude pod istim uvjetima kao pržene, moguće je očekivati potencijalno manji prinos u spužvastom željezu, veću količinu zgure te otežanu redukciju.

### **Cilj eksperimenta :**

- Usporedba procesa i otpada nastalog pri taljenju različito pripremljene močvarne željezne rude (pržena i nepržena)
- Usporedba procesa i otpada nastalog pri taljenju močvarne željezne rude i visoko kvalitetne hematitne željezne rude
- Definirati utrošak vremena, resursa i sirovina kod svih postupka
- Prikupljanje referentnih uzoraka (ruda, zgura, stijenke peći, željezo) i usporedba (međusobna usporedba i usporedba s arheološkim nalazima na makroskopskoj, mineraloškoj i geokemijskoj razini).

**Metoda dokumentiranja:** Proces izgradnje i sušenja peći, taljenja, kompaktiranja, konsolidacije spužvastog željeza i izrade ingota u potpunosti je dokumentiran fotografski i opisno u sva tri slučaja taljenja. Zabilježeno je vremensko trajanje pojedinih postupaka. Tijekom procesa sušenja, zagrijavanja i taljenja mjerena je temperatura peći (tab. Br.) na 6 položaja podrazumijevajući temperature stijenka peći, no i unutrašnjosti peći pri tjemenu (položaj 1.). Temperatura unutrašnjosti peći izmjerena je nakon što su razbijena vrata peći kako bi se izvadilo spužvasto željezo. Mjerenje je izvršeno infracrvenim pirometrom, a mjerene su maksimalna i prosječna temperature određene točke svakih 30 minuta. Zabilježen je ritam upuhivanja zraka te ritam ubacivanja rude i ugljena. Nakon taljenja prikupljeni su uzorci otpada (zgure) i dijelova peći te ugljena.

## **2.1. SIROVINE – VRSTA, PRIPREMA I KOLIČINA**

Postupak taljenja obavljen je tri puta s tri različite rude:

- 1) ruda hematit, Brazil (tvornica čelika Dunajvaros) nepržena, usitnjena
- 2) močvarna željezna ruda (položaj 1., Somogy okrug) pržena i usitnjena
- 3) močvarna željezna ruda (položaj 2., Somogy okrug) nepržena, usitnjena

Ruda je ubacivana u peći u omjeru težine 1.2/1.3: 1 u korist rude naspram ugljena kod svih eksperimenata. Korišten je drveni ugljen od hrastova drva, napravljen prethodno opisanim postupkom. Količina ubačene rude i ugljena bila je gotovo ista kod svih taljenja. Količina ubačene rude nije mjerena pri svakom ubacivanju već se omjer stvorio na temelju volumena i zapunjenosti lopatice (veličina?) s

kojom je ubacivana ruda i ugljen. Prethodno taljenju ubačeno je nekoliko mjerica ugljena kako bi se zapunio volumen peći, peć zagrijala i stvorili reduktivni uvjeti.

## 2.2. PEĆI – TIP, DIMENZIJE I KORIŠTENE SIROVINE

Korištene peći za taljenje, idejna su rekonstrukcija, poluukopanih peći s plitko udubljenim dnom tzv. Fajsz- tip peći. Ovakve peći korištene su u tijekom 10.st. na prostoru Mađarske, u okrugu Somogy (lok. Somogyfajsz, Gomori 2000: 152 – 164, 240 – 242, 328). U eksperimentima su korištene dvije peći vrlo sličnih dimenzija i građene od istih sirovina, lokalne pjeskovite gline. Dodatne primjese nisu dodavane u glinu. Gradnja peći odvijala se u nekoliko stadija: 1) ukopavanje u padinu (izvedeno prethodnih godina) 2) oblaganje stijenki ukopa glinom (bočne stijenske i dno) 3) izgradnja prednjeg dijela peći (slobodnostojeći) 4) izgradnja vrata i umetanje prethodno osušene sapnice. Gradnja pojedine peći trajala je oko 4 sata. Obje peći sličnih su dimenzija, visine 73 - 75 cm, širine pri bazi 45 cm (vanjska) i 26 cm (unutrašnji promjer) te širine pri otvoru 22 cm (promjer vanjskog ruba) i 12 cm (promjer otvora). Debljina stijenki peći je varirala između 3 i 4 cm. Obe peći imale su na prednjem dijelu vrata (dim. visina 25 – 28 cm, širina 25 cm), u koja je bila umetnuta sapnica. Peći su imale plitku udubljenu jamicu (cca 5 cm dubine) u ložištu, stoga je ukupna visina peći između 77 i 80 cm. Korišteni su mjevovi načinjeni od kože i drveta jednake zapremnine (nepoznata točna zapremnina). Sapnice su postavljene oko 15 cm od dna vrata, što uzevši u obzir jamicu u ložištu čini ukupno cca 20 cm od dna ložišta. Taljenje različito pripremljene močvarne željezne rude izvedeno je simultano u peći 1. (nepržena ruda, položaj 2.) i 2. (pržena ruda, položaj 1.) dok je taljenje rude hematita izvedeno u peći 1. dan ranije.

## 2.3. POSTUPAK TALJENJA

### 2.3.1. HEMATIT (BRAZIL), PEĆ 1.

#### OPIS POSTUPKA

Peć je izgrađena te djelomično osušena dan ranije. Za sušenje je korišteno suho drvo, grane u dužini peći te nekoliko cjepanica. Vatra je započeta ubacivanjem gorećeg ugljena. Prvotno je sušen donji dio peći oko vrata (paljenje vatre u ložištu), a naknadno su umetnute duge grane kako bi se peć osušila u punoj visini. Sušenje peći prekinuto je zbog kiše te je dodatno peć posušena neposredno prije početka taljenja. U ovoj fazi umetnuta su vrata peći sa sapnicom te se nastavilo sa sušenjem, paljenjem suhog drva. Nakon što su posušena vrata, počelo se s ubacivanjem ugljena (09:30 h) kako bi se povisila temperature

u peći te osigurali reduktivni uvjeti potrebni za postupak direktnog taljenja. Ugljen se ubacivao postepeno, dok se potpuno nije zapunio volumen peći. Zrak se upuhivao pomoću mijeha. Nakon što se ugljen u potpunosti razgorio, te se prvi sloj spustio niz okno, otpočelo se s ubacivanjem rude i ugljena (10:28 h).

Ubačeno je ukupno 32 mjerice rude (oko 375 g grama po mjerici) te oko 300 g ugljena po mjerici. Ritam ubacivanja rude i ugljena je bio između 2 i 6 minuta, većinu procesa od 3 do 4 minute razmaka između dva punjenja. Ruda je usitnjena na komade cca 0.5 - 2 cm, a prosijan je prah rude. Prah rude teoretski ima veliku površinu za redukciju a potencijalno bi začepio pore između ugljena unutar peći te nepovoljno utjecao na postupak taljenja, ali i prebrzo propao do dna/ložišta peći što bi utjecalo na redukciju. Ova ruda prethodno nije podvrgnuta postupku prženja, obzirom da se radi o hematitu, oksidnoj rudi koju je načelno moguće taliti bez prethodne pirometalurške pripreme. Ritam upuhivanja zraka izveden je tako da je upuh zraka u peć konstantan bez pauza između dva dizanja prečke/punjenja mijeha zrakom. Tijekom cijelog postupka taljenja ritam upuhivanja je bio isti, a pojedina sekvenca između dva dizanja prečke bila je 1.5 sekundi.

Nakon što je ubačena zadnja mjerica rude (12:21h), nastavljeno je sa sagorjevanjem preostale zapune peći (bez dodatnog ubacivanja ugljena) dok se mješavina nije spustila na visinu neposredno iznad očekivanog položaja spužvastog željeza (13:05 h), nekoliko centimetara iznad gornjeg ruba vrata. Pri ovom dijelu procesa sa štapom se nekoliko puta razmjestio ugljen (površinski) kako bi se u svi dijelovima peći ravnomjerno događalo sagorjevanje odnosno slijeganje zapune. Vrata peći otvorena su u 13:10 h te je izvađeno spužvasto željezo kompaktirano. Kompaktiranje, postupak sabijanja spužvastog željeza napravljen je na plitko ukopanom drvenom panju pomoću drvenog čekića. U postupku je sudjelovalo dvoje ljudi, osoba koja je pridržavala spužvasto željezo većim kovačkim kliještima te osoba koja je udarala drvenim čekićom. Postupak je trajao 5 minuta, a završen je u trenutku kada se spužvasto željezo dovoljno ohladilo te daljnja obrada nije bila efikasna. Nakon prvotnog kompaktiranja uslijedilo je primarno kovanje u kovačkoj peći.

#### PEĆ NAKON TALJENJA

Tijekom procesa taljenja peć je napuknula, no konstrukcija je ostala stabilna. Napuknuća su se dogodila na kontaktnim dijelovima; s bočne strane na kontaktu slobodnostojećeg dijela stijenki peći i ukopa, kontaktu vrata i stijenki peći te prostoru najviše temperature (oko sapnice). Ove pukotine nisu popravljane tijekom taljenja, a dio ispod sapnice je zatrpan zemljom, kako bi se toplinski dodatno izolirao prostor najviše temperature tj. prostor zadnje faze taljenja – oblikovanja spužvastog željeza. Vrata peći sa sapnicom su zbog odstranjivanja spužvastog željeza razorena. Neposredno nakon vađenja

spužvastog željeza ložište peći je očišćeno. Ovaj postupak izveden je iz praktičnih razloga kako se zgura koja je ostala zatočena u unutrašnjosti peći nebi ohladila te ostala zalijepljena za dno i stijenke peći. Zgura, nedogoreni ugljen i dijelovi vrata peći su bačeni na povišeni prostor iznad peći, djelomično pri vađenju spužvastog željeza kako bi se oslobodio prostor iznad peći. Većina preostalog otpada nakon čišćenja odbačena je van područja koji se aktivno iskorištava za taljenje i primarno te sekundarno kovanje, uz rubni dio korištenog prostora radionice.



**SLIKA 13. PEĆ 1. U RAZLIČITIM FAZAMA TIJEKOM I NAKON TALJENJA A) SUŠENJE; B) ZAGRIJAVANJE; C) TALJENJE; D) NAKON 1. TALJENJA**



## REZULTAT EKSPERIMENTA

Postupkom taljenja proizvedeno je dobro sinterirano spužvasto željezo, konglomerat zgre i željeza. Neposredno nakon taljenja proveden je postupak kompaktiranja i konsolidacije. Težina i volumen spužvastog željeza nisu zabilježeni. Nastala zgura zadržala se u unutrašnjosti peći (eng. furnace slag), prilično je homogena izgledom. U zguri je ostao zarobljen djelomično nesagoren ugljen. Cjelokupni postupak izgradnje peći, sušenja, taljenja i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 12 h, a izveden je kroz dva dana (Tablica 2.). Postupak taljenja (sušenje vrata peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 3 h 48 minuta. Utrošeno je oko 12 kg rude i 10 kg ugljena. Pri taljenju je sudjelovalo troje ljudi. Temperaturni režim (Tablica 3.) ukupno 6 točaka zabilježen tijekom procesa taljenja ukazuje na temperature stijenki peći (2. – 6.), a realne temperature unutar peći/pri tjemenu (1.)

PEĆ 1 - HEMATIT ( BRAZIL, DUNAJVAROS)	
Postupak	Trajanje/h.min
<b>Gradnja peći</b>	<b>4</b>
<b>Sušenje - konstrukcija peći</b>	<b>2</b>
<b>Sušenje - vrata</b>	<b>0.30</b>
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	0.30
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.38
<b>Taljenje</b>	<b>3.08</b>
<b>Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza</b>	<b>0.1</b>
<b>Ukupno trajanje</b>	<b>11.56</b>
<b>Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompak</b>	<b>3.48</b>

**TABLICA 2. REDOSLIJED I VREMENSKO TRAJANJE POSTUPAK IZGRADNJE, SUŠENJA, TALJENJA TE KOMPAKTIRANJA SPUŽVASTOG ŽELJEZA**

Postupak	PEĆ 1_1 taljenje_HEMATIT							
	SUŠENJE - D - VRATA	ZAGRIJAVANJE - U	TALJENJE	R+U	R+U	R+U	R+U - ZADNJA	VAĐENJE SPUŽVASTOG ŽELJEZA
Vrijeme	9:30	10:00	10:28	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
Trajanje	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:48
POLOŽAJ 1	-	-	-	135	240	233	542	-
POLOŽAJ 2	-	-	-	106	137	143	161	-
POLOŽAJ 3	-	-	-	93	130	151	246	-
POLOŽAJ 4	-	-	-	141	168	201	218	-
POLOŽAJ 5	-	-	-	365	399	434	454	-
POLOŽAJ 6.1 -oko sapnice	-	-	-	453	565	813	542	-

**TABLICA 3. IZMJERENE TEMPERATURE, PEĆ 1, 1. TALJENJE**

## MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (Somogyfajsz, položaj 1.), PEĆ 2.

### OPIS POSTUPKA

Prethodno taljenju močvarne željezne rude u ovoj peći odvio se postupak taljenja rude hematita kao i u peći 1, stoga su stijenke peći bile u potpunosti osušene. Izgrađena su nova vrata peći u koja je umetnuta sapnica te se pristupilo postupku sušenja (19:00h). Vrata peći sušena su istim principom kao i kod peći 1 u prvom taljenju. Redoslijed i vrsta postupaka te omjeri sirovina kod ovog taljenja isti su kao i kod prethodnog. Ritam upuhivanja zraka, nešto je različit. Ritam upuhivanja zraka tijekom taljenja većinom je bio konstantan, a jedno upuhivanje trajalo je oko 3 sekunde (1 sekunda - podizanje prečke mjeha, 2 sekunde - upuhivanje zraka). Ovakvo upuhivanje izvodilo se kontinuirano, bez pauze prije slijedećeg podizanja prečke. Ritam ubacivanja rude i ugljena bio je relativno jednoličan, a vremenski razmak između dva ubacivanja određen je trenutkom spuštanja/sagorjevanja ugljena te je iznosio između 2 i 6 minuta, većinu procesa 3 ili 4 minute. Tijekom postupka u dva navrata je ispuštena tekuća zgura kroz otvor pri dnu vrata. Prvo ispuštanje zgure dogodilo se 3.30 h nakon početka ubacivanja rude niz okno peći (23:32 h). Tijekom postupka peć je značajnije popucala, vertikalno po sredini duž cijele prednje stijenke te oko sapnice. Ove pukotine nisu zatvarane tijekom postupka. Popravljanje peći dogodilo se nakon ispuštanja tekuće zgure kroz otvor podno sapnice, umetanjem svježe gline u otvor i zasipavanjem zemljom. Peć je otvorena u 0:15 h te je spužvasto željezo kompaktirano. Kompaktiranje je izvršeno udaranjem drvenim batom po površini spužvastog željeza postavljenog na drveni panj.

### PEĆ NAKON TALJENJA

Ovo taljenje je drugo po redu u istoj peći, tijekom kojega je peć popucala no konstrukcija je ostala stabilna. Kako bi se izvadilo spužvasto željezo vrata peći su razorena i uklonjena. Dio otpada, u toku izvlačenja spužvastog željeza bačen je neposredno iznad peći na prostor platoa u čiji je rub peć ukopana. Ostatak otpada očišćen je iz prostora ložišta nakon vađenja spužvastog željeza te ostavljen da se hladi do jutra. Sav otpad, zaliven je vodom te potom bačen na plato iznad peći (zadnje taljenje u sezoni). Obzirom da je peć očišćena neposredno po završetku taljenja, u ložištu nisu ostali tragovi zgure niti zapečenog dna. Ispred vrata peći blago se zapekla zemlja pod utjecajem tekuće zgure i vrelog ugljena koji je izbačen tijekom vađenja spužvastog željeza.

### REZULTAT EKSPERIMENTA

Postupkom taljenja proizvedeno je dobro sinterirano spužvasto željezo, konglomerat zgure i željeza. Neposredno nakon taljenja proveden je postupak kompaktiranja i konsolidacije te težina niti volumen spužvastog željeza nije zabilježeni. Zgura nastala taljenjem može se opredijeliti na: solidificiranu tekuću

zguru (curavka, eng. tap slag) i zguru iz unutrašnjosti peći (eng. furnace bottom slag i furnace slag). Prikupljeni su odabrani uzorci različitih tipova zgure i stijenka vrata peći za daljnju makroskopsku, mikroskopsku i geokemijsku analizu. Postupak taljenja (sušenje vrata peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 4h 55 min (Tablica 4.). Utrošeno je oko 12 – 13 kg rude i oko 11 – 13 kg ugljena. Pri taljenju je sudjelovalo troje ljudi. Temperaturni režim (Tablica 5.) ukupno 6 točaka zabilježen tijekom procesa taljenja ukazuje na temperature stijenki peći (2. – 6.), a realne temperature unutar peći/pri tjemenu (1.)

PEĆ 2- MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (SOMOGYGFAJSZ, POLOŽAJ 1.)	
Postupak	Trajanje/h.min
<b>Gradnja peći</b>	<b>izgrađena</b>
<b>Prethodno taljenje</b>	<b>da</b>
<b>Sušenje - vrata</b>	<b>0.30</b>
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	0.30
Taljenje /RUDA + UGLJEN	3.45
<b>Taljenje</b>	<b>4.15</b>
<b>Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza</b>	<b>0.1</b>
<b>Ukupno trajanje</b>	<b>4.55</b>

**TABLICA 4. REDOSLIJED I VREMENSKO TRAJANJE POSTUPAK IZGRADNJE, SUŠENJA, TALJENJA TE KOMPAKTIRANJA SPUŽVASTOG ŽELJEZA**

PEĆ 2- MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (SOMOGYGFAJSZ, POLOŽAJ 1.)							
Trajanje	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:30	4:45
POLOŽAJ 1	467	292	270	352	313	355	530
POLOŽAJ 2	300	144	286	313	357	303	557
POLOŽAJ 3	61	95	240	199	202	211	232
POLOŽAJ 4	64	84	402	658	597	599	583
POLOŽAJ 5	51	89	278	329	301	364	474
POLOŽAJ 6.1 - sapnica	170	172	159	352	253	326	530

**TABLICA 5. IZMJERENE TEMPERATURE, PEĆ 2, 2.TALJENJE**

### 2.3.3. MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (Somogyfajsz, položaj 2.), PEĆ 1.

#### OPIS POSTUPKA

Prethodno taljenju močvarne željezne rude u ovoj peći odvio se postupak taljenja rude hematite (usitnjen) te još dva taljenja praha hematita pretvorenog u svojevrsne pelete s mješavinom vode te mješavinom vode i lokalne gline, stoga su stijenke peći bile u potpunosti osušene. Izgrađena su nova vrata peći u koja je umetnuta sapnice te se pristupilo postupku sušenja. Vrata peći sušena su istim principom kao i kod prethodnih postupaka. Redoslijed i vrsta postupaka te omjeri sirovina kod ovog taljenja ista su kao i kod prethodnih. Ritam upuhivanja zraka izveden je tako da je upuh zraka u peć konstantan bez pauza između dva dizanja prečke/punjenja mijeha zrakom (isto kao i kod taljenja hematitne rude (taljenje r.br.1). Tijekom cijelog postupka taljenja ritam upuhivanja je bio isti, a pojedina sekvenca između dva dizanja prečke bila je 1.5 sekundi. Ritam ubacivanja rude i ugljena bio je relativno jednoličan, a vremenski razmak između dva ubacivanja određen je trenutkom spuštanja/sagorjevanja ugljena te je iznosio između 2 i 6 minuta, većinu procesa 3 ili 4 minute. Tijekom postupka u više navrata je ispuštena tekuća zgura kroz otvor pri dnu vrata. Prvo ispuštanje zgure dogodilo se 1.40 h nakon početka ubacivanja rude niz okno peći (22:40 h), a svako slijedeće u narednih sat vremena svakih 10 minuta. Ispuštena je veća količina tekuće zgure, a nakon 3 ispuštanja, sapnica je pukla te je napravljena pauza od upuhivanja zraka kako bi se zamijenila sapnica. Pauza je trajala oko 6 minuta. Nakon zamjene sapnice tekuća zgura ispuštena je još tri puta, pri čemu se nakon svakog ispuštanja otvor pri dnu vrata ponovno začepio kako bi se održala toplina unutar ložišta peći. Tijekom postupka izmjene sapnice, vrata peći su značajnije popucala te je odlučeno da će se prekinuti ubacivanje novih mjerica rude i ugljena te dovršiti proces sagorjevanjem preostale zapune (23:19). Peć je otvorena u 23:50 h te je spužvastog željezo kompaktirano. Kompaktiranje je izvršeno udaranjem drvenim batom po površini spužvastog željeza. U ovoj fazi je primjećeno značajnije raspadanje spužvastog željeza, što može biti indikativno za kvalitetu samog željeza odnosno viši udio arsena i/ili fosfora u rudi. Visok udio spomenutih elemenata može utjecati negativno na mogućnost mehaničke obrade željeza – kovanje.

#### PEĆ NAKON TALJENJA

U peći 1 izvedena su ukupno 4 taljenja kroz dva dana. Nakon posljednjeg taljenja, primjećene su gotovo iste pukotine kao i nakon prvog taljenja, većinom na pregibu i spojnim dijelovima između ruba ukopa i prednjih stijenki peći odnosno peć je ostala stabilna i moguće ju je ponovno upotrebljavati. Nakon vađenja spužvastog željeza, nije u potpunosti očišćena unutrašnjost peći već je to učinjeno nakon 10 h slijedećeg dana. Postupak je bio otežan jer se preostala zgura zalijepila na dno peći no nakon što je

uklonjena zgura, ostao je tek blago zapečeni trag pri dnu ložišta. Otpad prikupljen iz peći je odbačen van prostora koji se aktivno koristi unutar radionice, na rubni prostor predodređen za otpad.

#### REZULTAT EKSPERIMENTA:

Taljenjem nepržene močvarne željezne rude, uspješno je stvoreno spužvasto željezo međutim postupak taljenja bio je otežan učestalom potrebom za ispuštanje tekuće zgure koja podrazumijeva razbijanje otvora (pri konstrukciji vrata peći, začepljen naknadno radi lakoće razbijanja) pri dnu vrata peći. Uslijed zapunjenosti ložišta peći s tekućom zguricom, kroz sapnicu je počela izlaziti zgura što je rezultiralo pucanjem sapnice. Izmjena sapnice u toku procesa utjecala je na snižavanje temperature ložišta i oštećenje stijenki vrata. Prethodno snižena temperatura i oštećene stijene nepovoljno utječu (mogućnost oksidacije i preniska temperatura u ložištu) na uvjete potrebne za formaciju spužvastog željeza stoga je postupak prekinut te nije iskorištena ukupna količina rude namijenjene za taljenje. Ubačeno je ukupno 27 mjerica od oko 10 kg rude te 8.8 – 9 kg ugljena. Neposredno nakon taljenja proveden je postupak kompaktiranja i konsolidacije te težina niti volumen spužvastog željeza nije zabilježeni. Nastala zgura može se opredijeliti na: solidificiranu tekuću zguru (curavka, eng. tap slag) i zguru iz unutrašnjosti peći (eng. furnace bottom slag i furnace slag). Kompaktiranjem je nastala druga vrsta zgure, među kojom su vidljivi i uloci spužvastog željeza. Prikupljeni su odabrani uzorci različitih tipova zgure i stijenka vrata peći za daljnju mikroskopsku i geokemijsku analizu koje će omogućiti usporedbu rezultata taljenja pržene i nepržene močvarne rude. Preliminarno je moguće zaključiti da se kod taljenja nepržene močvarne rude stvorila puno veća količina tekuće zgure što bi upućivalo na zaključak da se kod ove rude radi o puno više nečistoća te da bi količina proizvedenog željeza bila manja. Također, ova razlika u kvaliteti utječe na lakoću i uspješnost postupka taljenja. Obzirom da se radi o rudi s drugog položaja od rude iz prethodnog taljenja, moguće je i da se radi o različitom kemijskom sastavu rude, potencijalno većem udjelu nečistoća i elemenata poput arsena i fosfora koji su dodatno utjecali na nepovoljnije rezultate taljenja. Postupak taljenja (sušenje vrata peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 3 h i 49 minuta (Tablica 6.). Pri taljenju je sudjelovalo troje ljudi. Temperaturni režim (Tablica 7.) ukupno 6 točaka zabilježen tijekom procesa taljenja ukazuje na temperature stijenki peći (2. – 6.), a realne temperature unutar peći/pri tjemenu (1.)

<b>PEĆ 1- MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (SOMOGYFAJSZ, POLOŽAJ 2.)</b>	
Postupak	Trajanje/h.min
<b>Gradnja peći</b>	<b>izgrađena</b>
<b>Prethodno taljenje</b>	<b>da (3x)</b>
<b>Sušenje - vrata</b>	<b>0.30</b>
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	0.30
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.19
<b>Taljenje</b>	<b>2.39</b>
<b>Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza</b>	<b>0.1</b>
<b>Ukupno trajanje</b>	<b>3.49</b>

**TABLICA 6. TRAJANJE POJEDINIH POSTUPAKA, PEĆ 1., 3. TALJENJE**

<b>PEĆ 1.- MOČVARNA ŽELJEZNA RUDA (SOMOGYFAJSZ, POLOŽAJ 2.)</b>							
Trajanje	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:30
POLOŽAJ 1	408	322	245	282	398	487	398
POLOŽAJ 2	63	112	131	114	139	397	316
POLOŽAJ 3	54	93	99	119	183	226	231
POLOŽAJ 4	57	103	323	460	524	339	365
POLOŽAJ 5	62	103	198	333	500	567	408
POLOŽAJ 6.1- sapnica	82	104	448	309	361	370	374

**TABLICA 7. IZMJERENE TEMPERATURE, PEĆ 1, 3. TALJENJE**

### 3. PRIMARNO KOVANJE

Spužvasto željezo dobiveno svim taljenjima dodatno je procesuirano te obrađeno u komad željeza, svojevrsni ingot. Ovaj postupak naziva se primarno kovanje a podrazumijeva konsolidaciju spužvastog željeza I izradu poluproizvoda, komada pročišćenog željeza. Detaljno je dokumentiran postupak kod obrade spužvastog željeza dobivenog prvim taljenjem rude hematita.

**Metoda dokumentiranja:** Proces primarnog kovanja dokumentiran je opisno i fotografski. Zabilježeno je vrijeme trajanja određenih postupaka i cjelokupnog procesa. Izmjerena je temperature žara te spužvastog željeza u trenutku vađenja i vraćanja u vatru tijekom cijelog procesa. Nakon završetka procesa izdvojeni su referentni uzorci. Detaljno je dokumentirana konstrukcija peći te tragovi koji su bili vidljivi u prostoru kovačkog ognjišta radnog prostora nakon postupka.

#### 3.1. KOVAČKO OGNJIŠTE

Kovačka peć/ognjište izgrađena i korištena je proteklih godina radionice. Kroz vremenski period od godinu dana, osnovna konstrukcija se djelomično urušila stoga je peć popravljena. Peć je izdignuta od tla zemljanim nasipom visine oko 30 cm. Rubovi peći, izdignuti nad nasipom građeni su od bazaltnog kamena kao kostur konstrukcije a prostor između kamena zapunjen je pjeskovitom lokalnom glinom. Ukupna visina konstrukcije je oko 45- 50 cm. Sapnica je ugrađena u bočnu stranu peći, oko 15 cm više od dna ložišta. Peć je tlocrtno četvrtastog, blago potkovastog oblika. Isprva je građena s dvije bočne stijenke (kao kovačka peć za izradu predmeta), no u toku prvog kovanja spužvastog željeza, nadograđena je 3 stijenka te je peć ostala otvorena samo s jedne strane. Mijeh je postavljen s bočne strane, otvorom prema sapnici. Mijeh se zapunjava sa zrakom uz pomoć konstrukcije, tronošca s prečkom za vertikalno spuštanje i dizanje. Na stražnji dio je pričvršćen uteg težine oko 7 – 10 kg, koji se pri podizanju prečke spušta u cilindričnu jamu promjera oko 25 cm. Zapremnina mijeha je oko 1m<sup>3</sup>.

#### 3.2. POSTUPAK PRIMARNOG KOVANJA

##### OPIS POSTUPKA

Peć je prvotno prosušena paljenjem vatre uz pomoć treščica te je sat vremena prije no što se očekivala obrada spužvastog željeza ubačen i sagorjevan ugljen. Stvorila se zapuna od gorenog ugljena, kapacitet peći gotovo je u potpunosti zapunjen. Spužvasto željezo nakon kompaktiranja drvenim čekićem,

ostavljeno je uz rub kovačke peći dok se dodatno ugljen nije razgorio te je ubačeno u kovačko ognjište/peć. Spužvasto željezo postavlja se na podlogu od gorećeg ugljena, udaljeno 10 – 15 cm od otvora sapnice te se prekriva ugljenom. Temperatura spužvastog željeza pod kraj kompaktiranja bila je 1184 °C a u trenu ubacivanja u peć 754 °C. Kroz 13 minuta spužvasto željezo ohladilo se za 390 °C. Prvo zagrijavanje, koje je podrazumijevalo dizanje temperature za 506 °C (748 °C – 1244 °C) trajalo je 10 minuta dok su kroz postupak u prosjeku pojedinačna zagrijavanja trajala od 2 do 5 minuta, prosječno 3-4 minute. Pri obradi spužvastog željeza u svojevrsni ingot tj. komad željeza ukupno je izvedeno 32 sekvence zagrijavanja, vađenja i kovanja te vraćanja u vatru. Nakon vađenja, naizmjeničnim udarcima metalnim čekićem sabijano je spužvasto željezo na nakovnju. Nakon svake obrade očišćen je nakovanj metalnom četkom kako bi se uklonili ostaci tzv. kovačkih listića, otpada koji nastaje prilikom kovačke obrade. Temperature užarenog spužvastog željeza pri vađenju iz peći iznosile su između 1262 °C – 1028 °C, a kovanje je prekidano u trenutku kada se željezo ohladilo na temperature 1117 °C – 910 °C odnosno kada, prema procjeni kovača, efikasno kovanje više nije bilo moguće. Primjećeno je da se temperature pri vađenju smanjuju protokom vremena odnosno opći niži trend temperature primjećen je paralelno s izbacivanjem veće količine nečistoća, ostataka zgure. Ova situacija uočena je nakon čišćenja peći. Peć je očišćena od zgure jednom u toku postupka pri čemu je izdvojena kompozitna kovačka zgura (eng. plano convex cake – PCC). Čišćenje se odvijalo u trenutku kada je zgura dosegla razinu visine sapnice, pola sata nakon početka postupka. Kako se spužvasto željezo sve više obrađivalo i izbacivala se zarobljena zgura, volumen se smanjivao te je postojala potreba za promjenom alata. U toku obrade izmjenjene su tri veličine kovačkih kliješta i dvije veličine čekića. U postupku je sudjelovalo 5 ljudi, jedna osoba raspirivala je vatru, 3 osobe naizmjenično su udarale spužvasto željezo dok je jedna osoba pridržavala spužvasto željezo na nakovnju. Minimalan broj ljudi potreban za primarno kovanje je 1 (manja efikasnost) ili 2 dok je procijenjeni maksimalan broj 5. Pri postupku obrade pukotine na željezu su više puta zasipane boraksom, koji ima taliteljska svojstva te djeluje kao fluks odnosno snižava točku topljenja neželjenih željeznih oksida i pri tome olakšava njihovo odstranjivanje. Istu funkciju mogle bi imati i neke vrste pijeska.

## REZULTAT PRIMARNOG KOVANJA

Postupak je trajao 2 h 09 min, a proizveden je komad željeza, ingot namijenjen za daljnju obradu. U toku postupka, nakon ¼ vremena obrade, pokušao se raskovati i preklopiti ulomak, no pukao je te je proces nastavljen s većim ulomkom. Uzorak zgure uzet je iz peći nakon što je odvojen manji ulomak. Nakon dodatne dvije sekvence zagrijavanja i oblikovanja izvađen je ulomak zgure koja se formirala u kompozit,



neposredno ispod sapnice pri dnu peći.<sup>3</sup> Tragovi opisanog postupka odvajanja manjeg ulomka vidljivi su u obliku kompozita. Prikupljeni su uzorci otpada nastalog ovim postupkom, a otpad se može podijeliti na tri skupine: 1) otpad od kompaktiranja spužvastog željeza 2) kompozitna kovačka zgura (PCC – plano convex cake) iz ognjišta za zagrijavanje 3) manji ulomci kovačke zgure iz ognjišta 4) kovački listići.

Dokumentirana je kovačka peć nakon jednog kovanja ali i nakon višestruke uporabe (primarno kovanje ukupno 8 spužvastih željeza te kovanje predmeta). Dokumentirana je disperzija kovačke zgure; kovačkih listića oko nakovnja te mjesto odlaganja zgure iz peći.

#### 4. PROSTORNA ORGANIZACIJA RADIONICE

Dokumentirana prostorna organizacija radionice ukazuje na postojanje jasno odvojenih prostora za određene aktivnosti/stadije koje vode proizvodnji željeza : 1) priprema sirovina 2) taljenje željezne rude 3) primarno kovanje i/ ili kovanje 4) ciljano deponiranje otpada. Međusobno slijedom direktno povezane aktivnosti nalaze se u neposrednoj blizini (primjerice priprema drva i ugljenice, usitnjavanje rude i mjesto prženja, taljenje i primarno kovanje). Distribucija aktivnosti ujedno utječe na distribuciju tragova određenih struktura (peći, ognjišta, structure za prženje i dodatne strukture poput ukopa na mjestu vađenja zemlje ili gline) ali i distribuciju otpada stvorenog pri proizvodnji željeza. Iako postoji prostor za ciljano deponiranje otpada, koje se odvijalo obično dan nakon postupaka taljenja, dio otpada odbacivan je neposredno uz peći (plato u koji su ukopane peći) kako bi se oslobodio prostor pri vađenju spužvastog željeza iz peći. Glavninu ovog otpada čine razorene stijenke vrata peći i sapnice te djelomično talionički otpad koji je u trenutku vađenja spužvastog željeza izvađen iz peći (zgura iz ložišta) ili curavka koja je uklanjana neposredno nakon što je puštena van peći. Ostatak zgure iz ložišta bačen je na deponiju uz rub radnog prostora radionice, tek slijedećeg dana. Ovaj otpad mahom čini zgura s dna i unutrašnjosti peći (eng. furnace bottom slag i furnace slag).

Pri primarnom kovanju peć je višestruko čišćena a otpad, kojeg je količinski manje od talioničkog otpada, odlagan je uz rub prostora kovačke aktivnosti. Tek veći komadi skupljeni su i bačeni na prostor za deponiranje otpada po završetku svih aktivnosti u radionici. Uzorke sirovina, poput rude moguće je pronaći uz prostor prženja i usitnjavanja tj. pripreme ali i uz talioničke peći, prostor koji je bio korišten za pivremeno skladištenje korištenih sirovina (ugljena i rude).

---

<sup>3</sup> Uzorak je uzet prije tretiranja borkasom te zasebno izdvojen. U ovom trenutku ingot je bio već dobrim dijelom formiran te su ostaci zgure dodatne obrade bili tek manji ulomci kovačkog otpada.

