

Tena Karavidović

Institut za arheologiju

Ljudevita Gaja 32

10 000 Zagreb

IZVIJEŠĆE

o sudjelovanju na radionici tehnike taljenja željezne rude
- 11. workshop starého železářství / 11th workshop old ironmongery –

Stará huť, Adamov, Brno (Češka)



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, 12. lipnja 2019. g.

Radionica: 11. workshop starého železářství / 11th workshop of old ironmongery

Organizator: Technické muzeum v Brně

Datum : od 22. do 26. svibnja 2019. godine

Mjesto održavanja: Stará huť, Adamov, Republika Češka

Sudionici: Tena Karavidović

Ivan Valent



TIJEK RADIONICE

Priprema za provedbu eksperimenata i stručni posjet Muzeju Blanske regije, južna Moravska (Muzeum Blanenska), 22. svibnja 2019. g.

Tijekom prijepodneva napravljen je stručni posjet Muzeju Blanske regije (Muzeum Blanenska), velikim dijelom posvećenom razvijenoj proizvodnji željeza na prostoru južne Moravske tijekom povijesnih ali i arheoloških razdoblja. U poslijepodnevnom satima održana su predavanja sudionika radionice o vlastitim projektima i istraživanjima, a predavanje o arheološkim lokalitetima povezanim s proizvodnjom željeza na prostoru Moravske održao je voditelj radionice, kustos Tehničkog Muzeja u Brnu (Technicke Muzeum v Brne), dr. sc. Ondřej Merta.

Eksperimentalno taljenje i primarno kovanje (oblikovanje ingota) 23. svibnja. – 25. svibnja 2019. g.

U ranim jutarnjim satima 23. svibnja započelo se s izgradnjom peći za taljenje željeza. Peći su građene prema primjeru peći pronađenih na prostoru Moravskog krasa, koje pripadaju ranosrednjovjekovnom razdoblju 8. i 9.st. Slične peći ranosrednjovjekovnog doba istražene su i na prostoru Mađarske i Ukrajine (Pleiner 2000: 171). Radi se o djelomično ukopanim pećima za taljenje željezne rude. Ukupno su izgrađene i testirane četiri peći za vrijeme trajanja radionice. Gradnja peći odvijala se postepeno, a svaku peć gradio je i održavao jedan tim od 2 – 3 ljudi. Osmišljen je eksperiment te je detaljno dokumentiran proces izgradnje, sušenja i taljenja te reparacije i ponovnog taljenja u peći broj 4. Kod ostalih peći zabilježeno je vrijeme trajanja i tijek procesa, temperatura pri taljenju (jednokratno) te težina spužvastog željeza. Peći r.br. 2. – 4. sličnih su dimenzija i zapremnine s manjim odstupanjima u konstrukcijskim elementima dok je peć r.br. 1. nešto drugačije građena. Sirovine korištene za izgradnju konstrukcije peći, pri sušenju i taljenju iste su kod svih peći uz iznimku peći r.br. 2. gdje je korištena mješavina rude i otpada od kovanja (eng. hammerscale).

Uz taljenje željezne rude, spužvasto željezo iz peći 4/1 prerađeno je u ingot. Proces je detaljno dokumentiran. Osim dokumentiranja postupaka taljenja i primarnog kovanja, sav otpad (zgura)

nastao prilikom taljenja, oblikovanja spužvastog željeza i primarnog kovanja pregledan je i dokumentiran te su odabrani referentni uzorci. Korištena je metoda dokumentiranja ista kao i pri obradi arheoloških nalaza.

1. SIROVINE

1.1 Ruda

U svim pećima korištena ruda lokalnog je podrijetla, limonit (lok. Olomučany). Prethodno taljenju, ruda je usitnjena ručno, približnih dimenzija 1x1-2cm. Uzet je uzorak pržene rude (prethodno usitnjavanju, N-3, U – 1).



Slika 1. Ruda a) pržena b) usitnjavanje rude c) pržena usitnjena ruda

1.2. Ugljen

Ugljen je izrađen u ugljenici a proces izrade ugljena trajao je ukupno pet dana te se odvijao paralelno s taljenjem. Od ukupno šest kubika drva dobiveno je oko 400 kg drvenog ugljena. Gubitak u volumenu drvo – ugljen čini oko 50%. Ugljen je za potrebe taljenja usitnjen, na približne dimenzije 3 x 3 cm. Pri taljenju je korištena mjerica od 0.5 kg ugljena naspram 0.5 kg rude.



Slika 2. Ugljenica, završna faza gorenja



Slika 3a i b. Usitnjavanje ugljena

1.3. Glina

Sve peći građene su od lokalne kaolinske gline pomiješane s kvarcnim pijeskom. Za reparacije pukotina na pećima tijekom taljenja korištena je lokalna površinska zemlja u žitkom obliku odnosno pomiješana s vodom.



Slika 4. Kaolinska glina

2. PEĆI ZA TALJENJE ŽELJEZNE RUDE

2.1. Peć 1. (Slika 5. – 8.)

Peć je djelomično izgrađena prije početka radionice te je dovršena 23. svibnja. Izgrađena je kao rekonstrukcija potpuno ukopane peći.¹ Peć je izdubljena/ukopana u umjetno stvoreni brijeg te je s unutrašnje strane premazana mješavinom kaolinske gline i pijeska (slika 5.) U ovoj peći obavljena su dva taljenja tijekom dva dana. Prvo taljenje bilo je neuspješno jer se spužvasto željezo nije pravilno odvojilo od zgure. Razlog ovomu leži u konstrukciji peći. Prostor od vrata peći do mjesta gdje bi se nakupljalo spužvasto željezo činio je kanal dužine oko 15 cm. Ovakvo konstrukcijsko rješenje onemogućilo je pravilno formiranje spužvastog željeza. Stoga je prije slijedećeg taljenja konstrukcija peći prepravljena, otvor za vrata peći je povišen toliko da se kanal izgubio te je povišen i položaj sapnice. U ovom taljenju proizvedeno je spužvasto željezo težine oko 3,5 kg. Ubačeno je 15 kg rude i 15 kg ugljena.

¹ Prednja stijenka peći ukopana dok su kod ostalih peći ove stijenke bile slobodnostojeće.



Slika 5. Gradnja peći



Slika 6. Peć 1 tijekom prvog taljenja



Slika 7 a i b. Peć 1. tijekom drugog taljenja



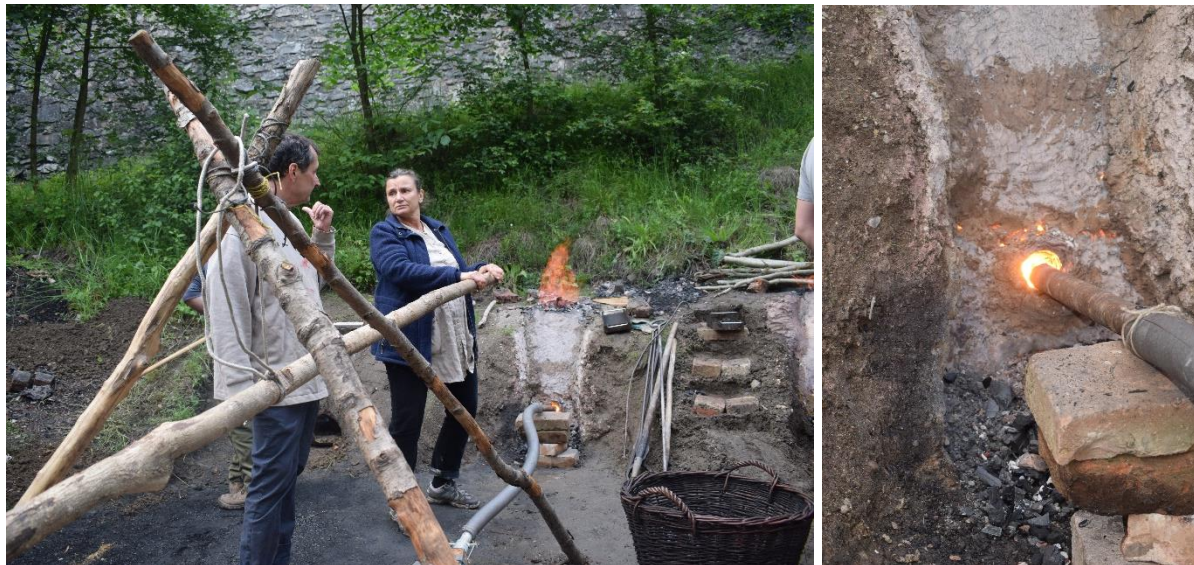
Slika 8. Peć 1. nakon drugog taljenja i čišćenja prostora

2.2. Peć 2. (Slika 9. – 13.)

Izgrađena je prije početka radionice te se u njoj prvotno talila ruda halkopirit. Tijekom radionice započelo se taljenje željezne rude limonit (lok. Olomučany) pomiješane s kovačkim listićima, otpadom nastalim pri kovanju (eng. hammerscale). U 9:30 h započelo je zagrijavanje peći. Dostatna temperatura postignuta je oko 14:45 h te se počelo s ubacivanjem ugljena kroz okno peći. Nakon što je zapremina peći u potpunosti zapunjena s ugljenom (oko 15:30 h), počinje se ubacivati ruda i ugljen u omjeru 1:1, približno 0.5 kg : 0.5 kg. Ubačeno je ukupno 15 kg rude do 18:45 h. Nakon toga, ubačeno je još 3 puta po mjerica ugljena, otprilike 0.75 g u intervalima od oko 9 minuta/mjerica. Ritam upuhivanja zraka tijekom taljenja većinom je bio konstantan, a jedno upuhivanje trajalo je oko 6 sekundi (1 sekunda - podizanje prečke mjeha, 5 sekundi - upuhivanje zraka). Prije slijedećeg upuhivanja radila se kratka pauza od 2 do 3 sekunde. Mijeh je zapremnine 162 litre. Cijeli proces završio je u 20:00. Dobiveno spužvasto željezo težilo je 4.2 kg.



Slika 9. Peć 2.: Priprema za drugo taljenje - popravak (izgradnja vrata i zatvaranje pukotina) i sušenje



Slika 10. Peć 2.: Taljenje



Slika 11. Peć 2.: Izgaranje zadnjih mjerica ugljena, razmještanje ugljena neposredno pred otvaranje vrata peći



Slika 12. Peć 2.: Otvaranje vrata peći i izbacivanje nakupljene zgure i pepela



Slika 13. Spužvasto željezo iz peći 2. nakon oblikovanja i testiranja kvalitete (rascjep po sredini spužvastog željeza).

2.3. Peć 3.

Izgrađena tijekom radionice, početak gradnje peći oko 9.00. Sušenje peći odvija se neposredno nakon završetka gradnje. Prvotno se suši dio peći oko otvora za vrata, kako bi se ojačao donji dio konstrukcije peći ali i jednostavnije umetnula vrata. Nakon toga stavljaju se duge grane u punoj dužini peći kako bi se jednolično sušila cijela površina. Kod procesa sušenja peći vidljivo je postepeno sušenje od dna prema tjemenu peći. Sušenje peći započelo je oko 11.15 h, a peć se relativno posušila do 14.00 te su umetnuta vrata i nastavilo se sa sušenjem. Sušenje je trajalo do 18:00 h kada se u peć počeo ubacivati ugljen. Nakon što se kompletna peć zapunila s ugljenom, u 19:00 h počinje se stavljati ruda i ugljen u omjeru 1:1, cca. 0.5 : 0.5 kg. Proces se

odvijao istim ritmom kao i kod prethodne peći (ritam upuhivanja zraka i ubacivanja rude) te je završio u 23:15 kada je otvorena peć te izvađeno spužvasto željezo. Dobiveno spužvasto željezo težilo je 3.2 kg.



Slika 14. Peć 3.: faze izgradnje a) ukopavanje u padinu b) oblaganje ukopa glinom c) završena konstrukcija peći



Slika 15. Peć 3: faze sušenja a) sušenje donjeg dijela peći b) umetanje vrata i sušenje cijele površine stijenke peći

3. EKSPERIMENTALNO TESTIRANJE - PEĆ 4.

Metoda dokumentiranja: Proces izgradnje, sušenja, taljenja i oblikovanja (kompaktiranja) spužvastog željeza u potpunosti je dokumentiran fotografski i opisno, a zabilježeno je i vremensko trajanje pojedinih postupaka (tab. 1. i 2.). Tijekom procesa sušenja, zagrijavanja i taljenja mjerena je temperatura peći (tab 3. i 4.) na 6 položaja podrazumijevajući temperature stijenka peći, no i unutrašnjosti peći pri tjemenu (položaj 1.) i otvoru sapnice (položaj 5). Vremenski interval mjerenja bio je 30 minuta (tab. 3. i 4.). Taljenje je izvedeno dva puta tijekom dva dana (Peć 4.1 i 4.2.).

Cilj eksperimenta:

1. Definirati utrošak sirovina i vremena, usporediti dva taljenja u istoj peći
2. Definirati temperature i režim tijekom procesa taljenja, usporedba rezultata dva taljenja
3. Usporediti odnos ruda – spužvasto željezo – otpad
4. Definirati utjecaj izmjene u konstruktivim elementima na proces taljenja, proizvod i otpad – vrata i položaj sapnice
5. Prikupiti referentne uzorke i usporediti otpad s arheološkim uzorcima
6. Dokumentirati izgled radionice i peći nakon taljenja, usporedba s arheološkim zapisom

PEĆ 4. 1		
Vrijeme/sat	Postupak	Trajanje/ h.min
8:45	Ukopavanje u stijenku padine	0,45
9:30	Početak gradnja peći	4,45
14:15	Završetak gradnje peći	
14:30	Sušenje /otvorena vrata	2,4
17:10	Sušenje /zatvorena vrata	5,2
22:30	Zapunjavanje ugljenom (10x mjerica)	1
23:30	Ugljen + ruda – početak taljenja	2,15
1:45	Zadnja mjera ruda + ugljen	
2:02	Zadnja mjera ugljena (ukupno 3x mjerice ubačene)	0,17
2:30	Otvaranje peći	0,28
2:45	Kompaktiran bloom	0,15
	Ukupno trajanje	17.45

Tab. 1.

PEĆ 4.2		
Vrijeme/sat	Postupak	Trajanje/ h.min
12:00	Popravak	1
13:00	Početak sušenja/otvorena vrata	4,3
16:15	Sušenje /zatvorena vrata	
17:30	Zapunjanje ugljenom/ 10 mjerica - komplikacije pukla sapnica	1
18:30	Ugljen + ruda – početak taljenja	2,4
21:19	Ugljen početak (3x mjerice)	
21:34	Zadnja mjera ugljena (ukupno 3x mjerice ubačene)	0,15
22:00	Otvaranje peći	0,26
22:16	Kompaktiran bloom	0,16
Ukupno trajanje		10.07

Tab.2.

		PEĆ 1																
TEMPERATURA °C	Postupak	SUŠENJE - D								ZAGRIJAVANJE - U			TALJENJE R+U			U- ZADNJA		VABENJE SPUŽVASTOG ŽELJEZA
	Vrijeme	18:00	19:00	19:30	20:00	20:30	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30	0:00	00:30	1:00	1:30	2:00	2:30	
	Trajanje	0:00	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	
	POLOŽAJ 1	147	178	280	51	56		122	117	241	290	284	270	399	319	573	716	
	POLOŽAJ 2	36	49	42	56	42	46	60	84	66	90	104	142	164	162	194	194	
	POLOŽAJ 3	36	61	62	76	62	84	94	105	83	182	246	187	206	153	196	342	
	POLOŽAJ 4	40	59	62	83	67	84	91	116	122	217	254	256	292	301	297	497	
	POLOŽAJ 5	380	590	498	324	570	649	586	628	710	1490	1317	1643	1512	1718	1768	1325	
	POLOŽAJ 6	38	59	62	94	86	124	95	160	224	426	359	384	628				

Tab. 3.

		PEĆ 2								
TEMPERATURA °C	Postupak	ZATEČENO STANJE	SUŠENJE - VRATA		TALJENJE	R+U	R+U	R+U	R+U	U -zadnja
	Vrijeme	12:00	13:00	15:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00
	Trajanje	0:00	1:00	3:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00
	POLOŽAJ 1	41,6	266	231	299	387	258	408	341	448
	POLOŽAJ 2	36	68	86	119	151	171	149	159	167
	POLOŽAJ 3	41,5	96	102	134	232	225	273	294	26
	POLOŽAJ 4	42	107	487	180	108	296	355	367	370
	POLOŽAJ 5	58,5	810	1036	1453	1400	1640	1585	1471	1638
	POLOŽAJ 6					854	230	329	357	426

Tab 4.

3.1. Peć 4.1 – izgradnja peći i prvo taljenje

3.1.1. Izgradnja peći

Peć je djelomično ukopana u umjetno stvorenu padinu. Ukop za peć (slika 16.) bio je ukupnih dimenzija: dubina ukupno = 92 cm, dubina jamice pri dnu = 10 cm, promjer sredine ukopa = 44 cm, promjer dna ukopa = 44 cm. Ciljane dimenzije peći su: visina = 90 cm, dubina jamice pri dnu = 5 cm, širina otvora (unutrašnjost) = 18 cm, širina ložišta 33 cm.

Obzirom da je ukop bio širi no ciljane dimenzije peći, ova peć zahtijevala je veći utrošak mješavine gline i kvarcnog pijeska te vremena za izgradnju no Peć 3. (simultano građene). Konstrukcija peći razlikovala se od konstrukcija peći r.br. 2. i 3. Naime, peć 4. tek je djelomično ukopana tj. rub ukopa je do visine od 50 cm od dna peći ukopan dok preostalih 45 cm visine peći nije direktno naslonjeno na stijenke ukopa. Slobodnostojeće peći s plitkim udubljenjem (jamicom) pri dnu peći, od cca 5 - 10 cm pronađene su na lokalitetu Virje – Volarski breg i Hlebine - Velike Hlebine.



Slika 16. a) Izrada ukopa za peć 3. i 4.



b) Ukop za peć 4.

S izgradnjom peći počelo se nakon što je iskopan ukop za peć. Obzirom da su zemljane stijenke ukopa trusne, prvi sloj mješavine gline i pijeska bio je vrlo žitke konzistencije te se nabacivao na

stijenke ukopa (slika 17.). Slijedeći sloj peći građen je od iste mješavine, međutim nešto čvršće konzistencije tj. suše umiješane gline i pijeska (slika 18. a).

Slojevi glinovite mješavine slagani su u redovima gradeći pri tome peć od dna prema tjemenu (slika 18. a i b).

Izgrađena je peć (slika 19.) ukupne visine 90 cm s plitkim udubljenjem unutar ložišta peći (5 cm). Ukupna visina unutrašnjosti peći bila je 95 cm. Otvor za vrata bio je visine 25 cm, širine gotovo kao i prednja strana peći pri dnu. Širina peći (s vanjske strane) u bazi je oko 40 cm, pri tjemenu 22 cm. Debljina stijenki peći je varirala, pri dnu peći oko 6 – 8 cm, pri tjemenu 2 - 3 cm. Ovakva situacija uzrokovana je nepravilnom širinom ukopa u padinu, ali i potrebom da se donji dijelovi peći dodatno učvrste kako bi mogli nositi ostatak konstrukcije. Unutrašnjost peći blago je ljevkastog oblika, širine cca 32 – 34 cm pri dnu, te 18 cm pri tjemenu peći. Unutrašnjost peći se ravnomjerno blago sužava prema tjemenu. Stijenke su postavljene vertikalno, pravilno, kako bi se dobio efekt dimnjaka i ravnomjerno zagrijavao prostor unutrašnjosti. Tijekom izgradnje peći izrađena je sapnica, duguljastog pravilnog oblika, dužine 20 cm, promjera otvora 5,5 cm. Promjer otvora sapnice odgovara promjeru otvora cijevi od mijeha. Sapnica je izrađena od iste mješavine kaolinske gline i pijeska, s tim da je udio pijeska bio nešto veći no kod izgradnje stijenki peći.



Slika 17. Oblaganje stijenki ukopa sa žitkom glinom



Slika 18. a) mješavina kaolinske gline i pijeska



b) izgradnja/dizanje stijenki peći



Slika 19. Izgrađena konstrukcija peći 4.

3.1.2. Sušenje i zagrijavanja peći – priprema peći za taljenje rude

Sušenje i zagrijavanje tek izgrađene peći bitan je postupak koji prethodi taljenju. Za sušenje peći koristilo se suho mješovito drvo. Proces sušenja se odvija u dva svojevrsna stadija: 1. sušenje prostora oko otvora za vrata i donjeg dijela peći, 2. simultano sušenje peći u cijeloj visini (dugačke suhe grane). Nakon što se prostor oko vrata dovoljno osušio (procjena prema izgledu stijenki peći) umetnula su se vrata peći i sapnica te je nastavljen proces sušenja (2. stadij). Pri

sušenju ne upuhuje se zrak putem mijeha, već je dovoljna količina kisika za sagorjevanje suhog drveta osigurana prirodnim propuhom. Peć je sušena do 22.30 h uz postepeno dodavanje suhog drva.² U kojoj mjeri su stijenke peći osušene moguće je procijeniti vizualno, prema vlažnosti vanjske površine stijenki peći. Peć se sušila postepeno, prvotno donji dio peći te postepeno punom visinom prema tjemenu (slika 20.)



Slika 20. Sušenje peći 4. a) prva faza sušenja ložišta i prostora oko vrata b) druga faza sušenja s umetnutim vratima

Nakon procesa sušenja kreće se s zapunjavanjem peći ugljenom. Ovaj postupak počeo se primjenjivati oko 22:30 h. Zagrijavanje unutrašnjosti peći tj. stvaranje dovoljno visoke

² Primjećeno je da su stijenke peći već ranije jednolično osušene te se prema tome moglo pristupiti zapunjavanju ugljenom, međutim suho drvo nije u potpunosti izgorjelo. Nedogoreno suho drvo može otežati proces redukcije potreban za taljenje rude te produžiti trajanje samog procesa stoga je drvo sagoreno u potpunosti i tek tada se počelo s ubacivanjem ugljena.

temperature i redukcijske atmosfere slijedeći je korak potreban za uspješan proces taljenja. U tom trenutku priključen je i mjeha te se počelo s upuhivanjem zraka kroz sapnicu. Zapremnina mjeha je oko 620 litara. Ritam upuhivanja zraka tijekom zagrijavanja i taljenja većinom je bio konstantan, a jedno upuhivanje trajalo je oko 6 sekundi (1 sekunda - podizanje prečke mjeha, 5 sekundi - upuhivanje zraka). Prije slijedećeg upuhivanja radi se kratka pauza od 2 do 3 sekunde. U peć je postepeno ubačeno ukupno 10 mjerica ugljena (1 mjerica = cca. 0.750 kg) tj. 7.5 kg ugljena kroz sat vremena (22.30 – 23.30 h). Interval ubacivanja ugljena je u prosjeku 6 min/mjerica. Ovom količinom u potpunosti se zapunio volumen peći. Kada se ugljen uslijed sagorjevanja spustio niz okno peći, tek toliko da je moguće ubaciti novu mjericu, počelo se s ubacivanjem rude i ugljena (23:30 h).

3.1.3. Taljenje rude

Usitnjena ruda i ugljen ubacivani su u peć izmiješani u omjeru 1:1, 0.5:0.5 kg. Količina rude vagana je pri svakom ubacivanju, a količina ugljena izvagana je pri prvom ubacivanju te je određena mjerica (zapremnina lopatice za ubacivanje) prema kojoj se određivala količina u svakom narednom punjenju (slika 21).



Slika 21. Mjerica ugljena i rude

Ukupno je ubačeno 13 kg rude i 13 kg ugljena odnosno 26 mjerica. Interval ubacivanja mješavine rude i ugljena je bio od 6 do 9 min. Nova mjerica ubacivala se tek kada bi se prethodno punjenje spustilo niz okno (ugljen sagorio) i oslobodio se prostor pri vrhu peći. Ritam upuhivanja zraka bio je isti kao i kod postupka sagorjevanja ugljena koji je prethodio ubacivanju rude. Isti ritam zadržan je tijekom cijelog postupka taljenja. Promjenjivost intervala ubacivanja jednim dijelom je uzrokovana nepravilnim spuštanjem ugljena niz okno peći tj. nepravilnim

sagorjevanjem a s druge strane bitno je naglasiti i da je ritam upuhivanja, iako konstantan, ipak podložan manjim promjenama obzirom da su upuhivanje naimjениčno obavljale tri osobe. Tijekom taljenja na donjim dijelovima peći stvorile su se pukotine uslijed visoke temperature koje su zapunjavane nabacivanjem žitke smjese vode i površinske zemlje (slika 22.). Nakon što je ubačeno svih 26 kg izmješane rude i ugljena, ubačene su još 3 pune mjerice ugljena (1 mjerica = 0.75 kg) kako bi se proces dovršio. Uz konstantno upuhivanje zraka istim ritmom, čekalo se da ugljen gotovo u potpunosti izgori. Razina zapunjenosti peći neizgorenim ugljenom provjeravala se kroz okno peći te je odlučeno da je proces završen kada se užareni ugljen spustio na razinu vrha vrata peći, točnije kada je kroz okno bio djelomično vidljiv užareni bloom (spužvasto željezo), proizvod taljenja. U ovom dijelu postupka provjeravalo se da li se ugljen spušta ravnomjerno kroz okno peći te je nekoliko puta ugljen razmješten/raspoređen s dugim drvenim štapom kako bi se osiguralo ravnomjerno sagorjevanje.



Slika 22. Peć 4 a) početak taljenja b) završna faza taljenja (uslijed pucanja stijenke, pukotine su zatvorene žitkom mješavinom gline te dodatno zatrpane zemljom)

Zadnja mjerica ugljena stavljena je u 2:02 h a peć je otvorena u 02:30 h. Otvaranje se vršilo postepeno. Prvotno je otvoren uski otvor na donjem dijelu vrata peći, kako bi se ispustila tekuća zgura. Međutim, tekuće zgure nije bilo na istek. Razlog ovome je manja količina tekuće zgure koja se stvorila pri taljenju. Karakteristike željezne rude i tijek procesa taljenja određuju količinu tekuće zgure, a plitka jamica izdubljena u ložištu peći vjerojatno je razlog zbog kojeg tekuća zgura nije istekla van peći već ostala nataložena u unutrašnjosti. Peć br. 3. građena je bez plitke jamice u dnu ložišta te je prilikom otvaranja otvora pri dnu vrata peći iscurila manja količina tekuće zgure. Također, u ovu peć ubačeno je ukupno 15 kg rude, 2 kg više no u peć 4.

Usljedilo je otvaranje vrata peći u kojemu je sudjelovalo četvero ljudi. Korišteni su alati: veliki željezni kiln s raskucanim vrhom, čekić, motika, lopata, klješta s dugom ručkom. Uz pomoć željeznog klina i čekića razbijan je rub vrata peći kako bi se mogao izvući bloom bez oštećenja ostatka konstrukcije peći. Motikom je izvlačen otpad dok je lopatom isti bačen sa strane peći. Uz pomoć klješta izvađeno je spužvasto željezo te prenešeno na čvrstu podlogu, drveni balvan (slika 23.). Spužvasto željezo je potom kompaktirano i oblikovano. Postupak se izvodio s metalnim čekićima različite težine, naizmjeničnim udarcima sve dok se spužvasto željezo nije dovoljno ohladilo te je daljnje oblikovanje postalo nemoguće. U 02:30 završilo se s postupkom oblikovanja.

Rezultat taljenja : Dobiveno spužvasto željezo nakon oblikovanja težilo je 3,3 kg (slika 24.).
Utrošeno je ukupno 13 kg rude, 33 kg ugljena, a proces sušenja, zagrijavanja i taljenja te oblikovanja željeza trajao je 12.15 min.



Slika 23. Izvlačenje spužvastog željeza iz peći, oblikovanje i kompaktiranje



Slika 24. Ohlađeno spužvasto željezo (peć 4. 1 taljenje)

3.1.4. Stanje peći nakon taljenja

Stijenke peći su mjestimično popucale no konstrukcija peći ostala je stabilna. Vrata peći sa sapnicom su oštećena prilikom vađenja spužvastog željeza, a pucanje je bilo prisutno i tijekom taljenja (slika 22.). Svaka pukotina zapunjavala se nabacivanjem žitke smjese površinske zemlje i vode. Također, kako bi se bolje izolirao donji dio peći oko vrata, prostor pred ložištem je u toku taljenja zapunjavao zemljom. Najznačajnija oštećenja stijenki (pukotine) vidljiva su nepravilno raspoređena na prostoru neposredno iznad vrata peći tj. na donje 2/3 visine peći. Do pucanja stijenki dolazi uslijed visoke temperature koja se razvija u peći, vjerojatno i velike temperaturne razlike unutrašnjosti i vanjštine peći. Temperature vanjske stijenke peći na ovom

dijelu (položaj 6 - vrata, položaj 4 – stijenka) su varirale između 294 i 497° C, a izmjerena temperatura unutrašnjosti peći (razina sapnice) u trenutku vađenja blooma iznosila je 1397° C .

3.2. Peć 4. Popravak i 2. taljenje

3.2.1. Popravak peći

Sljedeći dan, 24. 05. 2019. iznova se talilo u peći 4. Izmjerene su temperature peći 10 sati nakon što je završen proces prvog taljenja (Tab. 4). Unutrašnjost peći i prostor neposredno oko peći je očišćen od ostataka zgre, pepela te ulomaka stijenki vrata peći iz prethodnog taljenja. Sav otpad pregledan je i dokumentiran te su odabrani referentni uzorci.

Stijenke peći su popravljene s mješavinom kaolinske gline i pijeska te su izrađena i postavljena nova vrata sa sapnicom. Sapnica je istih dimenzija kao i kod prethodnog taljenja, no ljevkastog oblika vanjskog ruba. Nakon oblikovanja, sapnica se sušila nekoliko sati pored otvorene vatre, uz povremeno okretanje i približavanje vatri. U ovom taljenju sapnica je postavljena niže za 10 cm no u prvom taljenju.

3.2.2. Sušenje i zagrijavanje peći

Proces sušenja obnovljenih dijelova peći počeo je u 12:00 h (slika 25.). Temperatura peći izmjerena je u 13:00 h na 6 položaja (Tab.4.). Obnovljeni dijelovi peći sušeni su paljenjem suhog mješovitog drva do 17.30 h. Drvo je gorilo na prirodni propuh, no oko 16:00 h vrata su izgrađena te se počelo upuhivati zrak putem mijeha kako bi se proces sagorjevanja drva ubrzao. Izrazito je bitno da drvo u potpunosti sagori prije stavljanja ugljena kako bi se mogla razviti reduktivna atmosfera u peći. Ubacivanje ugljena i intenzivnije zagrijavanje peći uslijedilo je nakon što je drvo gotovo u potpunosti izgorilo te je u ložištu peći ostao žar. Neposredno nakon što je ubačeno nekoliko mjerica ugljena, vrata su počela pucati, a dio sapnice se odlomio i upao u unutrašnjost peći. Ostatak sapnice pokušao se učvrstiti s vanjske strane, međutim nije ga bilo moguće u potpunosti učvrstiti te je odlučeno da će se zamijeniti s novom sapnicom. Ova sapnica korištena je u peći u kojoj se pougljenjivalo spužvasto željezo te dobio čelik. Dio sapnice koji je bio s unutrašnje strane peći na sebi je nosio zguru iz prethodnog procesa.

Tijekom procesa primjećeno je učestalije pucanje stijenki vrata peći no kod prvog taljenja. Sušenje vrata peći u ovom taljenju trajalo je 1.15 h, dok je u prethodnom taljenju sušenje nakon zatvaranja vrata trajalo gotovo 5.2 h. Sagorjevanjem ugljena temperatura u peći se naglo diže (tab.2). Nedovoljno suha i zagrijana vrata sa sapnicom mogu puknuti uslijed naglog i intenzivnog podizanja temperature. Pukotine su zatvarane sa žitkom smjesom površinske zemlje i vode, a pretprostor ispred ložišta zatrpavan je zemljom kako bi se dodatno spriječio gubitak topline/temperature i oksidacija unutar peći. Iz ovog razloga temperature zabilježene na položajima 4. i 5. imaju drugačije vrijednosti i ritam kretanja no u prethodnom taljenju jer se radilo o mjerenju područja zatrpanog zemljom ili žitkom glinom. Dobivene temperature generalno su niže zbog veće toplinske izolacije i nedostupnosti površine stijenke peći pri mjerenju.



Slika 25. Sušenje obnovljenih dijelova peći

3.3.3. Taljenje

Pri ovom taljenju zadržani su isti parametri postupka kao i kod prethodnog taljenja: iste sirovine (ugljen i ruda), ritam upuhivanja zraka, omjer i količina rude i ugljena pri jednom punjenju. Također, temperatura je mjerena svakih pola sata, a upisan je i trenutak svakog novog punjenja peći mješavinom rude i ugljena. Iskorišteno je ukupno 25 mjerica rude i ugljena, odnosno 12.5 kg rude i 14.75 kg ugljena, u vremenskom period od 2 h 30 min. Jedna mjerica (otprilike 0.5 kg

ruda i 0.5 kg ugljen) ubacivana je iz dva puta zbog širine otvora pri tjemenu peći (promjer = 18 cm). Intervali ubacivanja cijele mjerice varirali su između 4 i 11 min., a novo punjenje je slijedilo nakon što bi se prethodno spustilo niz okno.



Slika 26. Taljenje u peći 4. a) početak taljenja/ubacivanja rude i ugljena b) peć pri kraju taljenja

Nakon zadnje mjerice mješavine rude i ugljena ubačeno je još 3 mjerice ugljena (mjerica = 0.75 kg), ukupno 2,25 kg ugljena u vremenskom period od 15 minuta. Potom se uz konstantno upuhivanje zraka čekalo da ugljen sagori do razine neposredno iznad oformljenog spužvastog željeza (nekoliko centimetara iznad vrata) te je peć otvorena u 22 : 00 h (slika 27.). Spužvasto željezo je prebačeno na drveni balvan, postolje na kojemu ga se kompaktiralo i oblikovalo naizmjeničnim udarcima metalnim čekićima različite težine. Spužvasto željezo iz ovog taljenja bilo je manjeg volumena i težine no iz prvog taljenja, a težilo je oko 1 kg. Naime, spužvasto željezo bilo je teško prepoznati u ložištu peći te je izvučen samo dio. Naknadnom obradom otpada shvaćeno je da se spužvasto željezo nije u potpunosti odvojilo od zgure i kompaktiralo u jednu cjelovitu masu već je ostalo pomiješano sa zgurom te se oformilo više ovakvih ulomaka. Razlog ovome može ležati u prenisko postavljenoj sapnici u vrata peći. Obzirom da se spužvasto

željezo formira i zadržava u prostoru najviše temperature, neposredno ispod sapnice, a zgura se taloži pri samom dnu ložišta, nedovoljna količina prostora na ovom području uzrokovala bi djelomično odvajanje. Izmjerene temperature u ložištu peći bile su dovoljne za odvajanje (Tab. 4.). Također, tzv. sekundarni bloom može se formirati jer je proces tekao prebrzo. Na brzinu procesa direktni utjecaj ima brzina upuhivanja zraka te posljedično brzina sagorjevanja ugljena. Ritam sagorjevanja ugljena vidljiv je iz zabilježenog ritma ubacivanja nove mjerice rude i ugljena koja je u ovom procesu varirala između 4 i 10 min., većinom svakih 5 - 6 min. U prvom taljenju interval je varirao između 6 i 9 minuta tj. proces je tekao sporije a ritam je bio ravnomjeriji. Prilikom izvlačenja bloom-a iz peći, nakupine zgure, nedogorenog ugljena i pepela su prebačene (prostor je očišćen) na gornji rub padine uz peć.



Slika 27. Zadnja faza taljenja, sagorjevanje ugljena do razine ispod koje se formira spužvasto željezo

Rezultat taljenja:

Cjelokupni proces trajao je 10 sati i 7 minuta, utrošeno je 18 kg ugljena i 12.5 kg rude a dobiveno spužvasto željezo težilo je oko 1 kg. Spužvasto željezo nije se pravilno odvojilo i formiralo te je više ulomaka ostalo zarobljeno sa zgurom u peći. Nakon hlađenja ovi ulomci su izdvojeni i obrađeni.

3.2.4. Stanje peći nakon taljenja

Stijenke peći su mjestimično popucale no konstrukcija peći ostala je stabilna. Vrata peći sa sapnicom su oštećena prilikom vađenja spužvastog željeza, a pucanje je bilo prisutno i tijekom taljenja. Svaka pukotina zapunjavala se nabacivanjem žitke smjese površinske zemlje i vode. Također, kako bi se bolje izolirao donji dio peći oko vrata, prostor pred ložištem je u toku taljenja zapunjavao zemljom (Slika 26.). Na stijenke peći neposredno uz i iznad vrata peći

nakupila se manja količina zgure, koja je nakon hlađenja vidljiva kao kapljice solidificirane tekuće zgure. Značajnije nagorjevanje stijenki peći vidljivo je u prostoru ložišta. Pretprostor ispred peći je očišćen, a sav otpad bačen je izvan prostora radionice (Slika 28. i 29.).



Slika 28. Radni prostor i peć nakon taljenja i hlađenja



Slika 29. Radni prostor i peć nakon čišćenja

3.3. Obrada otpada

Otpad nastao pri taljenju dokumentiran je koristeći se metodom dokumentacije uzoraka s arheoloških lokaliteta te su izdvojeni referentni uzorci (Tab 5. i 6.). Sav otpad je opredijeljen u kategorije na temelju makroskopskog izgleda, izvagan i fotografiran.

Peć 4_1							
Vrsta otpada	Broj ulomaka	težina /g	Nalaz	Uzorak	Težina uzorka	Taljenje br.	
SP	30	775	1	1	282	1	SUP -
VS	1	750	1	2	750	1	SUP -
VPZ	5	1338	1	3	53	1	SUP -
BS	5	32	1	4	32	1	ZUP
VPZ?	4	153	1	5	68	1	SUP
SP	3		1	6		1	SUP -
DP	1	288	2	1	288	1	OUP
DP	1	44	2	2	44	1	OUP
DP	1	67	2	3	67	1	OUP
C	2	61	2	4	61	1	OUP
A	22	639	2	5	639	1	OUP
B	1	3300					
UKUPNO OTPADA	75	4147					
UKUPNO OTPADA ZGURA		1252					
STIJENKE I SAPNICA		2895					
UKUPNO SVE		11594					

Tab. 5. Peć 4., Taljenje 1.

Peć 4_2							
Vrsta otpada	Broj ulomaka	težina /g	Nalaz	Uzorak	Težina uzorka	Taljenje br.	
SP	33	743	1			2	SUP
VPZ	15	2398	1			2	SUP
VS	1	1900	1	1	190	2	SUP
R	16	17	2	1	17	2	OUP
BZ	24	2370	2	2		2	OUP
DP	17	8746	2	3	490	2	OUP
UKUPNO OTPADA	106	13787					
UKUPNO OTPADA ZGURA		8746					
STIJENKE I SAPNICA		5041					
BLOOM S ZGUROM		2370					
UKUPNO SVE		29944					

Tab.6. Peć 4., Taljenje 2.

Kratice:

SUP - stijenka peći i sapnica
SP - stijenke peći - vrata VPZ - stijenke peći s zgurom - vrata VS - stijenke vrata s sapnicom VP - vanjski dio peći uz stijenku vrata
OUP - otpad iz unutrašnjosti peći / zgura, ruda, bloom
C - Curavka iz unutrašnjosti peći A - asortiman zgure iz unutrašnjosti peći R - ruda iz peći - nereducirana BS - bloom - sitni uzorci BZ - bloom s zgurom DP - zgura iz unutrašnjosti s tragovima ugljena i curavka
B - bloom

4. OBRADA SPUŽVASTOG ŽELJEZA U INGOT - PRIMARNO KOVANJE

Spužvasto željezo dobiveno prvim taljenjem u peći 4. je dodatno procesuirano te obrađeno u ingot. Ovaj postupak naziva se primarno kovanje.

Metoda dokumentiranja: Proces primarnog kovanja dokumentiran je opisno i fotografski. Zabilježeno je vrijeme trajanja određenih postupaka i cjelokupnog procesa. Izmjerena je temperatura žara te spužvastog željeza u trenutku vađenja i vraćanja u vatru tijekom cijelog procesa.

Nakon završetka procesa sav otpad je obrađen te su izdvojeni referentni uzorci. Detaljno je dokumentirana konstrukcija peći te tragovi koji su bili vidljivi u prostoru kovačkog ognjišta i radionice nakon postupka. Zabilježen je ukupan utrošak ugljena.

Cilj eksperimenta:

- Definirati zapis koji ostaje nakon procesa primarnog kovanja, usporedba s arheološkim zapisom
- Definirati utrošak goriva i vremena
- Definirati makroskopski izgled nastalog otpada, usporedba s arheološkim uzorcima
- Definirati količinu i vrstu otpada, usporedba s arheološkim uzorcima
- Definirati gubitke u masi i volumenu između spužvastog željeza i ingota

4.1. Izgradnja peći

Kovačko ognjište/peć izgrađena je od opeka međusobno povezanih s kaolinskom glinom. Peć je četvrtasta izduženog oblika, otvorena na jednu stranu (slika 30.). Otvor za sapnicu izrađen je na bočnoj strani na visini od 11 cm od dna peći te 20 – 25 cm od vrha (slika 31.). U otvor je direktno ubačena metalna cijev mijeha. Izgradnja peći trajala je 30 minuta.



Slika 30. Konstrukcija kovačkog ognjišta/peći



Slika 31. Bočne stijenke peći

4.2. Postupak primarnog kovanja

U peć je umetnut žar s otvorenog ognjišta te je na njega stavljen ugljen. Tijekom zagrijavanja peći tj. sagorjevanja ugljena ritam upuhivanja zraka sporiji je od ritma pri zagrijavanju spužvastog željeza te se radi pauza oko 3 sekunde prije novog upuhivanja. Ritam upuhivanja regulira se težinom utega postavljenih na sredinu drvenog okvira mijeha i odbrojanjem prije novog zapunjavanja mijeha zrakom. Mijeh korišten pri ovom postupku isti je kao i kod taljenja, ukupnog volumena oko 612 – 620 litara. Zagrijavanje peći radi se postepeno dodavanjem novog sloja ugljena dok se ne zapuni kapacitet peći s ravnomjerno užarenim ugljenom, kada se umeće spužvasto željezo. Ono je smješteno oko 5 -7 cm od otvora za dovod zraka, leži na sloju užarenog ugljena te je prekriveno istim (slika 32.). Prema iskustvu kovača, trenutak u kojemu je moguće prepoznati da se zgura počela topiti vidljiv je jer se pojavljuju iskrice i specifičan zvuk. U trenutku umetanja spužvastog željeza ritam upuhivanja se ubrzava (ukupno trajanje ispuha zraka u peć je 5 sekundi, a između pojedinačnih upuha ne radi se pauza). Spužvasto željezo je izvađeno, oblikovano i vraćeno u žar ukupno 33 puta a proces je trajao 5 h i 30 min, uz pauzu od 45 minuta.³(slika 33.) Oblikovanje se radi naizmjeničnim udarcima metalnim čekićem. U postupku je sudjelovalo 4 udarača/kovača i osoba koja pridržava komad spužvastog željeza s kliještima. Prilikom oblikovanja, poglavito kada se već nazire forma ingota, bitno je udarati pod što pravilnijim kutem, poželjno od 90°. Tijekom postupka komad nedovršenog ingota je više puta popucao, a pukotine su prvi put primjećene kada je poluproizvod već zadobio pravilan oblik, odnosno većina zgure je izbačena. Pukotine su se tretirale s boraksom. Njegova funkcija je snižavanje temperature topljenja neželjenih oksida i olakšavanje odvajanja zgure. Proizvod ovog postupka je ingot, komad željeza težine 2, 275 kg (slika 35.).

³ Proces uobičajeno može trajati od 4 do 8 sati ovisno o količini nečistoća u spužvastom željezu.



Slika 33. a) Smještaj spužvastog željeza u ognjištu (boja ukazuje da je postignuta dovoljna temperatura)
b) vađenje spužvastog željeza



Slika 34. Kovanje spužvastog željeza



Slika 35. Željezni poluproizvod, ingot.

4.3. Obrada otpada i dokumentiranje tragova

Nakon hlađenja peći sva zapuna unutar peći je izvađena te detaljno pregledana a sav prikupljeni otpad je dokumentiran. Tijekom procesa skupljan je otpad u vidu kovačkih listića (eng. Hammercale) s površine nakovnja i njegove neposredne blizine (slika 36.). Otpad je odvojen prema kategorijama: 1. Otpad iz unutrašnjosti ognjišta 2. Kovački listići. Dio otpada iz unutrašnjosti ognjišta ostao je vezan za stijenke peći oko sapnice (slika 37.). Ukupno je prikupljeno 615 g otpada. Radni prostor i peć su detaljno dokumentirani (slika 37.).



Slika 36. Kovački listići



Slika 37. a) Očišćeno kovačko ognjište/peć, unutrašnje stijenke peći oko dovoda za zrak b) nakovnj i prostor uz njega nakon kovanja (vidljive nakupine kovačkih listića na podu s bočne strane nakovnja)