

Tena Karavidović

Institut za arheologiju

Ljudevita Gaja 32

10 000 Zagreb

IZVJEŠĆE



O eksperimentima provedenim u sklopu radionice
“Tajne željeza”, Renesansi festival,
Koprivnica 2020.

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.

U Zagrebu, 04. 02., 2020. godine



HRZZ
Hrvatska zaklada
za znanost



TransFER

Radionica: Tajne željeza

Organizator: Institut za arheologiju, Muzej grada Koprivnice

Datum: od 26 – 28. kolovoza 2019.

Mjesto održavanja: Manifestacija „Renesansni festival“, Koprivnica, Hrvatska

Sudionici:

Institut za arheologiju

Tena Karavidović, Tajana Sekelj Ivančan, Tanja Tkalčec, Siniša Krznar, Katarina Botić

Muzej grada Koprivnice

Ivan Valent, Robert Čimin, Saša Hrenić, Maša Zamljačanec, Ana Škvarić

Rudarsko-naftno-geološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Tomislav Brenko

Ostala stručna ekipa:

Ivan Zvijerac, Mario Bodružić, Tomislav Sokač, Ana Čimin, Antonija Čimin, Tea Lukanec

UVOD

Tijek radionice (22. - 23. kolovoza 2019.)

- 22. kolovoz
 - Prženje rude i izgradnja peći za taljenje (peć 1 i 2)
- 23. kolovoz
 - Priprema sirovina: ruda i ugljen (usitnjavanje)
 - Izgradnja peći (peć 2 i 3) i taljenje željezne rude (peć 1 i 2)
- 24. kolovoz
 - taljenje željezne rude (peć 1, 2, 3) i primarno kovanje
- 25. kolovoz
 - čišćenje radionice
- 31. Kolovoz
 - U tjednu nakon završetka Renesansnog festivala u Koprivnici provedena je simulacija arheoloških iskopavanja izgrađenih peći i osnovna obrada otpada nastalog pri taljenju. Ukupno je snimljeno 378 digitalnih fotografija (I. Valent, T. Karavidović, T. Sekelj Ivančan).

Tijekom pet dana trajanja radionice, rekonstruiran je direktni proces proizvodnje željeza iz željezne rude te postupak primarnog kovanja. Proces je podrazumijevao: pripremu sirovina (ugljen, glina, ruda), izgradnju peći za taljenje i kovačke peći te postupke taljenja i primarnog kovanja (kompaktiranje i konsolidacija spužvastog željeza te oblikovanje „ingota“). Svi postupci su detaljno dokumentirani, sav nastali otpad je arheološki obrađen i dokumentiran te su prikupljeni referentni uzorci za daljnju analizu. Izgrađene su tri talioničke peći u kojima je izvedeno pet pojedinačnih taljenja te kovačko ognjište korišteno za konsolidaciju spužvastog željeza. Rekonstrukcija peći za taljenje temelji se na arheološkim ostacima s lokaliteta Virje – Volarski breg i Sušine te Hlebine - Velike Hlebine dok se rekonstrukcija peći u kojoj je obavljena konsolidacija spužvastog željeza temelji na ostacima arheološke tvorevine pronađene na lokalitetu Hlebine – Dedanovice. Izgrađene rekonstrukcije peći za taljenje predstavljaju dva osnovna tipa peći, jamske peći s nakupljenom zgurom i peći s ispuštenom tekućom zgurom.

Cilj eksperimenata:

- Imitativni eksperiment :
 - rekonstrukcija i testiranje talioničkih peći. Peći su rekonstruirane na temelju arheološkog zapisa s lokaliteta Virje-Volarski breg i Virje-Sušine, Hlebine – Velike Hlebine.
 - Rekonstrukcija i testiranje pretpostavljene kovačke peći istražene na lokalitetu Hlebine-Dedanovice.
- Definiranje utjecaja različitih vrsta pripreme rude (prženje, usitnjavanje) na karakteristike rude te postupak taljenja i krajnji proizvod.

Metoda dokumentiranja

Cjelokupni proces, od prikupljanja sirovina preko izgradnje i korištenja peći dokumentiran je fotografski i opisno. Pomoću infracrvenog termometra (Volcraft IR +2200 – 50D) dokumentirane su temperature prženja rude na otvorenoj vatri te temperature vanjskih stijenki talioničkih peći kao i unutrašnjosti peći. Zabilježene su i temperature spuzvastog željeza po vađenju iz peći i prilikom kovanja te temperatura tekuće zgure. Zabilježeno je vrijeme trajanja pojedinih postupaka i količina utrošenih sirovina. Produkt taljenja, spuzvasto željezo je kompaktirano po vađenju iz peći te konsolidirano u kovačkom ognjištu. Sav nastali otpad iz svih taljenja i konsolidacije je dokumentiran i arheološki obrađen. Korištene su metode obrade karakteristične za obradu arheoloških uzoraka.

ESPERIMENTALNO TESTIRANJE:

REKONSTRUKCIJA POSTUPAKA PRIPREME RUDE I UTJECAJ NA SVOJSTVA RUDE, POSTUPAK TALJENJA I KRAJNI PROIZVOD

Prema rezultatima mineraloških analiza ulomaka rude pronađene pri arheološkim istraživanjima lokaliteta s prostora Podravine na kojima su se odvijale metalurške aktivnosti ustanovljeno je da postoje razlike u njihovom mineraloškom sastavu koje mogu upućivati na različit način pripreme ruda za taljenje. Razlike se očituju među uzorcima s lokaliteta različite vremenske pripadnosti te upućuju na razlike u koracima koji prethode samom postupku taljenja. Osnovni cilj postupaka pripreme rude (ako su izvođeni) je obogaćivanje ruda u svrhu pozitivnog utjecaja na postupak taljenja, stoga se postavlja pitanje na koji način su rude bile pripremane i obrađene prethodno taljenju te kakav utjecaj različit način pripreme ima na postupak taljenja, ali i krajnji proizvod. Cilj eksperimentalnog prženja i usitnjavanja ruda bila je rekonstrukcija postupaka u svrhu interpretacije arheoloških nalaza i zapisa te definiranje utjecaja pirometalurške pripreme na svojstva močvarne željezne rude korištene u eksperimentima. Također, cilj eksperimenta je testirati različite načine pripreme rude u svrhu definiranja njihovog utjecaja na sam postupak taljenja i krajnji proizvod. Stoga je kroz 4 eksperimentalna taljenja rude testirana različito pripremljena ruda. Taljena je ruda u sirovom i prženom stanju, u dva uzorka dimenzija (Slika 8.).

Eksperiment 1: UTJECAJ PIROMETALURŠKE PRIPREME NA SVOJSTVA RUDE

Opis postupka

Neposredno nakon prikupljanja močvarna željezna ruda je isprana u obližnjem potoku (Karavidović 2019: 3 – 4)¹ te se sušila dva dana (nije se u potpunosti osušila) na otvorenom u hladu te je potom uslijedio postupak prženja. Prilikom transporta od ležišta do mjesta taljenja dio grumenja rude se usitnio dok su veće gromade pripremljene za prženje usitnjavanjem. Veličine ulomaka varirale su od 15 x 15 cm

¹ Neobjavljeno izvješće, dostupno na web adresi: http://transfer.iarh.hr/images/5.-10.7.2019._izvjesce_Somogy_29.07-converted.pdf

do oko 5 x 5 cm i kugličastih nakupina dimenzija ispod 2 cm. Ruda je već u ovom stadiju odvojena prema veličini ulomaka te su veći ulomci slagani u sredinu drvene konstrukcije ložišta a manji uz rubove. Prženje se odvijalo na otvorenoj vatri, a ložište je pripremljeno od suhih polovina/četvrti uzdužno rezanog drva jele s korom i dasaka jelovine. Konstrukcija je slagana vertikalno u redovima, u vidu rešetke (dim. Š = 1 , D = 1 m, V = 43 cm.), a ruda je polagana između redova drva (Slika 1.). Po završetku slaganja, konstrukcija je stožasto obložena suhim daskama te potpaljena uz pomoć suhog granja lokalnog drveća različite vrste. Ložište je nakon potpale kontinuirano gorilo te se u potpunosti ohladilo idući dan kada je sakupljena ruda. Tijekom eksperimenta mjerena je temperatura vatre s infracrvenim pirometrom² na ukupno 3 položaja (Slika 4.): vanjska površina ulomaka rude (temperatura djelovanja vatre na vanjsku stranu grumenja rude, položaj 1. - 2.) i unutrašnjost vatre (temperature djelovanja vatre na unutrašnju stijenku rude, položaj 2.1.). Vremenski razmak pojedinog mjerenja bio je pola sata. Kako bi se ustanovila razlika u masi sirove i pržene rude, odabrani ulomak i ukupna količina rude izmjerena je prije i nakon prženja. Prikupljeni su uzorci pržene i sirove rude za daljnu geokemijsku i mikroskopsku obradu.



Slika 1. Priprema i postupak prženja rude

² Infracrveni pirometar marke Volcraft IR 2200- 50D postavljen na $\epsilon = 0.83$

Rezultati eksperimenta

Ruda je pržena ukupno 6 sati kada je primijećeno jenjavanje vatre, no hlađenje je potrajalo do idućeg dana (ukupno 20 sati). Promjena boje rude primijećena je već nakon pola sata prženja. Razlike u izgledu sirove i pržene rude očituju se prvenstveno u boji ali i konzistenciji. Ulomci sirove rude bili su nejednolične boje koja je varirala od narančasto – smeđe, žućkasto - oker - smeđe i crvenkaste i crne. Kao posljedica prženja površinska boja ulomaka se izmijenila u žuto – crvenkasto, intenzivno crveno, smeđe - crno – plavičasto i gotovo rozu boju (Slika 2.). Pojedini ulomci rude imaju nejednolično zastupljene sve boje. Nejednoličnost u boji ukazuje na heterogen sastav rude odnosno nejednolično prženje a nastaje zbog uvjeta pod kojima je ruda pržena (oksidacijsko – reduksijski uvjeti otvorene vatre, temperature gorenja, trajanje gorenja). Razlika u konzistenciji rude je također bila površinski vidljiva, ulomci su porozniji te lakše lomljivi. Maksimalni raspon temperature između svih mjerenih položaja kroz cijelo vrijeme trajanja postupka sežao je između 299 i 1038 °C (Slika 3.). Prosječne temperature po pojedinom položaju i prema vremenu trajanja kao i temperaturni režim tijekom trajanja procesa pokazuje sličan opći trend kod svih položaja (Slika 4.). Nakon prvih sat vremena trajanja postupka, vatra se stabilizirala, a temperaturni uvjeti na svim položajima kretali su se od 300 do 620 °C, u prosjeku većinom između 500 i 650 °C . Sličan trend temperaturnog režima na svim izmjenjenim položajima, tijekom cijelog postupka ukazuje da je ovakav tip optimalniji izbor ako je cilj ravnomjernije i jednoličnije prženje naspram drugačijeg tipa konstrukcije poput stošca.³ Postignute temperature ali i boje rude ukazuju da je kao rezultat prženja močvarna željezna ruda (getit) pri zagrijavanju uz pristup kisika mogla prijeći u hematit ($2\text{FeO} \cdot \text{OH} + \text{toplina} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$) pri temperaturi od 300 do 500 °C na što bi ukazivali crvenkasti tonovi ulomaka. Daljnjim povećanjem temperature i pri reduksijskim uvjetima hematit se mogao reducirati u magnetit ($3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$), na što bi upućivala plavičasto crna boja pojedinih ulomaka. Iako reduksijske uvjete ne treba očekivati na otvorenoj vatri, reduksijsku atmosferu teoretski je moguće mjestimično postići na otvorenoj vatri pri unutrašnjem dijelu ložišne konstrukcije. Ipak, boja rude ukazuje na nejednolično prženja te je moguće očekivati heterogenost u mineralnim fazama u pojedinim uzorcima. Heterogen sastav mineralnih faza (getit i magnetit) uočen je kod uzoraka (N -233, 242) s arheoloških istraživanja lokaliteta Hlebine – Velike Hlebine te može

³ Eksperimentalno prženje rude istog podrijetla na otvorenoj vatri gdje je ruda posložena na ložište u obliku stošca izvedeno je i opisano: Karavidović T. 2019 (http://transfer.iarh.hr/images/5.-10.7.2019._izvijesce_Somogy_29.07-converted.pdf)

svjedočiti o nejednoličnim temperaturnim uvjetima, sličnim provedenim eksperimentima. Da bi se postigao jednoličan sastav kakav je primjerice poznat s lokaliteta Hlebina - Dedanovice, postupak prženja trebao je teći u još ravnomjernijim temperaturnim uvjetima, moguće trajati duže, a pozitivno bi utjecalo i sušenje rude prije prženja te razbijanje ulomaka na ujednačene dimenzije. Također, usitnjavanje rude prije prženja olakšalo bi sam postupak prženja obzirom da bi se time površina reakcije za proces oksidacije i/ili redukcije povećala te bi proces tekao ravnomjernije.

A



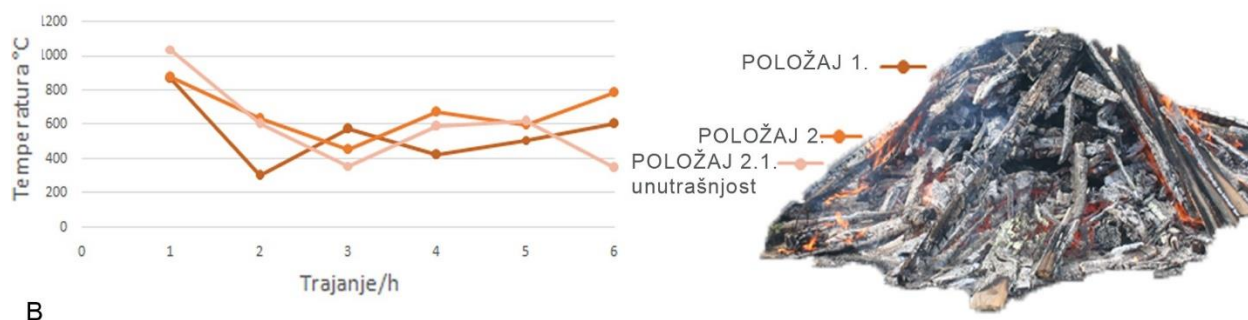
B



Slika 2. Ulomci rude: A) prije prženja , B) nakon prženja

	TRAJANJE/h							
Položaj mjerenja	0:00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	temperatura °C /položaj
	TEMPERATURA °C							
POLOŽAJ 1	872	299	571	422	508	604	582	551.1
POLOŽAJ 2	877	635	450	669	600	786	427	634.9
POLOŽAJ 2.1	1038	602	357	589	620	347	327	554.3
Prosječna temperatura °C/vrijeme	929	512	459	560	576	579	445	

Slika 3. Izmjerene temperature prilikom prženja rude



Slika 4. Grafički prikaz temperaturnog režima na izmjenjenim položajima tijekom postupka prženja

Tijekom postupka utrošeno je između 0.43 m³ i 0.45 m³ suhog drva⁴ za prženje oko 60 kg sirove rude (Slika 3). Težina uzorka rude izmjerena je prije i nakon prženja te ukazuje da je ruda izgubila na težini 42% (težina 1. = 300 g, težina 2. = 175 g), što je moguće pripisati gubitku vode. Pojedini ulomci su se uslijed prženja odlomili te usitnili na veličine ispod 1 cm x 1 cm⁵ pa ih se nije uspjelo skupiti po završetku postupka prženja (gotovo 3.3 kg pržene rude, 5.5% težine nepržene rude), odnosno iz 60 kg bilo je moguće prikupiti ukupno 31.5 kg pržene rude (52.5% ukupne težine nepržene rude).

⁴ Volumen je izračunat na osnovu formule za volumen pravokutnika: $V = \text{š} \times d \times v$

⁵ „Pucanje“ ulomaka rude bilo je moguće čuti tijekom postupka. Ovakve „mikroeksplozije“ moguće je pripisati pritisku koji stvara voda u strukturi rude u trenutku u kojemu dosegne temperaturu vrenja (Pleiner 2000: 114).

Eksperiment	Ruda/vrsta	Količina /prije prženja	Količina /nakon prženja	Gubitak prženje	Gubitak usitnjavanje	Gorivo
Koprivnica 2019	Mžd - Somogy	80 kg / 300 g	31.5 kg / 175 g	42%	5.5 %	0.43 m ³ - 0.45 m ³

Slika 5. Tablični prikaz vrste i utroška sirovina

U svrhu usporedbe s arheološkim zapisom, nakon procesa prženja očišćen je prostor te su dokumentirani nastali tragovi (Slika 5.) . Tragovi zapečenog dna nisu bili jasno izraženi već je tlo bilo mjestimično i neravnomjerno zapečeno. Maksimalni raspon temperature koja je djelovala na tlo bio je od 1038 °C do 357 °C kroz 6 sati. Višestrukim prženjem na istom mjestu, tragovi bi vjerojatno bili jače izraženi. Nekoliko plitkih jama zapečenog dna, tlocrtno relativno pravilnog kružnog oblika istraženo je u okviru prostora talioničke radionice na lokalitetu Hlebine – Velike Hlebine (Sekelj Ivančan 2018; Sekelj Ivančan i Valent 2017).



Slika 5. Pržena ruda nakon hlađenja i tragovi prženja nakon čišćenja

Eksperiment 2: REKONSTRUKCIJA TALIONIČKIH PEĆI, UTJECAJ RAZLIČITO PRIPREMLJENE RUDE NA POSTUPAK TALJENJA I KRAJNI PROIZVOD

Cilj eksperimentalnog testiranja:

- rekonstrukcija samostojeće peći s plitkim ognjištem i jamske peći te postupka taljenja
- utjecaj različite pripreme rude na postupak taljenja i krajnji proizvod
- definirati utrošak energije, vremena i resursa
- obrada otpada i proizvoda u svrhu usporedbe s arheološkim nalazima vezanim uz metalurške aktivnosti taljenja željezne rude i post-redukcijsku obradu (kompaktiranja i konsolidacije-primarnog kovanja)

Izgradnja rekonstrukcija peći (peć 1, 2, 3)

Talioničke peći rekonstruirane su na temelju arheoloških ostataka peći na lokalitetima Virje – Volarski breg, Hlebine – Velike Hlebine (samostojeće peći na istek s plitkim ognjištem) i Virje Sušine (jamska peć?). Izgrađene su dvije samostojeće talioničke peći s plitkim ognjištem (Peć 1 i 2) te jedna jamska peć (Peć 3).

Na temelju arheoloških ostataka moguće je odrediti dimenzije i karakteristike ognjišta peći, debljinu i sustav gradnje stijenki peći i vrata te karakteristike i dimenzije sapnica. Međutim visina peći predodređena je prema rezultatima eksperimenata koje je moguće pronaći u arheološkoj literaturi.

Za izgradnju peći korištena je ilovača lokalnog podrijetla s prostora Podravine. Pri izgradnji peći ilovača je umiješana s pijeskom (omjer ilovača 3:1 pijesak). Cilj stvaranja ovakve glinene smjese za izgradnju peći je imitacija građevnog materijala kakav je korišten u arheološkim razdobljima, a ustanovljen je na temelju makroskopske analize otpada (stijenki peći) s prethodno spomenutih lokaliteta. Peći su građene redanjem valjaka oblikovanih od prethodno pripremljene glinene smjese. Redovi valjaka dobro su utisnuti te su vertikalnim povlačenjem uzduž stijenki dodatno međusobno povezani. Ovakav sustav gradnje nalikuje na izgradnju keramičkih posuda (eng. *coiling*). Tijekom izgradnje peći rađene su pauze jer nije bilo moguće dizati konstrukciju kontinuirano zbog tendencije deformiranja forme peći. Moguće da je utjecaj na deformiranje stijenki peći imao visok udio vlage u glinenoj smjesi. Također, peći su

građene bez ikakve konstrukcije koja bi činila oslonac pri gradnji. Ovakav sustav gradnje primijenjen je jer nisu primijećeni tragovi pruća ili bilo kakve potporne konstrukcije dok su tragovi valjkastih elemenata stijenki slaganih u redovima prepoznati pri makroskopskoj obradi stijenki peći sa spomenutih lokaliteta.

Peći 1 i 2 pripadaju tipu peći s ispuštenom zgurou koje karakterizira plitko ognjište a tijekom postupka se nakupljena zgura ispušta izvan peći. Ove dvije peći sličnih su dimenzija i zapremnine; visina nadzemnog dijela oko 70 cm odnosno 79 i 80 cm ukupne visine (uključujući plitko ognjište dubine 9 - 10 cm). U tlo je ukopana plitka jamica dubine 9 - 10 cm, promjera 35 cm. Debljina stijenki peći pri izgradnji varirala je između 5 i 6 cm pri dnu peći (prvih 30 cm visine), te 4 – 5 cm pri vrhu. Promjer otvora peći je 15 cm (peć 1) i 13.5 cm (peć 2). Obje peći imale su na prednjem dijelu vrata relativno pravilnog oblika, načinjena iz jednog dijela (dim: 25 x 25 cm (peć 1) i 22 x 23 cm (peć 2)), u koja je bila umetnuta sapnica. Sapnice su postavljene kod obje peći pri svakom taljenju blago pod koso (prema ložištu) na približno jednaku visinu, oko 10 – 11 cm od dna vrata, što uzevši u obzir jamicu u ložištu čini ukupno cca 20 cm od dna ložišta. Sve sapnice su izrađene od iste glinene smjese kao i stijenke peći. U vrata su umetnute u suhom, djelomično ispečenom stanju. Prethodno umetanju u vrata sapnice su osušene na zraku, zagrijane uz rub otvorene vatre te potom djelomično ispečene umetanjem u vatrište. Izgradnja pojedine peći ukupno je trajala oko 8 sati (Slika 6.).



Slika 6. Faze izgradnje Peći 1 i 2.

Jamske peći (Peć 3, Slika 7.) karakterizira ukopana jama u koju se prilikom taljenja spušta talionička zgura. Rekonstrukcija dimenzija jame napravljena je prema podacima s lokaliteta Virje - Sušine, na kojemu su pronađeni plitki ukopi zapunjeni zgurom. Iskopana je jama, tlocrtno pravilnog kružnog oblika, dubine 25 cm, promjera 30 cm. Konstrukcija nadzemnog dijela jamske peći izvedena je jednakim sustavom izgradnje kao i kod peći s plitkim ognjištem, pomoću valjaka glinene smjese. Ukupna visina nadzemnog dijela konstrukcije je 72 cm, odnosno visina peći s jamom je 92 – 93 cm. Kod jamske peći vrata nisu umetana zasebno već je sapnica ugrađena direktno u stijenku peći prilikom izgradnje, a postavljena je blago pod koso prema jami na visinu od oko 15 cm od vrha jame tj. dna nadzemne konstrukcije, odnosno oko 40 cm od dna jame za taloženje zgure. Izgradnja jamske peći provedena je kroz dva dana a ukupno je trajala 11 sati.





Slika 7. Faze izgradnje Peći 3.

Postupak taljenja

Sirovine

U eksperimentima je korištena močvarna željezna ruda prikupljena na prostoru okruga Somogy, Republika Mađarska (detaljnije: Karavidović, T. 2019a: 3 – 4)⁶ i limonitna ruda s prostora Olomuchany, Republika Češka (detaljnije: Karavidović, T. 2019b). Za taljenja je korišten drveni ugljen lokalne proizvodnje (ugljenice iz okolice Križevaca), mješavina drva bukve i graba. Peći su sušene paljenjem vatre u ložištu, koristeći se pritom različitim vrstama suhog drva (grane) lokalnog podrijetla.

Osmišljeno eksperimentalno testiranje (Slika 8.) podrazumijevalo je nekoliko taljenja različito pripremljene rude (pirometalurška priprema i usitnjavanje) te različitih vrsta ruda (limonit (Olomuchany) i getit (Somogy)). U svrhu definiranja razlika između različite razine pripreme rude u peći 1 taljena je ruda s i bez pirometalurške pripreme (prženja), jednake granulacije (Slika 8) u dva zasebna postupka. Ostali uvjeti (ritam upuhivanja zraka, veličina mijeha, količina i svojstva ugljena) bili su isti kod oba

⁶ Neobjavljeno izvješće, moguće pronaći na web adresi : http://transfer.iarh.hr/images/5.-10.7.2019._izvjesce_Somogy_29.07-converted.pdf

taljenja. Pržena ruda različite granulacije odnosno veličine ulomaka rude taljena je usporedno u peći 1 i peći 2.

Drugi cilj bio je usporediti različite rude i njihov utjecaj na postupak i krajnji proizvod stoga je taljena i pržena limonitna ruda geogenog podrijetla s područja Češke (Olomuchany) kako bi se usporedio postupak s taljenjem močvarne željezne rude (Somogy). Ova ruda taljena je u peći 2.

U jamskoj peći taljena je pržena ruda, granulacije kao u peći 1., 1 taljenje.

Peć br.	Taljenje br.	Ruda	Granulacija /ruda	Priprema	Količina ruda kg	Ugljen /vrsta	Ugljen /dimenzije
1	1	MŽD, SOMOGY	4x2 – 2x2 cm	Pržena, usitnjena	12	BUKVA I GRAB	5x3/2, 2x2 cm
1	2	MŽD, SOMOGY	4x2 – 2x2 cm	Sirova, usitnjena	12	BUKVA I GRAB	5x3/2, 2x2 cm
2	1	MŽD, SOMOGY	< 2x2 i rudni prah	Pržena, usitnjena	12	BUKVA I GRAB	5x3/2, 2x2 cm
2	2	LIMONIT, OLOMUCANY	4x2 - 2 x 2 cm	Pržena, usitnjena	12	BUKVA I GRAB	5x3/2, 2x2 cm
3	1	MŽD, SOMOGY	4x2 – 2x2 cm	Pržena, usitnjena	7.5	BUKVA I GRAB	5x3/2, 2x2 cm

Slika 8. Tablični prikaz vrsta, količine i načina pripreme sirovina za eksperimentalno taljenje u svim pećima

Tijek postupaka

Samostojeće peći s plitkim ognjištem (peć 1 i 2)

Postupak taljenja u samostojećim pećima s plitkim ognjištem obavljen je po dva puta u svakoj peći (Slika 8, Peć 1 i 2). Svaki postupak podrazumijevao je nekoliko koraka:

- 1) sušenje stijenki peći i/ili vrata peći
- 2) zapunjavanje peći ugljenom (zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere)
- 3) zapunjavanje peći mješavinom ugljena i rude
- 4) zapunjavanje ugljenom
- 5) otvaranje vrata i ekstrakcija spužvastog željeza.

Sušenje stijenki peći provedeno je nakon gradnje peći odnosno neposredno prije prvog taljenja u svim pećima, dok je sušenje vrata provedeno prije svakog idućeg taljenja u obje pećima. Sušenje peći odvijalo se u dva stadija:

- a) sušenje nadzemnog dijela s otvorenim vratima (prije prvog taljenja),
- b) sušenje vrata peći (pri svakom taljenju).

Sapnice su osušene i djelomično ispečene na otvorenom ognjištu prije umetanja u vrata. Za sušenje peći korištene su suhe grane raznolikog lokalnog drveća i cjepanice jelovine. Prije početka zagrijavanja (umetanja ugljena) svo suho drvo korišteno za sušenje je u potpunosti izgorjelo. Peći su potom postepeno zapunjene ugljenom (cijeli volumen peći) kako bi se temperatura unutar peći podigla i stvorili se reduktivni uvjeti. Ugljen se ubacivao postepeno, dok se potpuno nije zapunio volumen peći. Nakon što je zapunjen cijeli volumen peći s ugljenom, ruda i ugljen naizmjenično su ubacivani u peći u omjeru težine 1:1 (0.5 kg: 0.5 kg) kod svih taljenja. Količina ubačene rude i ugljena nije mjerena pri svakom ubacivanju već je izmjerena ukupna količina prije taljenja i pojedinačna količina te se svakim slijedećim punjenjem određivala količina na temelju volumena u lopatici s kojom se grabila ruda i ugljen. Ritam ubacivanja ovisio je o ritmu sagorijevanja ugljena, odnosno nova mjerica ubačena je kada je uočeno da se zapuna peći spustila niz okno. Tijekom postupaka zagrijavanja i taljenja upuhivan je zrak putem mijeha. U eksperimentima je korišten mijeh od 85 litara (Peć 1.1, 1.2, Peć 2.2(dio postupka) i Peć 3.) i manji mijeh od 50 litara (Peć 2.1). Ritam upuhivanja bio je isti kod svih taljenja s istim mijehom. Nakon što se ubacila ukupna količina rude i ugljena, peć je dodatno zapunjena s nekoliko mjerica ugljena kako bi se osigurala reduktivna atmosfera za redukciju zadnjih punjenja rude. Količina ugljena ubačena nakon

zadnje mjerice rude određena je prema pretpostavljenom volumenu dijela peći od vrha do iznad dijela na kojemu se formira spužvasto željezo (oko 1/3 ukupnog volumena peći i ugljena, između 6 – 7 kg ugljena). Nakon što je preostali ugljen izgorio do razine neposredno iznad očekivanog položaja spužvastog željeza, peći su otvorene i izvađeno je spužvasto željezo koje je potom kompaktirano drvenim čekićima na panju. Postupak vađenja spužvastog željeza započinje otvaranjem vrata peći kod peći s plitkim ognjištem nakon čega slijedi vađenje ugljena i izvlačenje spužvastog željeza s kovačkim kliještima. Potom se užareno spužvasto željezo kompaktira naizmjeničnim udarcima drvenim čekićima. U postupku kompaktiranja sudjeluje troje ljudi, jedna osoba pridržava i okreće spužvasto željezo dok dvije osobe naizmjenično udaraju. Postupak je svaki put trajao nekoliko minuta (cca 5 min), do trenutka kada se spužvasto željezo dovoljno ohladilo da kompaktiranje nije više imalo utjecaja.

Neposredno nakon vađenja spužvastog željeza, dno peći je ostrugano, odnosno izbačena je sva zaostala zgura s dna peći. Ovaj postupak izveden je kod prvih taljenja u peći 1 i 2, dok je kod drugog taljenja u peći 1 zgura nije očišćena već se ohladila u unutrašnjosti peći.

PEĆ 1., 1. Taljenje

Postupak taljenja proveden je neposredno nakon prvog sušenja peći. Ubačeno je ukupno 25 mjerica rude, ukupno 12 kg rude. Ritam ubacivanja rude slijedio je ritam sagorijevanja ugljena i spuštanja zapune niz okno peći, te je mjerica ubačena svakih 4 – 9 minuta. Korišten je mijeh zapune 85 litara, koji se u potpunosti zapunjavao zrakom prije svakog upuha. Pojedini upuh trajao je 4 sekunde (kontinuirani jednoličan protok zraka, 21.25 litara zraka/ 1 sek) i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom. Tijekom postupka primijećeno je da u gornjem dijelu peći, prije spuštanja niz okno, ruda poprimi jednoličnu crvenu boju (kroz 4 - 9 minuta prije spuštanja i prekrivanja ugljenom). Izmjerena temperatura koja djeluje na rudu u gornjim dijelovima zapune je između 267 – 511 °C. Gotovo pred kraj samog postupka (3 sata nakon što je ubačena prva mjerica rude) ispuštena je tekuća zgura. Potom je u vremenskom razmaku od pola sata ispuštena zgura još dva puta. Temperatura zgure tijekom istjecanja je bila 1300 °C i 1350 °C (nakon 1 minute hlađenja temperature se spustila na 1071 °C). Na ispuštanje tekuće zgure odlučilo se nakon što je primijećeno učestalo začepeljivanje sapnice. Postupkom taljenja proizvedeno je spužvasto željezo, konglomerat zgure i željeza, težine 1,800 g (nakon kompaktiranja).

Cjelokupni postupak izgradnje peći, sušenja, taljenja i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je aktivno 18 h, a izveden je kroz dva dana (gradnja peći 1. dan) (Slika 9, 10.). Postupak taljenja (sušenje konstrukcije peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je

10 h 01 minuta. Utrošeno je 12 kg rude i 37 kg ugljena. U postupku je aktivno sudjelovalo troje ljudi. Temperature su zabilježene na ukupno 6 točaka: temperatura djelovanja na gornji dio zapune peći (T. 1), vanjsku stranu stijenki peći (T. 2. – 5.) i kroz sapnicu u unutrašnjost peći (T. 6.1) tijekom cijelog postupka. Ove temperature mjerene su infracrvenom metodom dok su realne temperature unutar peći na točkama 2. – 5. zabilježene tek dio postupka obzirom da se metalni nastavak pirometra istopio jer su postignute temperature iznad 1300 °C.

PEĆ 1 - MŽD, SOMOGY, PRŽENA; FRAKCIJA: 4x2, 2x2	
Postupak	Trajanje /h.min
Gradnja peći	8
Sušenje - konstrukcija peći	3.45
Sušenje - vrata	45
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	2.15
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.35
Taljenje /UGLJEN	0.55
Taljenje	5.45
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	0.1
Ukupno trajanje	18.01
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	10.01

Slika 9. Tijek i vremensko trajanje postupaka pri prvom taljenju u peći 1.



A)



B)



C)



Slika 10. Peć tijekom postupka taljenja A) Sušenje – 1. faza: prije umetanja vrata, neposredno po izgradnji 2. faza: nakon umetanja vrata sa sapnicom B) Zagrijavanje C) Taljenje, ispuštena tekuća zgura D) Nakon postupka

Tijekom postupka stijenke peći su ispucale (Slika 10 A – D). Pucanje stijenki bilo je vidljivo već tijekom postupka sušenja, kada je popravljano nanošenjem sloja glinene mješavine (u i oko pukotine). Najizraženija pukotina stvorila se po vertikalnoj liniji, u punoj dužini po sredini prednjeg dijela peći, iznad otvora za vrata i ujedno prostora najviše temperature tijekom taljenja. Tijekom taljenja pukotine su se stvorile i na spojnom dijelu vrata i stijenci peći te na stražnjoj strani peći po vertikalnoj liniji. Ove pukotine u tijeku postupka nisu popravljane. Ispuštanje zgure izvedeno je probijanjem otvora pri dnu vrata koji je, nakon što je zgura istekla, zasut suhom zemljom kako bi se spriječio dotok kisika i/ili snižavanje temperature unutar peći. Nakon završetka postupka peć je ostala stabilna i cjelovita, iako se ukazala potreba za popravkom prije slijedećeg taljenja.

Peć 1., 2. taljenje

Ovaj postupak taljenja je drugi po redu u istoj peći, a prethodio mu je popravak peći. Obzirom da je peć ispućala, popravljena je zamazivanjem pukotina s razrijeđenom glinenom smjesom kakva je korištena za izgradnju peći i to s vanjske strane (vertikalna pukotina na prednjoj i stražnjoj strani) te s unutrašnje strane – poglavito oko vrata peći. Izrađena su nova vrata i umetnuta nova sapnica. Vrata su izrađena iz jednog komada, te su utisnuta u otvor a spojni dio vrata i stijenci peći je zamazan tanjim slojem glinene smjese. Svi postupci taljenja izvedeni su istim redoslijedom kao i kod prvog taljenja.

Ubačeno je ukupno 22 mjerica rude, odnosno 12 kg rude. Ritam ubacivanja rude slijedio je ritam sagorijevanja ugljena i spuštanja zapune niz okno peći, te je mjerica ubačena svakih 4 – 7 minuta, većinom u pravilnim razmacima od 4 minute. Korišten je mijeh zapune 85 litara, koji se u potpunosti zapunjavao zrakom prije svakog upuha. Pojedini upuh trajao je 4 sekunde (kontinuirani jednoličan protok zraka, 21.25 litara zraka/ 1 sek) i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom. Tijekom postupka primijećeno je da u gornjem dijelu peći, prije spuštanja niz okno, ruda ne poprimi jednoličnu crvenu boju već se nejednoliko prži (temperatura koja djeluje na rudu pri vrhu zapune peći je između 308 i 536 °C). Tekuća zgura ispuštena je prvi put tri sata nakon što je ubačena prva mjerica rude. U tom trenutku sagorijevao je preostali ugljen u peći. Potom je u vremenskom razmaku od pola sata zgura ispuštena još dva puta. Temperatura zgure tijekom istjecanja je bila 1300 °C i 1350 °C (nakon 1 minute hlađenja temperatura se spustila na 1071 °C). Na ispuštanje tekuće zgure odlučilo se nakon što je primijećeno učestalo začepeljivanja sapnice. Postupkom taljenja proizvedeno je spužvasto željezo, konglomerat zgure i željeza, težine 1,750 g nakon kompaktiranja (Slika 11.).



Slika 11. Vađenje spužvastog željeza iz peći i kompaktiranje, Peć 1. 2 taljenje

Cjelokupni postupak popravka, sušenja vrata, zagrijavanja te taljenja i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je aktivno 10 h i 16 min, a izveden je u toku jednog dana (Slika 12). Postupak taljenja (sušenje konstrukcije peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 9 h 36 minuta. Utrošeno je 12 kg rude i 37 kg ugljena. U postupku je aktivno sudjelovalo troje ljudi. Tijekom procesa taljenja zabilježene su temperature na ukupno 6 točaka na vanjskoj strani stijenke peći (T. 2. – 5.), dok je tijekom cijelog postupka bilježena temperatura kroz otvor sapnice (T. 6.1).

PEĆ 1_2_taljenje - MŽD, SOMOGY, SIROVA ; FRAKCIJA: 4x2 - 2x2	
Postupak	Trajanje/h.min
Gradnja peći - reparacija	0.30
Sušenje - konstrukcija peći	
Sušenje - vrata	2.30
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	2.0
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.11
Taljenje /UGLJEN	2.25
Taljenje	6.36
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	0.1
Ukupno trajanje	10.16
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	9.36

Slika 12. Tijek i vremensko trajanje postupaka pri drugom taljenju u peći 1.

Najizraženija pukotina koja je nastala već pri sušenju a značajnije se povećala tijekom prvog taljenja je ona po vertikalnoj liniji, u punoj dužini po sredini prednjeg dijela peći, iznad otvora za vrata i ujedno prostora najviše temperature tijekom taljenja (Slika 13.). Također, pukotina na stražnjem dijelu peći je i u ovom taljenju. Tijekom taljenja pukotine su se stvorile i na spojnom dijelu vrata i stijenci peći. Ove pukotine u tijeku postupka nisu popravljane.



Slika 13. Konstrukcija peći 1 nakon drugog taljenja

Peć 2, 1. taljenje

Peć je izgrađena i sušena otvorenih vrata ukupno 3 h u toku jednog dana, idući dan bez vrata 1 h 40 min i s vratima dodatnih 1 h 20 min. Potom je zagrijana ubacivanjem ugljena (puni volumen peći) nakon čega se pristupilo ubacivanju rude i ugljena. Ubačeno je ukupno 25 mjerica rude, odnosno 12 kg rude. Ritam ubacivanja rude slijedio je ritam sagorijevanja ugljena i spuštanja zapune niz okno peći, te je mjerica ubačena svakih 5 – 9 minuta. Mjerica rude je većinu vremena ubacivana iz dva puta čemu je uzrok premala širina otvora pri vrhu peći (promjera 13.5 cm). Korišten je mijeh zapune 50 litara, koji se u potpunosti zapunjavao zrakom prije svakog upuha. Ritam upuhivanja je tijekom zagrijavanja peći promijenjen, no potom je ostao isti do kraja postupka. Na početku zagrijavanja pojedini upuh trajao je 4 sekunde (kontinuirani jednoličan protok zraka, 12.5 litara zraka/ 1 sek) i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom. Tijekom postupka (17: 10 , 1 h i 25 min. nakon početka zagrijavanja) primijećeno je da se ugljen spušta odnosno sagorijeva manjom brzinom no kod taljenja u peći 1., te je stavljen uteg na mijeh pri čemu se ritam upuhivanja zraka ubrzao na 3 sekunde upuha (16.6 l / 1 sek) i jedna sekunda punjenja zrakom. Tijekom postupka primijećeno je da ruda u gornjem dijelu peći, prije

spuštanja niz okno ne poprими jednoličnu crvenu boju već se pojedini ulomci zacrvene dok drugi ostanu mješovite boje. Izmjerena temperatura koja djeluje na rudu u gornjim dijelovima zapune bila je između 242 - 524 °C .

Također, rudni prah koji je bio iskorištavan u ovom taljenju skliznuo bi kroz razmake među ulomcima ugljena u gornjim slojevima zapune peći, niz okno peći . Nakon 1 h i 25 min (17:10 h) od početka postupka ubacivanja rude, primijećeno je da se na prostoru otvora sapnice s unutrašnje strane nakuplja zgura u tankom sloju. Zgura je nekoliko puta očišćena pomoću željezne šipke. Uslijed učestalijeg nakupljanja zgure i potrebe čišćenja odlučeno je da će se ispustiti tekuća zgura. Tekuća zgura je ispuštena oko 2 h 45 min nakon početka ubacivanja rude (18:30 h). Temperatura izmjerena na površini tekuće zgure tijekom istjecanja je 1185 °C i 1350 °C a nakon 3 minute hlađenja temperatura se spustila na 878 °C. Ruda se prestala ubacivati u 18:15 nakon čega se nastavilo s ubacivanjem ugljena. U ovom stadiju također je nekoliko puta čišćena sapnica. U 20:05 h otvorena su vrata peći. Spužvasto željezo nije bilo moguće lako prepoznati po otvaranju vrata te je izvađena veća gromada zgure s dna peći u koju je bio inkorporiran dio spužvastog željeza te se pristupilo kompaktiranju. Nakon minute, primijećen je manji ulomak spužvastog željeza zaostao u peći koji je potom kompaktiran. Potonji grumen spužvastog željeza se pri kompaktiranju raspao na više ulomaka (3 ulomka, ukupno 700 g). U ovom taljenju, spužvasto željezo se nije dobro kompaktiralo u peći a dio je ostao vezan uz zguru (U – 6) te je zaostalo nekoliko pojedinačnih ulomaka unutar peći koji su otkriveni prilikom čišćenja peći i obrade nalaza. Neposredno nakon vađenja spužvastog željeza, unutrašnjost peći je očišćena od zgure i ugljena, obzirom da je planirano drugo taljenje idući dan.

Cjelokupni postupak izgradnje peći, sušenja, taljenja i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je aktivno 21 h i 18 min (Slika 14, 15.), a izveden je kroz dva dana (gradnja i sušenje peći prvi dan, sušenje i taljenje 2. dan). Postupak taljenja (sušenje konstrukcije peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je 13 h 18 minuta. Utrošeno je 12 kg rude i 40.5 kg ugljena. U postupku je aktivno sudjelovalo troje ljudi. Temperature zabilježene tijekom procesa taljenja ukazuju na temperature stijenki peći (T. 2. – 5.), a realne temperature unutar peći zabilježene su tijekom dijela postupka na svim točkama (T. 2.1. – 5.1.) dok je tijekom cijelog postupka bilježena temperatura kroz otvor sapnice (T. 6.1).

PEĆ 2_1_taljenje - MŽD, SOMOGY, PRŽENA ; FRAKCIJA: <2 i rudni prah	
Postupak	Trajanje/h.min
Gradnja peći	8.00
Sušenje - konstrukcija peći	3 + 1.40
Sušenje - vrata	1.20
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	2.45
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.30
Taljenje /UGLJEN	1.53
Taljenje	7.08
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	0.1
Ukupno trajanje	21.18
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	13.18

Slika 14. Tijek i vremensko trajanje postupaka pri prvom taljenju u peći 2.



A)



B)



C)

D)



Slika 15. Peć 2. tijekom postupka taljenja A) Sušenje – 1. faza: prije umetanja vrata, neposredno po izgradnji B) Zagrijavanje C) Taljenje D) Nakon postupka

Stijenke peći su u toku postupka ispucale. Pucanje stijenki bilo je vidljivo već tijekom postupka sušenja, kada je popravljano nanošenjem sloja glinene mješavine (u i oko pukotina). Najizraženija pukotina stvorila se po vertikalnoj liniji, u punoj dužini po sredini prednjeg dijela peći, iznad otvora za vrata i ujedno prostora najviše temperature tijekom taljenja. Tijekom taljenja pukotine su se stvorile i na spojnom dijelu vrata i stijenci peći te na stražnjoj strani peći po vertikalnoj liniji. Ove pukotine u tijeku postupka taljenja nisu popravljane, iako su kroz njih pri svakom upuhu izlazili plameni jezici. Ispuštanje zgure izvedeno je probijanjem otvora pri dnu vrata koji je po istjecanju zgure zasut suhom zemljom. Nakon završetka postupka peć je ostala stabilna i cjelovita iako se ukazala potreba za popravkom nastalih pukotina prije slijedećeg taljenja.

Peć 2. 2. taljenje

Ovaj postupak taljenja je drugi po redu u istoj peći, a prethodio mu je popravak peći. Obzirom da je peć ispućala, popravljena je ispunjavanjem pukotina te zamazivanjem stijenki s razrijeđenom glinenom smjesom istom kao i kod izgradnje i to s vanjske strane (vertikalna pukotina na prednjoj i stražnjoj

strani) te s unutrašnje strane – poglavito oko vrata peći (Slika 16.). Izrađena su nova vrata i umetnuta nova sapnica. Vrata su izrađena iz jednog komada, te su utisnuta u otvor a spojni dio vrata i stijenki peći je zamazan tanjim slojem glinene smjese. Prije početka taljenja iskopan je plići kanalić ispred vrata peći za istjecanje tekuće zgure. Svi postupci izvedeni su redoslijedom kao i kod prvog taljenja.



Slika 16. Popravak peći 2 nakon 1 taljenja

Ubačeno je ukupno 22 mjerica rude, odnosno 12 kg rude. Ritam ubacivanja rude slijedio je ritam sagorijevanja ugljena i spuštanja zapune niz okno peći, te je mjerica ubačena svakih 4 – 9 minuta, većinom u pravilnim razmacima od 5 do 6 minuta. Početkom postupka, pri zagrijavanju je korišten mijeh od 50 litara međutim ovaj mijeh se raspao (kožni dio je popucao te je gubio zrak), stoga je zagrijavanje prekinuto (oko 15:30 h) te je nastavljeno kada se montirao postavio? mijeh od 85 litara (18:15). Prva mjerica rude ubačena je pola sata nakon što je nastavljeno sa zagrijavanjem. Mijeh se prije svakog upuha u potpunosti zapunjavao zrakom. Pojedini upuh trajao je 4 sekunde (kontinuirani jednoličan protok zraka, 21.25 litara zraka/ 1 sek) i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom. Ovaj ritam isti je kao i kod peći 1 u oba taljenja. Tijekom postupka primijećeno je da u gornjem dijelu peći, prije spuštanja niz okno ruda ne promijeni boju (temperatura koja djeluje na rudu pri vrhu zapune peći je između 283 i 415 °C). Na ispuštanje tekuće zgure odlučilo se nakon što se učestalo čistila sapnica kako bi se osigurao protok zraka, no ona nije istekla. Sapnica se počela čepiti već nakon sat vremena od početka ubacivanja rude. Zadnje mjerice ugljena dogorene su do visine iznad sapnice odnosno mjesta na kojemu bi se očekivalo formiranje spužvastog željeza. U ovom dijelu postupka u dva navrata je naglo propao ugljen. Ovome bi mogao biti uzrok neravnomjerno sagorijevanje ugljena u peći a

u vezi s nepravilnom bubrežastom konstrukcijom peći (uslijed deformacije stijenki prilikom gradnje i sušenja). Vrata peći su otvorena no komad sinteriranog željeza nije prepoznat u unutrašnjosti peći. Pri dnu peći stvorila se jedinstvena masa zgure (Slika 18). Većina zgure s dna peći je izvađena po otvaranju vrata. Spužvasto željezo se nije u potpunosti odvojilo od zgure i kompaktiralo u jednu cjelovitu masu već je ostalo pomiješano sa zgurom te se oformilo više sitnijih ulomaka spužvastog željeza. Razlog ovome može ležati u postignutoj temperaturi na prostoru ispred sapnice, obliku sapnice i njezinom položaju, ali i granulaciji rude koja je ubačena u peć. Izmjerene temperature u ložištu peći bile bi dovoljne za odvajanje zgure, iako su temperature izmjerene kroz sapnicu generalno nešto niže od onih u drugim taljenjima (između 1024°C i 1299 °C). Obzirom da se spužvasto željezo formira i zadržava u prostoru najviše temperature, neposredno ispod i ispred sapnice, a zgura se taloži pri samom dnu ložišta, nedovoljna količina prostora na ovom području uzrokovala bi nepotpuno odvajanje spužvastog željeza. Nakon što su otvorena vrata primijećeno je da je masa zgure s dna peći visinom sezala gotovo do visine sapnice koja je postavljena na oko 7 cm od razine zemlje odnosno vrha jamice. Također, promjer sapnice (3.5 cm) korištene u ovom taljenju manji je no kod ostalih sapnica (između 5 i 5.5 cm) što je iznimno bitno jer je moguće da je prostor visoke temperature neposredno ispred sapnice na kojemu se treba formirati spužvasto željezo previše uzak te da u peći nisu postignuti pravilni uvjeti za redukciju i formiranje spužvastog željeza. S druge strane problematična bi mogla biti i granulacija rude. Ista ruda sitnije granulacije (cca 1 - 2 cm promjera) uspješno je istaljena više puta u nizu eksperimenata izvedenih u Adamovu (Republika Češka) tijekom svibnja 2019. Optimizacija veličine ulomaka rude izrazito je bitna za uspješan postupak taljenja a smanjivanjem ulomaka površina reakcije se povećava što može pozitivno utjecati na postupak redukcije, poglavito kod neporoznih ruda s visokim udjelom željeza kakva je ruda korištena u ovom eksperimentu. Stoga je moguće i da se redukcija nije pravilno i potpuno odvila i zbog uvjeta pripreme rude. Ovim taljenjem nije proizvedeno spužvasto željezo, odnosno možemo ga smatrati neuspješnim. Razlozi mogu biti višestruki a jedan ne isključuje drugi. Iz potonjeg postaje razvidno da je postupak taljenja izrazito osjetljiv na razne faktore te je pravilna priprema rude, tijekom postupka i optimalna konstrukcija peći nužna za uspješan proces.

Cjelokupni postupak reparacije peći, sušenja i taljenja trajao je aktivno 11 h, no zbog problema s mijehom napravljena je pauza od oko 3 sata u toku postupka (Slika 17.). Postupak taljenja (sušenje konstrukcije peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) trajao je 7 h i 47 min. Utrošeno je 12 kg rude i 29 kg ugljena. U postupku je aktivno sudjelovalo troje ljudi. Temperature stijenki peći zabilježene su na šest položaja (T. 2. – 5.), a temperature unutar peći zabilježene su na vrhu otvora peći (T. 1.) i kroz otvor sapnice (T. 6.1).

PEĆ 2_2_taljenje - Limonit, OLOMUCHANY, PRŽENA ; FRAKCIJA: 4x2 - 2x2	
Postupak	Trajanje/h.min
Gradnja peći - reparacija	
Sušenje - konstrukcija peći	
Sušenje - vrata	2.25
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	1
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.11
Taljenje /UGLJEN	2.11
Taljenje	5.22
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	
Ukupno trajanje	7.47
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	7.47

Slika 17. Tijek i vremensko trajanje postupaka pri prvom taljenju u peći 2.

Najizraženije pukotine po vertikalnoj liniji peći s prednje i stražnje strane popravljene su nakon prvog taljenja u peći 2, no u toku postupka one su ponovno nastale. Pukotine su se stvorile i na spojnem dijelu vrata i stijenki peći. Tijekom postupka taljenja pukotine nisu popravljane.



Slika 18. Peć 2 nakon drugog taljenja

Jamska peć (peć 3)

Postupak taljenja u jamskoj peći obavljen je jednom, a podrazumijevao je nekoliko koraka (Slika 19):

- 1) sušenje stijenki peći, neposredno po izgradnji
- 2) zapunjavanje jame slamom
- 3) zapunjavanje ugljenom i sagorijevanje
- 4) zapunjavanje rudom i ugljenom
- 5) zapunjavanje ugljenom
- 5) rušenje peći i ekstrakcija spužvastog željeza.

Sušenje stijenki peći provedeno je nakon izgradnje peći. Vanjska površina stijenki vidno se prosušila kroz 3 sata. Pri raspirivanju vatre bilo je potrebno koristiti mali mijeh pomoću kojega se kroz sapnicu upuhivao zrak. Dodatno sušenje i zagrijavanje paljenjem suhog drveta izvedeno je idući dan neposredno prije taljenja u trajanju od 2 sata kada se vatra vrlo brzo uhvatila te nije postojala potreba za korištenjem mijeha već je prirodni protok zraka osigurao kontinuirano gorenje. Za sušenje peći korištene su suhe

grane raznolikog lokalnog drveća, a vatra je potpaljena s razgorenim cjepanicama s otvorenog vatrišta. Prije početka zagrijavanja (umetanja ugljena) svo suho drvo korišteno za sušenje je izgorjelo do razine vrha jame, ubačena je manja količina slame te se počelo s ubacivanjem ugljena. Peć je potom zapunjena ugljenom kako bi se temperatura unutar peći podigla i stvorili reduktivni uvjeti. Ugljen se ubacivao postepeno, dok se potpuno nije zapunio volumen peći. U ovom dijelu postupka utrošeno je ukupno 14.2 kg ugljena. Nakon što se puni volumen peći zapunio ugljenom, ruda i ugljen naizmjenično su ubacivani u peć u omjeru težine 1:1 (cca 0.375 kg: 0.375 kg). Količina ubačene rude i ugljena nije mjerena pri svakom ubacivanju već je izmjerena ukupna količina prije taljenja i pojedinačna količina obje sirovine te se svakim slijedećim punjenjem određivala količina na temelju volumena u lopatici s kojom se grabila ruda i ugljen. Ubačeno je ukupno 7.5 kg rude i 7.5 kg ugljena u ovom dijelu postupka. Ritam ubacivanja ovisio je o ritmu sagorijevanja ugljena, odnosno nova mjerica ubačena je kada je uočeno da se zapuna peći spustila niz okno. Vremenski razmak između dvije mjerice bio je svakih 4 - 9 minuta, većinom u razmacima od 6 do 8 minuta. Zrak se tijekom cijelog postupka taljenja upuhivao pomoću mijeha zapremnine 85 litara, koji se u potpunosti zapunjavao zrakom prije svakog upuha. Pojedini upuh trajao je 4 sekunde (kontinuirani jednoličan protok zraka, 21.25 litara zraka/ 1 sek) i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom (ukupno 5 sekundi). Tijekom postupka primijećeno je da u gornjem dijelu peći, prije spuštanja niz okno ruda poprimi jednoličnu crvenu boju (temperatura koja djeluje na rudu pri vrhu zapune peći je između 257 i 567 °C). Tanki sloj zgure učestalo se nakupljao na otvoru sapnice s unutrašnje strane tijekom cijelog postupka. Začepljenje je čišćeno sa željeznom šipkom kroz sapnicu. Količina zgure koja nastaje u postupku taljenja ovisi primarno o karakteristikama i količini rude i uvjetima u peći. Obzirom da je ista ruda, jednako pripremljena, korištena u 1. taljenju kod peći 1 gdje se sapnica nije začepljivala ovim intenzitetom, a temperaturni uvjeti u peći izmjereni kroz sapnicu sličnih su vrijednosti, za pretpostaviti je da uzrok leži u konstrukciji peći. Vjerojatno se radi o položaju sapnice, koja je umetnuta na dubinu od 3 cm u unutrašnjost peći pod oštrom kosinom (usmjerena prema jami), što je oko 2 cm dublje nego kod peći 1 kod koje se oko sapnice nije stvarala ova ovojnica od zgure. Nakon što je ubačena sva ruda i ugljen, nastavilo se s ubacivanjem ugljena kako bi se stvorila reduktivna atmosfera i istalile zadnje mjerice rude a ubačeno je ukupno 4200 g ugljena u ovoj fazi. Nakon što je preostali ugljen izgorio do razine neposredno iznad očekivanog položaja spužvastog željeza, cjelovita peć je prevrnut sistemom poluge. Spužvasto željezo ostalo je stajati na nataloženoj zguri koja se zalijepila za donji dio stijenki peći, neposredno ispod sapnice. Spužvasto željezo je izdvojeno od zgure pomoću kovačkih kliješta te kompaktirano na drvenom balvanu pomoću drvenih čekića.



A)



B)

C)



D)



E)



Slika 19. Peć 3. tijekom postupka taljenja A) Sušenje, neposredno po izgradnji B) Zagrijavanje C) Taljenje
D) Rušenje peći i izvlačenje spužvastog željeza E) Kompaktiranje spužvastog željeza

Postupkom taljenja proizvedeno je spužvasto željezo, konglomerat zgure i željeza, težine 1450 g (nakon kompaktiranja).

Cjelokupni postupak (Slika 20) izgradnje peći, sušenja, taljenja i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je aktivno 21 h i 43 min, a izveden je kroz dva dana (gradnja peći 1 dan). Postupak taljenja (sušenje konstrukcije peći, zagrijavanje, punjenje rudom i ugljenom) i kompaktiranja spužvastog željeza trajao je

10 h i 43 min. Utrošeno je ukupno 7.5 kg rude i 28.7 kg ugljena. U postupku je aktivno sudjelovalo troje ljudi. Tijekom procesa zabilježene su temperature na gornjem otvoru peći (T 1.), vanjskoj strani stijenci peći (T. 2. – 6.), a temperature unutar peći zabilježene su kroz otvor sapnice (T. 6.1).

PEĆ 3 -MŽD, SOMOGY, PRŽENA ; FRAKCIJA: 4x2 - 2x2	
Postupak	Trajanje/h.min
Gradnja peći	11
Sušenje - konstrukcija peći	5
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	1.4
Taljenje /RUDA + UGLJEN	1.45
Taljenje /UGLJEN	2.08
Taljenje	3.53
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	
Ukupno trajanje	21.43
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	10.43

Slika 20. Tijek i vremensko trajanje postupaka taljenja u peći 3.

Obrada otpada

Otpad nastao pri taljenju dokumentiran je koristeći se metodom dokumentacije uzoraka s arheoloških lokaliteta.

Otpad nastao kao posljedica taljenja može se svrstati na dvije osnovne kategorije s podkategorijama: zgura (zgura iz unutrašnjosti peći, ispuštena zgura, zgura iz jame) i tehnička keramika (stijenke peći, stijenke vrata peći, sapnica). Također, kod peći 1 i 2 uz samu peć pronađeni su i ulomci rude, koja je ispala prilikom pokušaja umetanja u peć. Ovom otpadu potrebno je pribrojiti i otpad koji nastaje u postupku kompaktiranja. Spužvasto željezo konglomerat je zgure i željeza te je cilj kompaktiranja izbaciti što više zgure, što je učinjeno neposredno nakon otvaranja peći kod svih taljenja. Ovaj postupak uobičajeno traje tek nekoliko minuta, a proizvod je još uvijek nedovoljno kompaktirano i konsolidirano spužvasto željezo. Za dodatno pročišćavanje potrebno je opetovano/višestruko provoditi postupak zagrijavanja i kovanja (primarno kovanje). Spužvasto željezo po vađenju iz peći dosta je osjetljivo na udarce stoga se koriste drveni batovi, međutim, ponekad umjesto izbijanja isključivo zgure, čija je temperatura taljenja niža od temperature taljenja željeza, spužvasto željezo se može izlomiti. Kompaktiranjem nastaje otpad koji je prema makroskopskoj analizi, moguće opredijeliti na amorfne magnetske ulomke, amorfne nemagnetske ulomke, nemagnetske sfere, magnetske listiće.

ZGURA I SPUŽVASTO ŽELJEZO

Peć 1.1.taljenje (Slika 21.)

U trenutku vađenja užarenog spužvastog željeza iz peći temperatura površine iznosila je 1147 °C dok je u trenu prestanka kompaktiranja iznosila 924 °C. Temperatura izmjerena kroz sapnicu neposredno prije otvaranja vrata iznosila je 1432 °C, temperature ugljena (i zgure?) s dna peći nakon što je odstranjeno spužvasto željezo iznosila je 1303 °C. Neposredno nakon vađenja spužvastog željeza, unutrašnjost peći je očišćena od zgure i ugljena, obzirom da je planirano drugo taljenje idućeg dana. Ukupno je prikupljeno 6.506 g zgure iz postupka taljenja i 350 g otpada nastalog pri kompaktiranju spužvastog željeza te 7.600 g dijelova stijenke peći i vrata sa sapnicom razbijenih tijekom vađenja spužvastog željeza. Spužvasto željezo težilo je 1800 g nakon kompaktiranja. Uz ovaj otpad, uz peć je pronađeno i nekoliko ulomaka sirove rude korištene u taljenju koja je prilikom ubacivanja rude u okno peći ispala iz mjerice i skliznu niz vanjsku stijenku peći.

ID	peć	taljenje	uzorak br.	vrsta uzorka	postupak	kontekst pronalaska	težina g	broj ulomaka
KC2019_1.1.3	1	1	3	ZGURA IZ UNTRAŠNJOSTI	TALJENJE	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	4906	28
KC2019_1.1.4	1	1	4	ISPUŠTENA ZGURA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	1600	69
KC2019_1.1.5	1	1	5	SPUŽVASTO ŽELJEZO OTPAD-KOMPAKTIRANJE	KOMPAKTIRANJE	oko mjesta kompaktiranja na 1 - 3 metra	350	100
KC2019_1.1.0	1	1		SPUŽVASTO ŽELJEZO	KOMPAKTIRANJE		1800	1
KC2019_1.1.0.1	1	1		RUDA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	7	2

Slika 21. Popis obrađenog otpada, peć 1., prvo taljenje

Peć 1., 2.taljenje (Slika 22.)

U trenutku vađenja užarenog spužvastog željeza iz peći temperatura površine iznosila je 1125 °C dok je u trenu prestanka kompaktiranja iznosila 988 - 951⁷ °C. Temperatura izmjerena kroz sapnicu neposredno prije otvaranja vrata iznosila je 1425 °C, temperatura ugljena (i zgure?) s dna peći nakon što je odstranjeno spužvasto željezo iznosila je 1235 °C. Zgura je ostavljena u unutrašnjosti peći neposredno nakon taljenja, ohlađena te očišćena naknadno. Ukupno je prikupljeno 6.557 g zgure iz postupka taljenja i 250 g otpada nastalog pri kompaktiranju spužvastog željeza te 4700 g dijelova stijenki peći i vrata sa sapnicom razbijenih tijekom vađenja spužvastog željeza. Spužvasto se željezo pri kompaktiranju razdvojilo na dva ulomka ukupne težine 2150 g (1750 g i 400 g). Uz ovaj otpad uz peć je pronađeno i nekoliko ulomaka pržene rude korištene u taljenju, koja je ispala do peći prilikom ubacivanja u okno (U – 8).

⁷ Temperatura površine spužvastog željeza pri kojoj je primijećeno da se ohladio tako da nije moguće izbiti zguru bila je 988 °C. Grumen spužvastog željeza pokušalo se presjeći, kako bi se provjerila kvaliteta, međutim, u tom trenutku ono je već bilo hladno te to nije bilo moguće (temp. 951 °C)

ID	peć	taljenje	uzorak br.	vrsta uzorka	postupak	kontekst pronalaska	težina g	broj ulomaka
KC2019_1.2.1	1	2	1.1	BLOOM	KOMPAKTIRANJE		1750	1
KC2019_1.2.2	1	2	1.2.	BLOOM	KOMPAKTIRANJE		400	1
KC2019_1.2.3	1	2	2	BLOOM OTPAD-KOMPAKTIRANJE	KOMPAKTIRANJE	oko mjesta kompaktiranja na 1 - 3 metra	250	20
KC2019_1.2.4	1	2	3	INGOT - ŽELJEZO	PRIMARNO KOVANJE		800	2
KC2019_1.2.5	1	2	4	ISPUŠTENA ZGURA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	300	25
KC2019_1.2.6	1	2	5.1	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FS ULOMCI	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	350	25
KC2019_1.2.7	1	2	5.2.	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FBS - SITNI ULOMCI	TALJENJE	unutar peći - OSTAVLJENA DA SE HLADI U PEĆI	218	8
KC2019_1.2.8	1	2	5.3.	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FBS - TALOŽINA	TALJENJE	unutar peći - OSTAVLJENA DA SE HLADI U PEĆI	5689	1
KC2019_1.2.11	1	2	8	RUDA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	6	1
KC2019_1.2.12	1	2	9	KOVAČKA ZGURA	PRIMARNO KOVANJE	u kovačkoj peći		

Slika 22. Popis obrađenog otpada, peć 1, 2 taljenje

Peć 2. 1. taljenje (Slika 23.)

U trenutku vađenja užarenog spužvastog željeza iz peći temperatura njegove površine iznosila je 1104 °C dok temperatura u trenutku prestanka kompaktiranja nije zabilježena. Temperatura izmjerena kroz sapnicu neposredno prije otvaranja vrata iznosila je 1293 °C, a temperatura ugljena (i zgure?) s dna peći nakon što je odstranjeno spužvasto željezo iznosila je 1225 °C. Nakon vađenja spužvastog željeza, unutrašnjost peći je očišćena od zgure i ugljena, a otpad je bačen s bočne strane peći. Po otvaranju vrata izdvojen je veći komad zgure s dijelovima spužvastog željeza i kompaktiran jednu minutu. Pri kompaktiranju dijelovi spužvastog željeza raspali su se na više ulomaka (U 1.3.). Nakon toga uzet je manji ulomak (U 1.1.) spužvastog željeza koji se pri pokušaju kompaktiranja raspao na više ulomaka. Spužvasto željezo se u ovom taljenju nije pravilno sinteriralo u cjeloviti konglomerat zgure i željeza već su sitniji ulomci spužvastog željeza ili magnetični dijelovi identificirani u više uzoraka – magnetizirana površina (samo s jedne strane, pretpostavljena površina na kojoj se trebalo sinterirati spužvasto željezo) inkorporirana u zguru s dna unutrašnjosti peći (U 1.2) i magnetični otpad nastao kompaktiranjem uzorka U - 1.2. (U 1.3), pojedinačni ulomci zaostali u unutrašnjosti peći (U 5) i cjelovitiji ulomak od oko 700 g

koji se raspao pri pokušaju kompaktiranja (U 1.1) na 3 manja ulomka. Ukupno je prikupljeno 7550 g zgure iz postupka taljenja. U ovu zguru ubrojen je i dio zgure s magnetskom površinom odnosno neadekvatno odvojenim spužvastim željezom (U 1.3, težak 1900 g). Ukupno 900 g otpada nastalo je pri kompaktiranju spužvastog željeza te 7.600 g dijelova stijenki peći i vrata sa sapnicom razbijenih tijekom vađenja spužvastog željeza. Ulomci spužvastog željeza (3 ulomka) ukupne su težine 700 g nakon kompaktiranja. Međutim spužvastom željezu bi bilo moguće pribrojiti još 350 g (U – 6) magnetskih ulomaka koji su pronađeni među otpadom iz unutrašnjosti peći, a nisu bili sinterirani u spužvasto željezo pri vađenju iz talioničke peći. Također, bitno je naglasiti da je gotovo 900 g otpada nastalo pri kompaktiranju od čega je većina ulomaka izrazito magnetska, odnosno dijelovi su spužvastog željeza (U – 1.2.) te da su uz zguru s dna peći u U – 1.3 zaostali integrirani magnetski željezoviti dijelovi u izrazitijoj količini nego kod ostalih taljenja.⁸ Izrazito magnetski otpad (ulomci spužvastog željeza) prisutan je iz kompaktiranja spužvastog željeza kod svih taljenja. Međutim, ako se uspoređi makroskopski izgled otpada iz kompaktiranja kod svih taljenja za koja je korištena močvarna željezna ruda, moguće je primijetiti razlike kod otpada iz peći 1 i 2. Otpad od kompaktiranja iz oba taljenja u peći 1 u usporedbi s otpadom iz peći 2 (1. taljenje) pokazuje drugačije karakteristike (prvenstveno dimenzije i izgled). Ulomci otpada nastalog kompaktiranjem spužvastog željeza iz 1. i 2. taljenja u peći 1 su puno sitniji (dio ulomaka je oko 2 – 4 cm promjera no većinom su ispod 2 cm) dok se kod otpada iz peći 2 (1. taljenje) radi o ulomcima većih dimenzija (6x2 cm, 4x2 cm, 2x2 cm). Također, uz magnetske ima i nemagnetskih (zgura) ulomaka kod taljenja u peći 1 dok su u slučaju kompaktiranja spužvastog željeza iz peći dva prisutni samo magnetski ulomci (raspadnuto spužvasto željezo). Izgledom strukture magnetski otpad je dosta sličan, ulomci su nepravilni i amorfni no u jednom slučaju pojavljuje se i nemagnetska zgura u obliku sferica (U – 2, peć 1. taljenje 2.). Iz potonjeg je vidljivo da različita razina fragmentiranosti ali i tip otpada (magnetski i nemagnetski, ulomci spužvastog željeza ili zgura, amorfni ulomci različite veličine i sferice) mogu svjedočiti i o tijeku postupaka, a u ovom slučaju i o uspješnosti postupka taljenja koja je ovdje vjerojatno bila uzrokovana premalom granulacijom rude.

⁸ kontaktna površina mjesta na kojemu se stvorilo odnosno sinteriralo spužvasto željezo u peći može biti magnetska, kakav je primjer peći 1 / 1 i 2. taljenje no ovdje je veća površina zahvaćena i jače je magnetska.

KC2019_2.1.1	2	1	1.1	BLOOM	KOMPAKTIRANJE	izvađen iz peći	700	3
KC2019_2.1.2	2	1	1.2	BLOOM OTPAD- KOMPAKTIRANJE	KOMPAKTIRANJE	oko mjesta kompaktiranja na 1 - 3 metra	900	19
KC2019_2.1.3	2	1	1.3	zgura iz unutrašnjosti peći FBS+bloom	taljenje	izvađen iz peći	1900	1
KC2019_2.1.4	2	1	1.4	bloom - za konsolidaciju ulomak	kompaktiranje	uzet iz U 1.1.	400	1.1
KC2019_2.1.5	2	1	1.5	otpad - primarno kovanje U 1.4_TČK	primarno kovanje		150	8
KC2019_2.1.6	2	1	1.6	INGOT - ŽELJEZO	PRIMARNO KOVANJE	od u 1.1.	200	3
KC2019_2.1.7	2	1	2	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FBS - svi ulomci	taljenje	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	3750	10 (krupni)+ 38 (sitni)
KC2019_2.1.8	2	1	3	ISPUŠTENA ZGURA -TSC	TALJENJE	jamica oko peći	1900	23
KC2019_2.1.11	2	1	6	BLOOM	TALJENJE	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	350	27

Slika 23. Popis obrađenog otpada, peć 2., prvo taljenje

Peć 2, 2. taljenje (Slika 24.)

Spužvasto željezo se u ovom taljenju nije pravilno sinteriralo u cjeloviti konglomerat zgure i željeza već su sitniji ulomci spužvastog željeza (U-2) ili magnetski dijelovi zgure (gornja površina U-1) identificirani unutar peći. Temperatura izmjerena kroz sapnicu neposredno prije otvaranja vrata iznosila je 1250 °C, temperatura ugljena (i zgure?) s dna peći nakon što su otvorena vrata iznosila je 1216 °C. Ukupno je prikupljeno 6456 g zgure a spužvasto željezo čini tek nekoliko ulomaka amorfnog oblika, težine 300 g pronađenih među otpadom unutar peći. Zgura se u ovom slučaju može podijeliti na zguru s dna peći, zguru iz unutrašnjosti. Potonja zgura različita je oblika (nemagnetične sferice i maleni kapljičasti ulomci, namreškana zgura) a pronađena je unutar peći skupa s ulomcima spužvastog željeza. Oko peći pronađeno je i 350 g sitnih ulomaka rude (1 – 2 cm promjera) koja je pri ubacivanju u okno ispala iz mjerice van peći.

	2	2	1	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FBS	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	5400	1
	2	2	2	SPUŽVASTO ŽELJEZO - ulomci nisu sinterirani	taljenje	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	399	9
	2	2	4	RUDA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	350	
	2	2	5	ISPUŠTENA ZGURA - curavac	TALJENJE	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	6	3
	2	2	6	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FS + FBS	TALJENJE	u peći	278	29
	2	2	7	ZGURA IZ UNTRAŠNOSTI - FBS	TALJENJE	u peći	772	6

Slika 24. Popis obrađenog otpada, Peć 2. , drugo taljenje

Peć 3. (Slika 25.)

U trenutku vađenja užarenog spužvastog željeza iz peći temperatura njegove površine iznosila je 1250 °C dok temperatura u trenutku prestanka kompaktiranja nije zabilježena. Temperatura izmjerena kroz sapnicu neposredno prije otvaranja vrata iznosila je 1547 °C. Prilikom prevrtanja nadzemnog dijela konstrukcije peći dio zgure je ostao zalijepljen za stijenku peći, neposredno ispod sapnice te se nije spustio niz jamu (U 3). Ova zgura izvučena je djelomično skupa sa spužvastim željezom te izbačena u kompaktiranju. Ostatak zgure spustio se u jamu te je očišćen naknadno (nakon 3 dana). Ukupno je prikupljeno 2719 g zgure iz postupka taljenja i 1900 g otpada nastalog pri kompaktiranju spužvastog željeza te 55 137 g dijelova stijenki peći i sapnice razbijenih tijekom vađenja spužvastog željeza. Spužvasto željezo nakon kompaktiranja težilo je 1450 g. Jama po završetku taljenja nije bila u potpunosti zapunjena zgurom što govori da se u ovom tipu peći zasigurno moglo taliti više od 7.5 kg ovakve močvarne željezne rude koliko je iskorišteno u eksperimentalnom taljenju. Ako uzmemo da je omjer rude i nastale zgure konstanta za određeni tip rude tada bi u ovom slučaju zguru činilo 61 % rude (mjereno prema težini). Zgura iz peći 3 makroskopski je drugačija no ona iz peći 1 i 2. što je uvjetovano tipom peći odnosno drugačijim tehnološkim rješenjem. Kod jamskih peći zgura se nakuplja unutar jame a najveća razlika i primijećena karakteristika je da se zgura taloži u slojevima koje je moguće jasno vidjeti i razdvojiti na temelju makroskopskog izgleda. Obzirom da jama nije bila u potpunosti ispunjena zgurom (veći kapacitet) na dijelu ulomaka zgure iz jame primjetan je vertikalni tok izdanaka tekuće zgure koja je

bila zalijepljena za stijenke jame. Značajno je i da se dio zgure zalijepio za stijenke peći te nije spustio niz jamu. Vjerojatno bi se ova zgura nakupila unutar gornjeg dijela jame da je sapnica stajala nešto niže.

ID	peć	taljenje	uzorak br.	vrsta uzorka	postupak	kontekst pronalaska	težina g	broj ulomaka
KC2019_3.	3	1	1	SPUŽVASTO ŽELJEZO	taljenje		1450	1
KC2019_3.	3	1	2	SPUŽVASTO ŽELJEZO OTPAD-KOMPAKTIRANJE	KOMPAKTIRANJE	oko mjesta kompaktiranja na 1 - 3 metra	800	26 + magnetični prah
KC2019_3.	3	1	3	ZGURA IZ UNUTRAŠNOSTI -FBS - ispod SPUŽVASTO ŽELJEZO a	KOMPAKTIRANJE	oko mjesta kompaktiranja na 1 - 3 metra, ostala zalijepljena za stijenke špeći	1100	8 + 23 (prils sitni)
KC2019_3.	3	1	4	zgura iz unutrašnjosti - FS	taljenje	oko peći	350	53
KC2019_3.	3	1	5	zgura iz unutrašnjosti - FS	taljenje	oko peći	650	11
KC2019_3.	3	1	6	stijenke peći+sapnica	peć - taljenje	oko peći		2
KC2019_3.	3	1	7	STIJENKE PEĆI - sve	taljenje	oko peći	55137	40
KC2019_3.	3	1	1 (sj 1)	zgura iz unutrašnjosti - FS	taljenje	u jami	411	
KC2019_3.	3	1	2 (sj 2)	zgura iz unutrašnjosti - FS	taljenje	u jami	132	22
KC2019_3.	3	1	3(SJ 3)	zgura iz unutrašnjosti - TALOŽINA - SLOJEVI	taljenje	u jami	1176	20

Slika 25. Popis obrađenog otpada, Peć 3

TEHNIČKA KERAMIKA (Slika 26.)

Nakon svih taljenja, peći s plitkim ognjištem (Peć 1. i 2.) ostale su stabilne iako s vidljivim oštećenjima na stijenama. Vađenje spužvastog željeza kod jamske peći (Peć 3.) bilo je jedino moguće rušenjem nadzemne konstrukcije te je ovaj otpad dokumentiran direktno nakon taljenja. Peći s plitkim ognjištem su naknadno razgrađene te je dokumentirana ukupna količina tehničke keramike, dijelova nadzemne konstrukcije peći.

Ulomci tehničke keramike mogu se podijeliti na:

1. ulomke stijenske peći

Ulomci stijenki peći mogu se dodatno podijeliti na dva osnovna morfološko funkcionalna oblika

—

- amorfni ili zaravnati ulomci s punom ili djelomično očuvanom debljinom stijenske (originalna stijenska peći)

- tanki pravilni ulomci (tehnika gradnje –premazivanje peći tijekom sušenja i/ili popravci peći između taljenja).

2. ulomke vrata peći sa sapnicom.

Postupak izgradnje nadzemne konstrukcije peći i stanje konstrukcija nakon svih izvedenih eksperimenata je dokumentirano. Iz rezultata analize postaje razvidno da dinamika postupka gradnje, sušenja i taljenja utječe i na karakteristike nadzemne konstrukcije i to na više razina. S jedne strane različita dinamika u vremenu izgradnje i sušenja utječe na karakteristike poput debljine stijenke i utrošak glinene smjese dok s druge strane dinamika postupaka sušenja i taljenja utječe na tragove postupaka na stijenama glinene konstrukcije peći.

Sve peći građene su istim sustavom izgradnje (slaganje valjaka) te je korištena ista glinena smjesa relativno jednake vlažnosti kod Peći 1 i 2 te nešto prosušeniya kod peći 3. Intenzitet slijeganja stijenki nije bio isti kod svih peći na što ukazuju značajne razlike u debljinama stijenki peći izmjerene tijekom izgradnje i nakon svih postupaka taljenja. Kod jamske peći (peć 3) stijenke peći prilikom izgradnje bile su debljine oko 6 cm pri dnu i 3.5 cm na vrhu nadzemne konstrukcije a debljina stijenki peći dokumentirana nakon svih taljenja bila je gotovo jednaka. Kod obje peći s plitkim ognjištem debljine stijenki peći izmjerene u toku gradnje i nakon svih taljenja značajnije su varirale, odnosno uslijed slijeganja gline postale su deblje, osobito u donjem dijelu konstrukcije peći. Potonja situacija je izražena kod peći 2 gdje je debljina stijenki u donjem dijelu peći od 6 - 7 cm debljine prilikom izgradnje dosegla gotovo 12 cm uslijed slijeganja. Kod peći 1 slijeganje je bilo nešto manje te je od 6 - 7 cm debljina stijenki dosegla 7 – 10 cm. Postupak izgradnje peći 3 kod koje slijeganje gline i posljedično zadebljanje stijenki nije uočeno trajao je najduže (oko 11 h, kroz dva dana) te je izveden postepeno a neposredno nakon izgradnje izvedeno je sušenje peći paljenjem vatre i zagrijavanje ugljenom. Postupak izgradnje peći 1 trajao je kraće (oko 8 h, kroz dva dana) te je također neposredno nakon završetka gradnje osušena paljenjem vatre u unutrašnjosti i počelo se s postupkom taljenja. S druge strane, peć 2 kod koje je slijeganje najviše izraženo, građena je kroz dva dana no postupak sušenja paljenjem vatre i taljenja izveden je tek treći dan odnosno ova peć se gotovo 24 sata sušila prirodno na zraku bez paljenja vatre u unutrašnjosti. Također, peć 2 građena je od strane više ljudi u pojedinačnim sesijama dok su peć 1 i 3 uvelike bile izgrađene od strane jedne osobe kontinuiranom postepenom izgradnjom. Uslijed slijeganja i nekonzistentnog ritma gradnje konstrukcija peći se donekle deformirala. Slijeganje glinene konstrukcije kod peći 2 uzrokovalo je i značajniji utrošak glinene smjese. Peć 1 i 2 slične su zapremnine i dimenzija

(promjer u donjem unutrašnjem dijelu i visina nadzemne konstrukcije), no keramička konstrukcija (s vratima i sapnicom)⁹ stijenki peći 2 težila je ukupno 77 835 g (1. taljenje) - 78 535 g (2. taljenje) dok je kod peći 1 ona težila 37 193 (1. taljenje) - 37 293 (2. taljenje) g, između 47 i 52 % manje. Konstrukcija peći 3 ukupno teži 55 137 g, no ova peć nešto je viša od peći 1 i 2. Iz potonjih podataka čini se da je sušenje peći paljenjem vatre unutar ložišta neposredno po izgradnji optimalniji tijekom postupka ako je cilj niži utrošak glinene smjese ali i manji utrošak vremena. Bitno je naglasiti da vlažnost glinene smjese igra značajnu ulogu u postupku te je optimalna razina vlage u smjesi temeljni preduvjet za racionalnu izgradnju efikasne konstrukcije. Jedan od čimbenika koje je potrebno uzeti u obzir pri interpretaciji količine proizvedenog željeza na istraženim arheološkim lokalitetima, između ostalog, je i procjena broja izvedenih postupaka taljenja u jednoj peći što podrazumijeva i mjerenje otpada nastalog od konstrukcije jedne peći. Eksperimentalnim testiranjem moguće je dokumentirati količinu otpada po postupku mjerenjem težine keramičkog materijala naspram volumena konstrukcije peći. Ipak, ovakva razina informacija nije u potpunosti referentna za usporedbu s arheološkim nalazima no daje nam informaciju o načinu i metodama dokumentiranja tehničke keramike iz arheološkog konteksta kao i mogućim varijablama koje je potrebno uzeti u obzir pri interpretaciji nalaza.

Kod peći s plitkim ognjištem moguće je višestruko taljenje dok je kod jamskih peći nadzemna konstrukcija vjerojatno bila jednokratna. U eksperimentalnom testiranju, konstrukcija peći s plitkim ognjištem svakim taljenjem se djelomično oštetila te je popravljana nanošenjem/premazivanjem pukotina glinenom smjesom, a pri vađenju spužvastog željeza u svakom su taljenju razbijena vrata peći sa sapnicom. Pojedinačnim taljenjem uslijed pucanja stijenki i razbijanja vrata kod peći 1 nastalo je između 3400 g (1. taljenje) i 3000 g (2. taljenje) otpada (manjih ulomaka različito zapečenih stijenki peći) te između 4200 g (1. taljenje) i 4700 g (2. taljenje) stijenki vrata peći sa sapnicom. Dakle, prema primjeru peći 1 mogli bismo reći da osnovna konstrukcija peći (s vratima i sapnicom) ostavlja između 37 193 g i 37 293 g keramičkog otpada. Svakim idućim taljenjem, u slučaju višestrukog korištenja iste peći, nastalo bi između 7 600 g i 7 700 g otpada (između 20 i 21 % ukupne količine otpada cjelovite peći). Keramički materijal svih konstruktivnih elemenata iz oba taljenja (stijenki peći i vrata peći sa sapnicom) kod peći 1. ukupno teži 44 893 g. Prema primjeru masivnije peći 2 osnovna konstrukcija za taljenje težine je između 77 835 g - 78 535 g, a svakim idućim taljenjem nastaje između 3800 g i 4500 g otpada od stijenki vrata peći i sapnice i ulomaka manjih dimenzija odnosno između 5 i 6 % ukupne količine otpada od osnovne konstrukcije peći. Iako je količina otpada stijenki vrata peći sa sapnicom vrlo slične težine kod obje peći,

⁹ Izražene vrijednosti težine se odnose na zbroj ukupne težine ulomaka stijenki peći bez vrata i sapnice (koje se prilikom svakog taljenja razbijaju) i vrata i sapnice po pojedinačnom taljenju u svakoj peći. Iz tog razloga dane su dvije težine za svaku peć.

udio u ukupnoj količini znatno se razlikuje. Iz ovoga proizlazi da je pri dokumentiranju i pokušaju izračuna broja peći i posljedično taljenja na arheološkim lokalitetima potrebno dokumentirati debljine stijenki i na koji dio stijenske se odnosi (ako je moguće), ali i konzistentnost pojave istih debljina stijenki obzirom da razlike u količini otpada za peći istih funkcionalnih karakteristika (prvenstveno zapremnina) mogu biti značajne, kako je ilustrirano primjerima peći 1 i 2. Također, odvajanje i zasebno dokumentiranje podkategorija tehničke keramike (vrata, morfološki različiti i različito fragmentirani ulomci) može pridonijeti postupku procjene razine proizvodnje, ali i interpretacije organizacije proizvodnje (tragovi reparacije peći, prostorna distribucija različitih tipova nalaza itd.) .

U postupku razgrađivanja peći napravljen je presjek peći 1 i 2 prema vertikalnoj osнови. Kod peći 1 napravljen je presjek vertikalno duž sredine peći te je odvojena prednja (vrata sa sapnicom) naspram stražnje strane. Kod peći 2 napravljen je presjek također duž vertikalne linije po sredini no odvojena je lijeva i desna bočna strana. Presjeci ovih dviju peći pokazuju različite karakteristike. Kod peći 1 presjek je složeniji te ukazuje na oksidacijsko-redukcijske uvjete pečenja dok je kod peći 2 on sasvim jednoličan, crven, oksidacijski pečen. Ovakva situacija može ukazivati na tijek postupaka sušenja i taljenja unutar peći. Moguće je pretpostaviti da su stijenke peći 2 u trenutku u kojemu se počelo s prvim taljenjem bile u potpunosti osušene i ispečene (?) dok je kod peći 1 zagrijavanje (zapunjavanje ugljenom) počelo u trenutku u kojemu stijenke peći nisu bile ispečene. Sušenje peći 2. izvedeno je kroz dva dana, ukupno je trajalo 6 sati a ostvarene temperature sezale su do 866 °C s vanjske strane stijenki. S druge strane peć 1. je sušena neposredno po izgradnji u trajanju od 3 sata prije nego li se počelo sa zagrijavanjem ugljenom, a temperature vanjskih stijenki peći nisu prelazile 120 °C, odnosno peć nije bila u potpunosti suha niti ispečena kada se počelo sa zagrijavanjem ugljenom. Zapunjavanje peći ugljenom uzrokuje redukcijsku atmosferu unutar peći i za očekivati je da će kod nepotpuno pečenih stijenki peći ovaj režim pečenja biti vidljiv u presjeku. Postignute temperature i temperaturni režim unutar peći i oštećenja na stijenama peći 1 i 2 nastala tijekom sušenja i oba taljenja vrlo su sličnog karaktera i obima. Kod obje peći najznačajnije oštećenje i pucanje stijenki dogodilo se po vertikalnoj liniji peći, s prednje (iznad vrata) i paralelno stražnje strane. S druge strane, kod jamske peći koja je građena istom tehnikom no drugačije je forme (bez vrata) oštećenja su drugačijeg karaktera te je pucanje većinom bilo vidljivo u horizontalnim linijama i vertikalnim linijama, sukladno tehnici gradnje.

ID	peć	taljenje	uzorak br.	vrsta uzorka	postupak	kontekst pronalaska	težina g	broj ulomaka
KC2019_1.1.1	1	1	1	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	3400	40
KC2019_1.1.2	1	1	2	STIJENKA VRATA PEĆI -TEHNIČKA KERAMIKA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	4200	2
KC2019_1.2.9	1	2	6	STIJENKA VRATA PEĆI -TEHNIČKA KERAMIKA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	4700	2
KC2019_1.2.10	1	2	7	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA	TALJENJE	oko peći nakon taljenja	3000	66
KC2019_1.2.13	1	1 i 2	10	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA	ISKOPAVANJE	peć	29593	NIJE REFERENTNO
KC2019_2.1.9	2	1	4	STIJENKA VRATA PEĆI -TEHNIČKA KERAMIKA	PEĆ - TALJENJE	oko peći nakon taljenja	3600	2
KC2019_2.1.10	2	1	5	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA - s zgurom i staklasta	PEĆ - TALJENJE	oko peći nakon taljenja		NIJE REFERENTNO
KC2019_2.1.12	2	1	7	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA	PEĆ - TALJENJE	oko peći nakon taljenja - IZVUČENA NAKON TALJENJA	200	130
KC2019_2.1.13	2	1 i 2	8	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA	ISKOPAVANJE	peć	74035	NIJE REFERENTNO
KC2019_2.1.16	2	2	3	STIJENKA VRATA PEĆI -TEHNIČKA KERAMIKA	PEĆ - TALJENJE	oko peći nakon taljenja	4300	1
KC2019_3.	3	1	6	STIJENKA PEĆI + SAPNICA	PEĆ - TALJENJE	oko peći		2
KC2019_3.	3	1	7	STIJENKA PEĆI - TEHNIČKA KERAMIKA - sve	PEĆ - TALJENJE	oko peći	55137	40

Slika 26. Popis uzoraka obrađene tehničke keramike, sve peći

Literatura:

Karavidović, T. 2019a, Izvješće o sudjelovanju na radionici 11th IRON SMELTING WORKSHOP 2019: FROM THE SOIL TO THE IRON PRODUCT Somogyfajsz, Republika Mađarska
http://transfer.iarh.hr/images/5.-10.7.2019._izvjesce_Somogy_29.07-converted.pdf

Karavidović, T. 2019b, Izvješće o sudjelovanju na radionici tehnike taljenja željezne rude 11. workshop starého železářství / 11th workshop old ironmongery – Stará huť, Adamov, Brno (Češka),
http://transfer.iarh.hr/images/Izvije%C5%A1%C4%87e_ADAMOV_2019_TSI_TK.pdf