

PAPLIENIJOS PILIAKALNIO PAPĖDĖS GYVENVIETĖS GELEŽIES METALURGINIO ŠLAKO TYRIMAI

AUŠRA SELSKIENĖ

Straipsnyje pateikiami Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės III–V a. įvairių rūšių geležies metalurginio šlako (tekiojo, dugno, kalvės žaizdro) cheminės, fazinės sudėties bei mikrostruktūros tyrimų rezultatai. Palyginti didelis fosforo kiekis lydymo šlakuose rodo, kad geležis Paplienijos gyvenvietėje buvo išgaunama iš fosforingos rūdos, tačiau senovės metalurgai mokėjo palikti fosforą šlake. Atrastos rudnelių liekanos, taip pat lydymo šlakų sudėtis ir morfologija rodo, kad šioje vietovėje buvo naudojamos šachtinės rudnelės su šlako išleidimo anga. Kalvės žaizdro šlakuose, palyginti su lydymo šlakais, aptikta mažiau fosforo, mangano ir kalcio, be to, jų mikrostruktūra yra įvairesnė. Identifikuoti kalvės žaizdro šlakai leidžia pagrįsti kitų autorių teiginius, kad viena iš krosnelių yra išlikęs kalvės žaizdras.

Reikšminiai žodžiai: kalviškoji geležis, lydymo šlakas, kalviškasis šlakas, mikrostruktūra, sudėtis, fosforas, Paplienija.

The results of a study of the chemical and phase composition as well as microstructure of iron metallurgical slags (smelting and smithing slags) of the 3rd–5th century AD from the Paplienija hill-fort foot settlement are presented in this paper. A comparatively high quantity of phosphorus (3.0–7.4% P₂O₅) in the smelting slags means that the iron in the Paplienija settlement was produced from an ore rich in phosphorus, however the metallurgists succeeded to hold phosphorus in slags in ancient times. The remains of the discovered smelting furnaces, as well as the composition and morphology of the smelting slags, show that the slag-tapping shaft furnaces were used in this site. The results of chemical analysis revealed that the smithing slags contain lower concentrations of phosphorus, calcium and manganese as compared with smelting slags, however, their microstructure is more varied. The identified smithing slags allow justifying the assumptions of the other authors that one of the ovens found in the site is the extant smithing hearth.

Keywords: bloomery iron, smelting slag, smithing slag, microstructure, composition, phosphorus, Paplienija.

IVADAS

Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietė (Telšių r. sav., Žarėnų sen.) buvo tyrinėjama 1959–1962 m. vadovaujant archeologui V. Valatkai (Valatka, 1960š; 1962š; 2004, p. 104–122, 359–362). Archeologinių kasinėjimų metu trečiajame 10–30 cm storio kultūrinio sluoksnio horizonte, esančiame po pirmuoju (ariamuuju) ir antruoju 10–38 cm storio horizontais, buvo aptikta nemažai radinių, siejamų su geležies gavyba ir/ar apdirbimu: penkios krosnelės, per šešis šimtus gargažių, įvairių formų ir dydžio galastuvų, daug metalinių dirbinių (kaltelis, ietigalio įmova, peiliai, ylos, adatos, pincetai ir kt.). Spėjama,

kad radiniai priklauso III–V a. (Valatka, 2004, p. 360).

Remdamiesi V. Valatkos archeologinių tyrinėjimų medžiaga Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietę kaip vieną ankstyvųjų geležies gavybos vietų mini daugelis kitų apie senąją Lietuvos metalurgiją rašiusių autorių (Endzinas, 1965, p. 28; 1968, p. 157; Эндзинас, 1973, c. 49–51; Stankus, 1978, p. 79; Станкус, 1985, c. 132; Stankus, 2001, p. 173; Michelbertas, 1986, p. 207; Grigalavičienė, 1995, p. 105; Navasaitis, 2003, p. 56). Vis dėlto mokslininkų nuomonės apie šioje vietovėje vykdytus darbus ir tam naudotą įrangą ne visai sutampa. 4-oje perkasoje aptikta ovalinė krosnelė, be abejo, laikoma rudnele, skirta geležiai išgauti

(Endzinas, 1965, p. 28; 1968, p. 157; Эндзинас, 1973, p. 49; Stankus, 2001, p. 175; Navasaitis, 2003, p. 56), 1-oje perkasoje aptikta apskrita, į dugną siaurėjančios duobelės formos krosnelė siejama su metalų apdirbimu (Valatka, 1960š, p. 22; 2004, p. 115; Navasaitis, 2003, p. 88), o 7-oje aptiktos trys mažesnės apskritos krosnelės interpretuojamos gana prieštaringai ir yra siejamos su geležies gavyba (Stankus, 2001, p. 173; Navasaitis, 2003, p. 69), geležies apdirbimu (Valatka, 2004, p. 361), arba su geležies perlydymu į plieną (Endzinas, 1965, p. 29).

Nemažai svarbios informacijos apie tai, kokio pobūdžio veikla buvo vykdoma ir kokios technologijos buvo naudojamos, suteikia įvairių geležies gavybos ir apdirbimo atliekų – rūdos likučių, krosnelių sienelių, metalinės geležies ir ypač šlakų, kurių sudėtis ir struktūra yra glaudžiai susijusi su vykusiais technologiniais procesais, tyrimai. Remiantis šlakų cheminės ir fazinės analizės bei mikrostruktūros tyrimų duomenimis galima nustatyti jų rūšį, susidarymo sąlygas ir kartu daryti išvadas apie turėtą įrangą bei jos paskirtį, charakterizuoti naudotas žaliavas, taip pat iš dalies apibūdinti geležies gavybos ir apdirbimo technologiją.

Rūdų gabaliukų archeologinių tyrimų metu Paplienijos gyvenvietėje neaptikta, tačiau visose krosnelėse ir aplink jas rasta daug gargažių, kurios skiriasi savo forma, spalva, dydžiu, tankiu. Pagal išorinius požymius gargažės galima suskirstyti į keletą rūšių (Valatka, 1960š, p. 23–24). Tikėtina, kad dauguma jų yra įvairios rudnelių gargažės (tekiosios, dugno), o kai kurios jų susidarė kalvių žaizduose. Tačiau nei šių radinių sudėtis, nei mikrostruktūra iki šiol nėra žinoma, o tikslesniam jų identifikavimui vien vizualaus įvertinimo nepakanka.

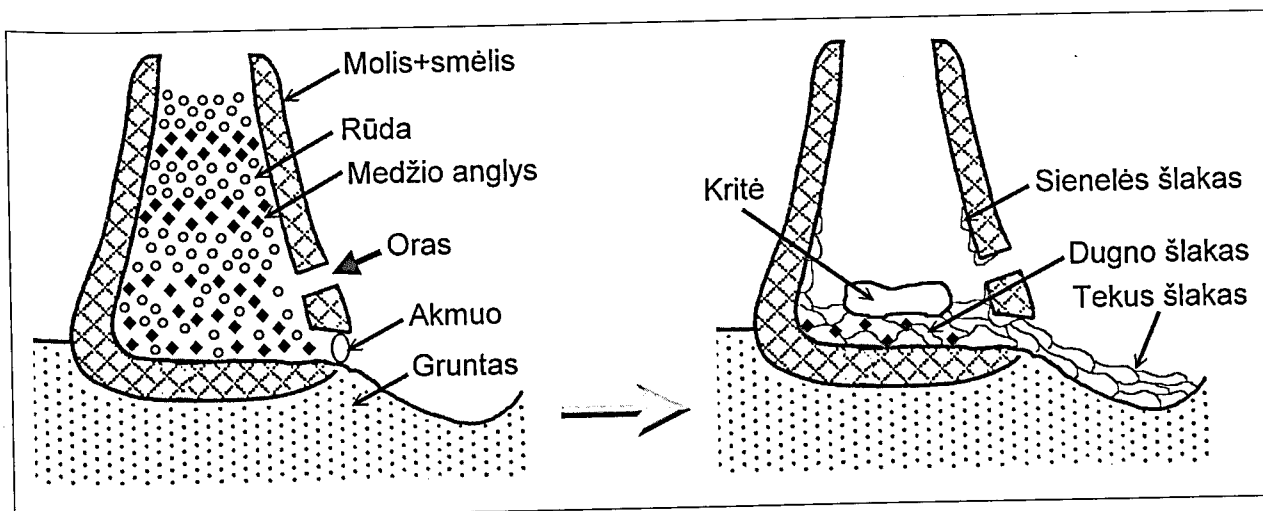
Šio darbo tikslas – ištirti Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės geležies metalurginio šlako radinių cheminę, fazinę sudėtį bei mikrostruktūrą, gautus duomenis palyginti su kitų vietovių analogiškų radinių tyrimų duomenimis, taip pat apibūdinti kai kuriuos geležies gavybos ir apdirbimo Paplienijos gyvenvietėje technologinius aspektus.

ŠLAKO SUSIDARYMAS IR MORFOLOGIJA

Yra du pagrindiniai geležies dirbinių gamybos etapai: pradžioje iš rūdos išgaunamas metalas, o vėliau iš jo suformuojamas dirbinys. Tiek metalo gavybos, tiek ir jo formavimo į konkretų daiktą metu susidaro nemažai atliekų, daugiausia šlakų. Priklausomai nuo to, kokiomis sąlygomis ir iš ko susidarė, šlakai gali labai skirtis savo išvaizda ir sudėtimi. Klasifikuojant pirmiausia yra išskiriamos dvi jų grupės, susijusios su minėtais dviem etapais: geležies gavybos, dar vadinami lydymo, ir kalviškieji šlakai.

Kalbant apie pirmąjį, t.y. metalo išgavimo iš rūdos, etapą reikia paminėti, kad iki XIV a. Lietuvoje geležis buvo lydoma iš balų rūdos nedidelėse kelių tipų rudnelėse, taip pat ir šachtinėse, turinčiose šlako išleidimo angą (Navasaitis, 2003, p. 55). Rudnelių šachtos buvo lipdomos iš molio ir smėlio mišinio. Lydymui skirta rūda ir medžio anglis buvo beriamos į krosnelę per jos viršų, o anglims degti reikalingas oras buvo pučiamas dumplėmis pro sienelėje įtaisyta pūstuvą. Redukuojant geležies rūdą, kartu su geležimi susidarydavo šlakas, kuriame susijungdavo dalis geležies oksido (FeO), bergždžioji rūdos uoliena, kuro pelenai, fliusai ir kitos priemaišos. Geležies kruopelės rudnelės žaizdro apačioje, kiek žemiau pūstuvų sulipdavo į gniutulą – kritę. Esant gana žemai redukavimo temperatūrai, apie 1150–1250°C, geležis tiek neįsianglindavo ir nesuskystėdavo, kaip aukštakrosnėse, o šlakai suskystėdavo ir nutekėdavo. Susidariusi geležies kritė buvo išimama pro rudnelės sienelėje pramuštą kiaurymę (1 pav.).

Lydymo metu šlako susidarydavo daug, maždaug keturis ar net penkis kartus daugiau nei geležies. Dalis šlako pro specialią angą ištekėdavo laukan, dažniausiai į jam skirtą duobelę, o kita dalis likdavo rudnelėje ant sienelių bei krosnelės dugne. Skirtingose vietose susidaręs šlakas gali skirtis savo forma, spalva, sudėtimi ir struktūra. Daugelis autorių šlakus skirsto į keletą grupių: tekiuosius,



1 pav. Geležies gavybos rudnelėje su šlako išleidimo anga schema (pagal Navasaitį, 2003, p. 55 ir 71). Sudarē A. Selskienē.

dugno bei prie krosnies sienelēs priekpusius šlakus (Sperl, 1980, p. 14; Tylecote, 1987, p. 311; Erze, 1991, p. 14; Navasaitis ir kt., 1999, p. 122). Tekusis rudnelēs šlaks – paprastai tamsiai pilkos spalvos, kietas, glotniū paviršiumi, kuriame aiškiai matyti sustingusios srovelēs. Jis gali būti tiek ištekejēs iš rudnelēs, tiek ir pasilikēs jos viduje. Lūžyje tekusis šlaks yra monolitiškas, palyginti vienodos smulkios struktūros, kai kur daugiau ar mažiau poringas. Rudnelēs dugno šlaks yra tas, kuris pasiliko rudnelēs dugne ir neturi ryškiū tekėjimo požymiū. J. Navasaitis (2003, p. 48–49) išskiria dugno sunkujī, dugno lengvajī šlakā ir rūdos ir medžio angliū mišinio gargažes. Rudnelēs dugno sunkusis šlaks yra gana kietas ir sunkus, rupus, kai kada akytas, dažniausiai tamsiai pilkos spalvos. Dažnai jame matomi medžio angliū atspaudai, o kartais aptinkama medžio angliū ar medienos liekanū. Jo ķemīnē sudētis panaši kaip tekiojo šlako, tik ļvairesnē. Dugno lengvaisis šlaks būna ļabai korētas, ļengvas, šurkštus, nuo tamsiai pilkos iki šviesios spalvos, be to, neturi jokiū tekėjimo požymiū. Rūdos ir medžio angliū mišinio gargažē – tai rudnelēs dugne likēs iš dalies redukuotas rūdos ir medžio angliū sukepeš mišinys, paprastai rudos arba rusvos spalvos, mīnkštesnis uż sunkujī dugno

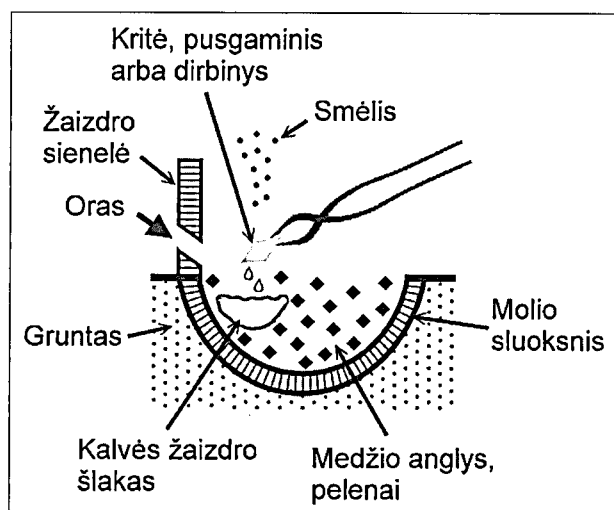
šlakā. Prie sienelēs prikepeš šlaks paprastai turi keliū milimetrū storio rudnelēs sienelēs sluoksnī. Priekpusios sienelēs konfigurācija atspindi tā rudnelēs vietā, kurioje šis šlaks susiformavo. Vidinēje pusēje prie sienelēs prilipusiū šlakū paviršius būna gruoblētas, nelygus, dažnai matoma šlako tekėjimo požymiū (Navasaitis, 2003, p. 49). Jū ķemīnē sudētī gali ļemti šlake ištirpusios sienelē sudarančios medžiagos.

Pagrīdinē lydymo šlakā sudaranti fazē yra geļēzies silikāts fajalītas (Fe_2SiO_4). ļvairiū autoriū duomenimis, šios fazēs rudneliū šlakuose dažniausiai būna 50–80%. Be to, šlakuose dar randama geļēzies oksidiū (viustito (FeO) ir/arba magnetīto (Fe_3O_4), fosforo jungīniū, kvarco, nedideli ķiekīai ķalcio, magnio, mangano ir kitū metalū silikātū bei aluminātū, taip pat stīklo fazēs – lydalo, sustingusio išķīkristalizāvus visoms kitoms fazēm (Sperl, 1980, p. 16–17; Kronz, 1997, p. 68–114; Navasaitis ir kt., 1999, p. 125–127).

Antro etapo, t. y. dirbinio formavimo iš pasīgāminto metalo, darbai buvo atļiekami kalvēje. Prieš formuojant gaminī iš kritēs reikējo išķvalyti šlakā (jo paprastai būdavo 20–25%, o kai kada net iki 35%). Taigi pirmajā kalvišķajā operācijā buvo siekiama diviejū tikslū: iš švieķios geļēzies gniutulo

išspausti kiek galima daugiau šlako ir plastiškai deformuojant sutankinti (konsoliduoti) redukuotos geležies konkretijas į vientisą geležies luitą (Navasaitis, 2003, p. 87). Vėliau buvo formuojamas pusgaminis arba dirbinys, tam naudojant kalimo, suvirinimo ir kitas technikas. Gaminių savybes buvo siekiama pagerinti juos įanglinant, grūdinant. Kritė, pusgaminis ar dirbinys buvo kaitinami kalvių žaizdruose (2 pav.), kurie paprastai buvo įleidžiami į gruntą, o jų sienelės sustiprinamos molio sluoksniu, dažnai ir akmenimis. Pūstuvus buvo įtvirtinamas žaizdro sienelėje, kuri saugodavo dumplių antgalį nuo degančių anglių kaitros. Kalvių žaizdruose iš suskystėjusio kritės šlako, metalo paviršiuje susidarancio geležies oksido ir jam pašalinti beriamo smėlio, atitrūkusių metalo gabaliukų, medžio anglių pelenų bei besilydančios žaizdro sienelės susidarydavo taip pat nemažai šlako. Šie gabalai dažniausiai būna dubens formos, apie 4 cm storio ir nuo 5 iki 20 cm (vidutiniškai 11 cm) skersmens (Erze, 1991, p. 10; Pleiner, 2004, p. 664). Be kalvės žaizdro šlakų, dar aptinkama nuodegų (dzindrų) ir įvairios formos smulkių šlako gabaliukų.

Kalvėse atliekami darbai buvo kur kas įvairesni nei išgaunant geležį, todėl kalvės žaizdro gargažių sudėtis yra kur kas įvairesnė ir dažnai jos būna labai heterogeniškos, turinčios net kelias skirtingų sudėčių zonas ar sluoksnius. Serneels ir Perret (2003, p. 475) išskiria tris svarbiausius šlako, susidarancio kalvės žaizdre, tipus: fajalitinį šlaką su įvairiu geležies oksido (viustito) ir nedideliu stiklo fazės kiekiu, daug silicio oksido ir kitų įprastinėse uolienose esančių elementų turintį šlaką, daug geležies (metalo, oksido, hidroksido–oksido pavidalu) bei dažnai kartu medžio anglių turintį šlaką. Gargažė gali būti sudaryta iš vieno tipo šlako arba joje gali būti dviejų ar visų trijų tipų šlakų, be to, labai įvairiu santykiu. Kalviškuosius šlakus bandoma klasifikuoti pagal formą, skirtingos sudėties šlako kiekį gargažėje (Erze, 1991, p. 10; Serneels ir kt., 2003, p. 475), tačiau jų klasifikacija dar nėra nusistovėjusi.



2 pav. Kalvės žaizdro schema (pagal Scott, 1990, p. 168; Serneels ir kt., 2003, p. 472; Navasaitis, 2003, p. 88). Sudarė A. Selskienė.

TYRIMŲ OBJEKTAS

Kaip jau buvo minėta, archeologinių kasinėjimų metu Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietėje aptikta ištis nemažai šlako radinių, kurie yra saugomi Žemaičių muziejuje „Alka“ (Telšiai). Iš čia tyrimams buvo atrinktos šešios gargažės, siejamos su geležies gavyba ir apdirbimu (1 lent.). Pasirinkti objektai neturėjo muziejaus inventorinio numerio, išskyrus gargažę K2.

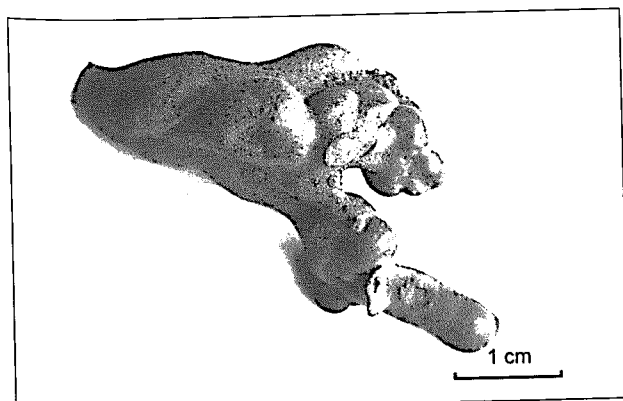
Tyrimams parinkti skirtingų šlako rūšių radiniai atsižvelgiant į jų išorinius požymius. Gargažės T1 ir T2 yra tamsiai pilkos spalvos, lygiu glotniu paviršiumi, turi aiškius tekėjimo požymius – sustingusias tekėjusio šlako sroveles, todėl tikėtina, kad tai tekusis rudnelės šlakas (3 pav. a). Radiniai D1 ir D2 yra tamsiai rudos spalvos, nelygiu, gruoblėtu paviršiumi, be tekėjimo požymių; lūžyje matyti šiek tiek pilko poringo šlako, rūdžių ir labai daug medžio anglių intarpų (3 pav. b). Radinys K1 yra kiek didesnis nei D1 ar D2, pilkai rusvos spalvos. Viršutinis šio radinio paviršius gana lygus, kitoje pusėje matyti vertikaliai žemyn nutįsusios šlako

1 lentelė. Tyrimams pasirinktų bandinių charakteristika.

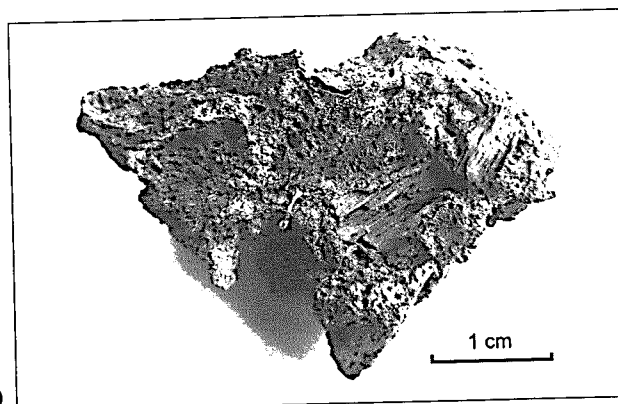
Bandinio kodas	Muziejaus „Alka“ inv. Nr.	Mūsų suteiktas inv. Nr.	Radinio rūšis	Matmenys, cm	Svoris, g
T1	–	Papl 15.11–1 (000603/15)	Tekusis šlakas	4x2,5x3,5	26
T2	–	Papl 11–1	Tekusis šlakas	3x2x1	7
D1	–	Papl 12–3	Rudnelės dugno šlakas	2,5x2,5x1	7
D2	–	Papl 12–4	Rudnelės dugno šlakas	3x2x2,5;	11
K1	–	Papl 12–1	Kalvės žaizdro šlakas	4x2,5x1–2,5	33
K2	9411 Arch–2012	Papl 20060524/7	Kalvės žaizdro šlakas	9x6,5x3,5	294

srovelės. Apačia aptrupėjusi, su tamsiomis rūdimis, tarp kurių matyti medžio anglių likučių. Pagal minėtus išorinius požymius radinius D1, D2 ir K1 galima priskirti arba rudnelės dugno, arba kalvės žaizdro šlakams. Atlikti tyrimai leido juos tiksliau identifikuoti ir priskirti radinius D1 ir D2 prie dugno šlakų, o K1 – prie kalvės žaizd-

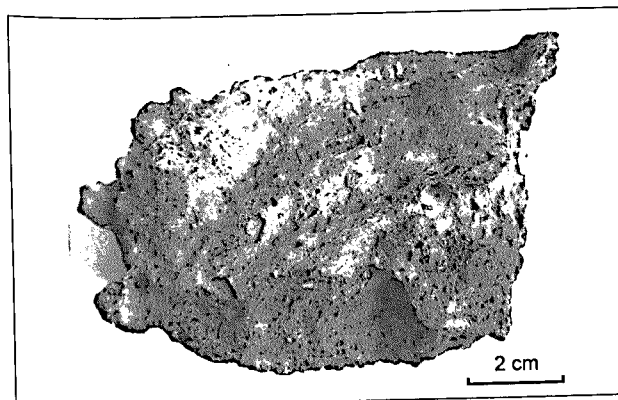
ro šlakų. Didžiausias iš visų yra 1-oje perkasoje aptiktas radinys K2 – pilkai rusvos spalvos, aiškios dubens formos šlakas. Jo skersmuo yra apie 9 cm, o storis centrinėje dalyje – apie 3,5 cm (3 pav. c, d). Lūžyje šlakas nevienalytis, matyti šviesesnių ir tamsesnių sričių. Tikėtina, kad tai kalvės žaizdro šlakas.



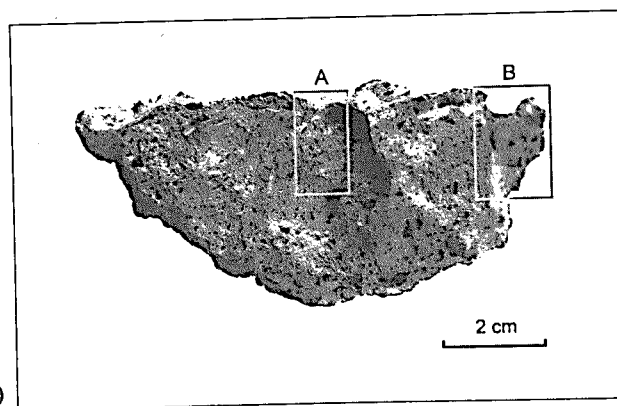
a)



b)



c)



d)

3 pav. Tirtų šlakų pavyzdžiai: a) šlako T1 bendras vaizdas; b) šlako D2 lūžis; c) šlako K2 bendras vaizdas; d) šlako K2 skersinis lūžis ir mikrostruktūros tyrimams paimtų bandinių vietos A ir B. A. Selskienės nuotr.

METODIKA

Šlako bandinių elementinė sudėtis buvo nustatyta optinės emisinės spektroskopijos metodu, naudojant pastoviosios srovės plazmos emisinį spektrometrą *Beckman SpectraSpan VI*. Nustačius bandinių elementinę sudėtį, buvo apskaičiuotas oksidų kiekis. Magnetinės šlako radinių savybės rodo, kad juose vyrauja divalentė geležis, tačiau gali būti tiek metalinės, tiek ir trivalentės geležies. Kadangi kiekybinis pasiskirstymas tarp skirtingų geležies formų nebuvo nustatytas, pateikiant rezultatus visa geležis nurodyta kaip geležies oksidas (FeO).

Bandinių fazinė sudėtis buvo nustatyta rentgenofazinės analizės metodu. Tam naudotas D8 Advance (Bruker AXS) difraktometras, Cu K_{α} spinduliuotė ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$); rentgeno vamzdžio režimas $I = 25 \text{ mA}$, $U = 36 \text{ kV}$. Rentgenogramos užrašomos 2θ kampų intervale $5\text{--}70^{\circ}$, žingsnis – $0,04^{\circ}$, impulsų kaupimo laikas – 6 s.

Mikrostruktūros tyrimai atlikti optiniu mikroskopu *Olympus BH2*.

Metalinės geležies mikrostruktūrai išryškinti naudotas 3% azoto rūgšties tirpalas etanolyje.

TYRIMŲ REZULTATAI

Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietėje rastų šlakų (T1, T2, D1, D2, K1 ir K2) bei kitų autorių įvairių rūšių šlakų cheminės sudėties tyrimų duomenys pateikti 2 lentelėje ir 4 paveiksle. Paplienijos šlakuose aptikta nuo 58,9 iki 68,1% geležies oksido ir nuo 13,2 iki 27,9% silicio oksido, o kitų oksidų kiekis yra žymiai mažesnis ir kartu sudaro nuo 5,7 iki 18,7% (vidutiniškai 11,7%). Oelsen ir Schürmann (1954, p. 4) apibendrina daugelyje pasaulio šalių rasto ir su ankstyvąja geležies gavyba siejamo šlako sudėtį ir parodė, kad juose yra vidutiniškai 55–70% geležies ir mangano oksidų (FeO+MnO), 20–30% silicio oksido (SiO₂)

ir 10–15% kitų oksidų. Taigi Paplienijos šlakų sudėtis yra panaši į ankstyvosios geležies gavybos metalurginių šlakų sudėtį, ir tai liudija, kad radiniai iš tiesų susiję su šiuo amatu. Tačiau lyginant tirtų šlakų sudėtį tarpusavyje matyti, kad ji yra nevienoda – ypač skiriasi kalcio, fosforo ir mangano oksidų kiekis. Remiantis cheminės sudėties skirtumais šlakus galima suskirstyti į tris rūšis, kurios yra pažymėtos raidėmis T, D ir K.

Radinių T1 ir T2 cheminė sudėtis tarpusavyje yra labai panaši: juose aptikta apie 64% FeO, apie 23% SiO₂ ir apie 11% kitų oksidų. Taigi jų sudėtis labai gerai atitinka Oelsen ir Schürmann (1954, p. 4) aprašytą lydymo šlakų sudėtį, taip pat yra panaši į kitų tyrinėtojų nustatytą tekiųjų šlakų sudėtį (2 lent.).

Rentgenofazinės analizės ir mikrostruktūros tyrimai rodo, kad šlakuose T1 ir T2 vyrauja fajalitas ir viustitas, o tarp pirminių fajalito kristalų aptiktas nedidelis kiekis antrinio fajalito ir stiklo fazės (5 pav.). Bandinyje T1 matyti aiškios kelių tekėjimo srovelių ribos, be to, atskirų srovelių fazinė sudėtis ir struktūra kai kur skiriasi, pvz., vienoje srovelėje vyrauja fajalitas ir viustitas (5 pav. a), tuo tarpu kitoje viustito yra žymiai mažiau (5 pav. b). Tai rodo, kad lydymo proceso metu rudnelės dujų sudėtis nebuvo pastovi, bet šiek tiek kito. Vienos srovelės ribose struktūra yra pakankamai tolygi, tačiau šiek tiek smulkėjanti pakraščių link, ką galėjo nulemti didesnis stingimo greitis srovelės paviršiuje. Reikia pažymėti, kad metalinės geležies kruopelių šios rūšies šlakuose aptikta itin mažai, o medžio anglių intarpų ir geležies korozijos produktų neaptikta visai.

Radinių T1 ir T2 cheminė ir fazinė sudėtis, gerai atitinkanti vidutinę lydymo šlakų sudėtį, taip pat tolygi, tik srovelių paviršiuje kiek smulkesnė mikrostruktūra bei ryškūs išoriniai tekėjimo požymiai rodo, kad tai yra lydymo šlakai, konkrečiai – tekieji šlakai. Taigi neabejotina, kad Paplienijos gyvenvietėje iš tiesų buvo išgaunama

2 lentelė. Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės, kitų Lietuvos ir užsienio vietovių šlakų bei Telsių r. balų rudos rudos chemine sudėtis, %.

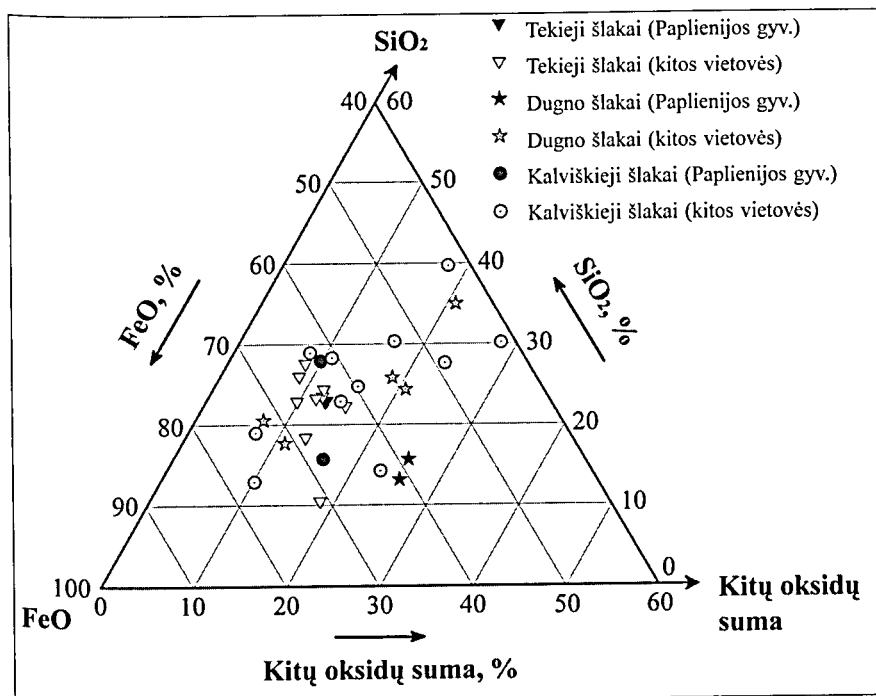
Šalis	Radimvietė	Laikotarpis	Radinio tipas	Tirtų šlakų sk.	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	BaO	Oksidų suma*	Šaltinis	
Lietuva	Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietė, Telsių r.	III–V a.	T1	1	49,74	63,99	–	23,01	1,73	3,99	0,49	0,55	3,25	0,67	0,10	0,07	0,29	98,13		
			T2	1	49,94	64,25	–	22,88	2,09	3,81	0,45	1,02	3,02	0,63	0,15	0,14	0,18	98,62		
			D1	1	47,56	61,18	–	13,15	0,90	5,26	0,26	0,23	7,37	0,16	0,10	0,01	0,19	88,81		
			D2	1	45,80	58,92	–	15,67	1,91	6,21	0,62	1,08	7,42	0,75	0,15	0,06	0,48	93,26		
			K1	1	52,92	68,08	–	15,71	2,20	0,92	0,43	0,08	1,55	0,34	0,10	0,07	0,02	89,48		
			K2	1	48,28	62,12	–	27,97	4,00	1,35	0,48	0,03	0,93	1,65	0,19	0,08	0,00	98,80		
	Telsių r.	–	R	1	36,51	–	52,2	36,67	1,69	2,37	0,23	0,53	2,94	0,6	0,34	0,06	0,24	97,87	Navasaitis, 2003, p.22	
	Lietuva	Lieporių senovės gyvenvietė, Šiaulių m.	VI–V a.	TŠ	1	50,83	65,39	–	26,07	1,24	3,21	0,40	0,39	1,96	0,65	0,20	0,06	0,18	99,75	Navasaitis ir kt., 2003, p. 91
				TŠ	1	52,26	67,23	–	22,93	2,36	4,37	0,86	0,34	2,64	–	0,51	0,12	0,19	101,55	
				DŠ	1	56,00	72,04	–	20,56	1,98	5,18	0,66	0,27	1,17	–	0,75	0,12	0,08	102,81	
Bakšių senovės gyvenvietė, Alytaus m.		III–IV a.	TŠ	1	53,33	56,86	13,05	18,40	2,11	4,86	0,54	0,78	2,35	–	0,07	1,12	0,42	100,56		
			DŠ	1	43,11	9,91	50,62	25,89	3,32	2,02	0,50	2,46	4,32	–	0,89	0,13	0,20	100,26		
Lenkija	Piaseczno ir Pruszków sritys	I a.pr.Kr.–VI a.	LŠ	9	47,49	54,44	7,26	21,74	1,84	3,52	0,11	3,1	7,7	–	–	0,09	–	99,8	Piaskowski, 1982a, p. 32	
	Luboszyce sritys	Lateno ir romėniškasis periodai		4	47,2	45,79	16,38	26,14	3,9	1,24	0,36	0,47	0,86	–	–	–	–	95,14	Piaskowski, 1982b, p. 58	
	ŚR Lenkija (Żubronajcie, Kutowa, Rostolty, Netta)	II a. pr.Kr.–V–VI a.		11	49,69	56,42	8,54	23,47	2,92	3,64	0,71	1,23	2,35	–	–	–	–	99,28		
	Rudki, Góry Świętokrzyskie	II a. pr.Kr.–V–VI a.		1	50,92	51,1	12,8	18,53	5,2	1,79	1,95	2,52	0,39	–	–	–	–	–	94,28	Piaskowski, 1992, 4–5 lent.
	Vakarų Pamarys, Choszczno	II a. pr.Kr.–V–VI a.		1	38,89	46,48	4,09	23,55	8,22	5,62	0,57	6,9	4,71	–	–	–	–	–	100,14	
Slovakija	Spišske Tomašovce, Pod Hradiskom	Ankstyvasis romėniškasis periodas	KŽŠ	1	59,76	60,50	+	12,94	0,61	2,83	0,4	0,15	–	–	–	–	–	77,43**	Mihok ir kt., 2001, p. 106	
	Mlynica, Medzi	Vėlyvasis romėniškasis periodas	TŠ	1	49,70	50,58	+	27,64	0,61	2,80	0	3,48	–	–	–	–	–	85,11**		
			KŽŠ	1	48,60	43,30	+	22,94	2,00	3,92	0	1,85	–	–	–	–	–	74,01**		
	Spišske Vlchy, Pod lazik	Vėlyvasis romėniškasis periodas	TŠ	5	49,43	55,76	+	24,43	0,97	3,08	1,70	3,57	–	–	–	–	–	89,5**		

Šalis	Radimvietė	Laikotarpis	Radinio tipas	Tirtų šlakų sk.	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	BaO	Oksidų suma*	Šaltinis		
Vokietija	Manching	III–I a.pr.Kr.	KŽŠ	3	47,21	50,83	11,00	28,34	1,97	3,21	0,76	0,25	0,85	1,01	0,19	0,04	–	98,46	Keesmann ir kt., 1992		
				1	32,32	35,45	6,81	30,21	6,20	2,36	1,21	15,81	0,61	0,81	0,09	0,08	–	99,64			
	Xanten	70–96 m.	KŽŠ	1	46,41	59,71	–	24,8	2,99	0,67	0,91	0,41	0,79	1,17	–	0,16	0,02	–	91,64	Hauptmann ir kt., 1989, p. 97	
				I a.	1	32,97	42,41	–	39,8	3,38	1,53	1,7	0,98	0,83	2,18	–	0,15	0,03	–		93,00
				I a.	1	38,01	48,9	–	27,7	9,44	1,12	1,83	4,93	0,7	2,66	–	0,52	0,04	–		97,83
				II–III a.	1	41,17	52,96	–	30,4	3,98	2,97	1,65	0,41	0,65	1,51	–	0,22	0,04	–		94,75
	Heidenheim-Grosskuchen, Schwaebische Alb	III–IV a.	TŠ	5	40,25	51,78	–	17,53	13,64	2,31	0,40	0,33	0,51	0,71	0,10	1,13	–	–	88,46	Yalcin ir kt., 1995, p. 307	
			DŠ	5	42,60	54,80	–	24,40	7,23	2,54	0,45	0,72	0,73	1,38	0,24	0,67	–	–	93,17		
	Regensburger Dom	VIII–IX a.	LŠ	7	57,68	74,21	–	20,96	4,25	0,68	0,39	1,79	0,58	0,61	0,10	0,18	–	–	103,74	Fröhlich ir kt., 1987, p. 60	
			KŽŠ	6	57,26	73,67	–	19,01	2,53	1,70	0,38	0,11	0,87	0,73	0,18	0,11	–	–	99,27		
Flensburg-Wassersleben (apie 25 km nuo Haithabu)	Vikingų epocha	LŠ	2	48,97	63,00	–	20,00	2,50	5,35	1,30	1,00	5,95	–	–	–	–	–	99,10	Thomsen, 1971, p. 105 ir 107		
		KŽŠ	4	48,78	62,75	–	29,00	2,08	2,25	0,68	0,10	0,98	–	–	–	–	–	97,83			
Prancūzija	Les Martys, Montagne Noire	Galų-romėnų periodas	TŠ	3	48,46	62,34	–	22,32	4,53	2,34	0,94	2,51	0,36	1,17	0,12	0,15	–	–	96,79	Coustures ir kt., 2003, p. 603	
			DŠ	3	34,20	44,00	–	35,07	6,00	2,77	1,29	4,48	0,36	1,61	0,10	0,30	–	–	95,98		
			KŽŠ	1	48,71	–	69,64	14,26	3,15	0,91	0,52	0,86	0,34	0,68	0,08	0,13	–	–	90,57		
Anglija	Kent, Westhawk	Romėnų-britų periodas	TŠ	18	50,53	65,0	–	23,3	5,8	2,2	0,4	0,3	1,6	0,9	0,2	0,2	–	–	99,90	Paynter, 2006, p. 276	
	Kent, Leda Cottages	Geležies amžius/Romėnų-britų periodas	DŠ	6	55,34	71,2	–	17,7	5,4	1,8	0,4	0,5	1,6	0,8	0,4	0,1	–	–	99,90		

* – be kaitmenų (H₂O, CO₂ ir kt.).

** – be kaitmenų (H₂O, CO₂ ir kt.) ir be Fe₂O₃

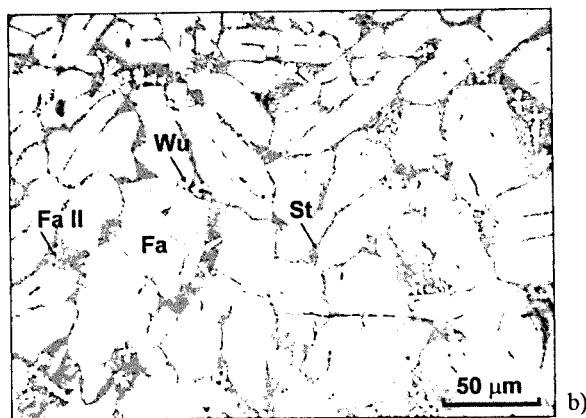
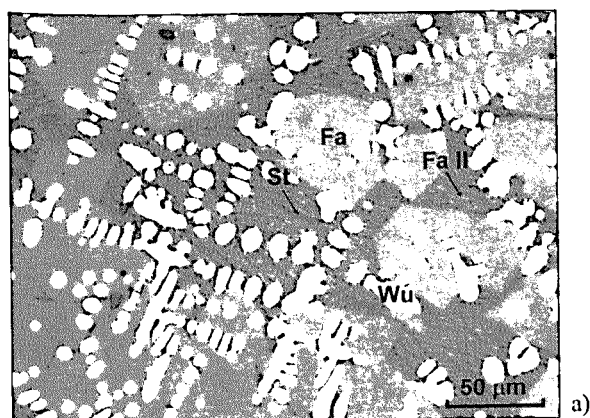
R – rūda; LŠ – lydymo šlakas (jo rūšies autoriai tiksliau neįvardijo); TŠ – tekusis šlakas; DŠ – dugno šlakas; KŽŠ – kalvės žaizdro šlakas



4 pav. Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės bei kitų Lietuvos ir užsienio vietovių įvairių rūšių šlako (tekiojo, dugno ir kalviškojo) cheminė sudėtis (pagal 2-os lentelės duomenis). Sudarė A. Selskienė.

geležis. Be to, šio tipo šlakai kartu su rastomis krosnelių liekanomis (Valatka, 1962š, p. 58–59, 2004, p. 359) rodo, kad tam buvo naudojamos rudnelės, turinčios angą susidariusiam šlakui ištekėti. Palyginimui pateikiame kitose Lietuvos vietovėse, t.y. Lieporių ir Bakšių senovės gyvenvietėse rasto tekiojo šlako cheminę sudėtį (2 lent.). Manoma, kad geležis minėtose vietovėse buvo išgaunama panašiu laikotarpiu bei tokio pat tipo rudnelėse (šachtinėse su šlako išleidimo anga),

kaip ir Paplienijos gyvenvietėje (Navasaitis, 2003, p. 56). Cheminės analizės duomenys rodo, kad tirtųjų šlakų (T1, T2) ir Lieporių bei Bakšių vietovių tekiojo šlakų sudėtis yra labai panaši: tiek likusios geležies (~50–52% Fe), tiek ir kitų elementų kiekis skiriasi palyginti nežymiai. Užsienio šalyse rastuose romėniškojo, taip pat šiek tiek ankstesnio ar vėlesnio laikotarpio tekiojo ir kituose lydymo šlakuose geležies ir silicio oksido kiekis taip pat panašus: juose aptikta nuo 47,2 iki



5 pav. Šlako T1 dviejų atskirų srovelių mikrostruktūra (a ir b). Fa – fajalitas, Fa II – antrinis fajalitas, St – stiklo fazė, Wu – viustitas. A. Selskienės nuotr.

57,7% Fe bei nuo 17,5 iki 27,6% SiO₂ (išskyrus bandinius iš Vakarų Pamario (Lenkija) bei Heidenheim–Grosskuchen (Vokietija), kuriuose geležies rasta mažiau, apie 40%) (2 lent.). Pagal 2-osios lentelės duomenis sudarytoje diagramoje (4 pav.) matyti, kad tekiųjų šlakų sudėtį, t.y. FeO, SiO₂ ir visų kitų oksidų kiekių sumos tarpusavio santykį atspindintys taškai išsidėsto viename palyginti nedideliame plote, o Paplienijos tekiųjų šlakų taškai patenka beveik į jo vidurį. Kai kurių kitų elementų kiekis įvairių užsienio šalių vietovių šlakuose gali gerokai skirtis. Pavyzdžiui, minėtuose radiniuose iš Vakarų Pamario (Lenkija) ir Heidenheim–Grosskuchen (Vokietija) aptikta žymiai daugiau aliuminio (8,2 ir 13,6% Al₂O₃), o Slovakijos tekiuosiuose šlakuose aptikta daugiau mangano oksido (apie 3,5% MnO). Fosforo oksido kiekis nemažoje dalyje šlakų yra gerokai mažesnis nei Paplienijos gyvenvietės šlakuose, t.y. tik apie 0,5% P₂O₅ (Luboszyce, Rudki (Lenkija), Heidenheim–Grosskuchen, Regensburger Dom (Vokietija), Les Martyrs (Prancūzija) ir tik kai kuriuose radiniuose didesnis, t.y. apie 6–8% (Piaseczno ir Pruszkow sritys (Lenkija), Flensburg–Wassersleben (Vokietija). Panašiausias fosforo oksido kiekis (2,4%) aptiktas šlakuose, rastuose geografiniu požiūriu Lietuvai artimiausiose Šiaurės Rytų Lenkijos vietovėse (2 lent.). Nepaisant nurodytų skirtumų Paplienijos radinius T1 ir T2 galima vertinti kaip šlakus, turinčius tipišką tekiųjų šlakų sudėtį ir struktūrą.

Radinių D1 ir D2 cheminė sudėtis šiek tiek skiriasi nuo šlakų T1 ir T2. Juose aptikta mažiau geležies (~46,7% Fe) ir silicio oksido (~14% SiO₂), tačiau daugiau kalcio (~5,7% CaO) ir fosforo (~7,4% P₂O₅) oksidų (2 lent.). Kitų elementų kiekis yra panašus, kaip ir tekiuosiuose šlakuose.

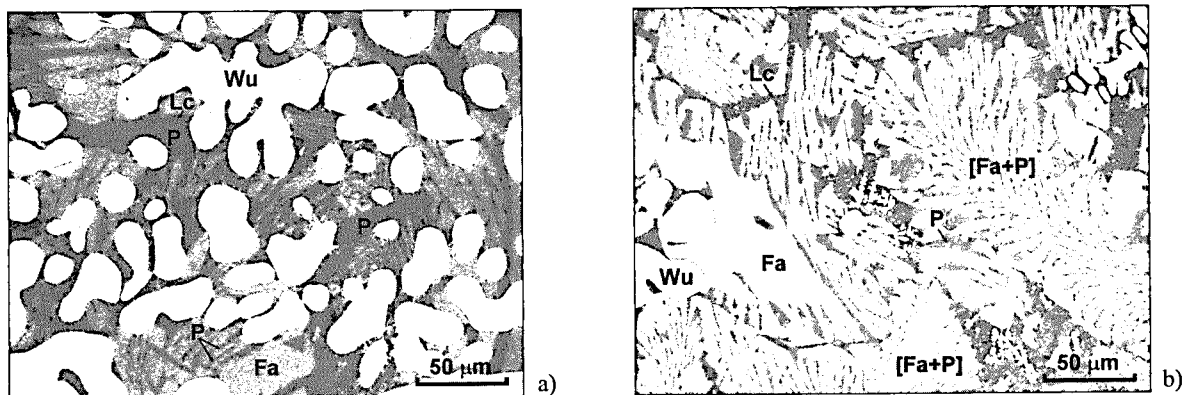
Nors cheminė šlakų D1 ir D2 sudėtis yra artima, tačiau rentgenofazinės analizės duomenys rodo, kad jų fazinė sudėtis gerokai skiriasi. Bandinyje D1 aptikta viustito, maghemito, getito, lepidokrokito, kvarco, anortito ir labai nedaug

fajalito. Bandinyje D2 rasta fajalito, viustito, kalcio–geležies fosfato, taip pat šiek tiek magnetito, kvarco bei leucito.

Mikrostruktūros tyrimai rodo, kad šlake D1 pagrindinė fazė yra geležies hidroksidai–oksidai, tačiau kai kur matyti taip pat nemažai viustito, kvarco, stiklo fazės ir medžio anglių intarpų. Reikia pažymėti, kad šiame bandinyje pagrindinės šlakus sudarančios fazės – fajalito aptikta itin mažai, o metalinės geležies intarpų neaptikta visai. Todėl tikėtina, kad šiame radinyje esantys geležies hidroksidai–oksidai yra ne geležies korozijos produktai, bet pirminiai rūdoje buvę mineralai. Taigi radinys D1 yra iš dalies redukuotos rūdos, šlako ir medžio anglių sukepęs mišinys. Tuo tarpu radinyje D2 pagrindinės fazės, taip pat kaip ir tekiuosiuose šlakuose, yra fajalitas ir viustitas, tačiau fajalito kristalai dažnai nėra vienalyčiai, o viustito kiekis kinta dažniau ir chaotiškiau nei tekiuosiuose šlakuose (6 pav.). Be to, čia aptikta nemažai kalcio–geležies fosfato. Ši fazė yra išsikristalizavusi tiek atskirų idiomorfinių kristalų pavidalu (6 pav. a), tiek ir kartu su fajalitu (6 pav. b). Tarp fajalito kristalų aptikta šiek tiek leucito, o bandinio pakraščiuose matyti medžio anglių likučių bei kai kur – kvarco grūdelių. Pastarieji pateko iš aplinkos ir yra tiesiog prikibę prie paviršiaus.

Tai, kad šlakai D1 ir D2 neturi sustingusių srovelių, taip pat gausūs medžio anglių intarpai juose (3 pav. b) rodo, kad jie galėjo atvėsti arba rudnelės dugne, arba kalvės žaizdre. Radinyje D1 aptikta nevisiškai redukuota rūda, taip pat ne itin dideli radinių D1 ir D2 cheminės sudėties skirtumai nuo tekiųjų šlakų rodo, kad greičiausiai tai yra šlakai, susidarę lydymo metu ir likę rudnelės viduje – vadinamieji rudnelės dugno šlakai. Todėl jų struktūra skiriasi ne tik dėl sudėties skirtumų, bet ir dėl kitokių aušimo sąlygų, palyginti su tekaisiais šlakais.

Apžvelgiant kitose Lietuvos (Lieporiai, Bakšiai) ir užsienio vietovėse (Heidenheim–



6 pav. Šlako D2 mikrostruktūra skirtingose bandinio vietose (a ir b). Fa – fajalitas, Lc – leucitas, P – kalcio–geležies fosfatas, Wu – viustitas. A. Selskienės nuotr.

Grosskuchen (Vokietija), Les Martys (Prancūzija), Kent (Anglija) rastų dugno šlakų tyrimų duomenis matyti, kad jų sudėtis yra įvairesnė nei tekiųjų šlakų (2 lent.), ir pateiktoje diagramoje (4 pav.) FeO, SiO₂ bei visų kitų oksidų kiekių sumos tarpusavio santykį atspindintys taškai yra gerokai labiau išsisklaidę nei tekiųjų šlakų. Geležies kiekis šios rūšies šlakuose kinta platesnėse ribose, t.y. nuo ~34 iki ~56%, silicio oksido kiekis – nuo ~18 iki ~35% (2 lent.). Dugno šlakų sudėtis visose vietovėse skiriasi nuo tekiųjų, tik skirtumai nėra vienodi. Pavyzdžiui, Bakšių dugno šlake, kaip ir Paplienijos, palyginti su tekiuoju, aptikta mažiau geležies (atitinkamai 43,1 ir ~51,6% Fe) ir daugiau fosforo oksido (4,3 ir ~2,6% P₂O₅), tuo tarpu Lieporių dugno šlake yra daugiau geležies (atitinkamai 56,0 ir ~51,5% Fe) ir mažiau fosforo oksido (1,2 ir ~2,3% P₂O₅). Heidenheim–Grosskuchen (Vokietija) ir Les Martys (Prancūzija) vietovėse rastuose dugno šlakuose, palyginti su tose pačiose vietovėse rastais tekaisiais šlakais, geležies kiekis vienu atveju taip pat yra mažesnis, o kitu – didesnis, tačiau abiem atvejais aptikta daugiau silicio ir kalio oksidų. Taigi Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės rudnelių dugno šlakų sudėtis yra panaši į kitose vietovėse randamų analogiškų radinių sudėtį, tik pasižymi kiek didesniu kalcio ir fosforo oksidų kiekiu.

Labiausiai iš visų tirtų Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės šlakų savo chemine sudėtimi išsiskiria radiniai K1 ir K2. Pirmiausia šių dviejų bandinių sudėtis skiriasi tarpusavyje geležies, silicio, aliuminio bei kalio kiekiu, ir šie skirtumai yra didesni nei dugno ar tuo labiau tekiųjų šlakų tarpusavio skirtumai. Antra, šiems šlakams bendra yra tai, kad juose yra mažiau kalcio (~1,1% CaO), mangano (~0,05% MnO) ir fosforo (~1,2% P₂O₅) oksidų nei tekiuosiuose ar rudnelės dugno šlakuose (2 lent.), nors geležies kiekis visų rūšių šlakuose yra gana panašus. Be to, radinyje K2 aptikta kur kas daugiau kalio oksido (1,65% K₂O) nei kituose šlakuose.

Radinių K1 ir K2 fazinė sudėtis taip pat skiriasi. Rentgenofazinės analizės duomenys rodo, kad bandinyje K1 yra fajalito, magnetito, kvarco, maghemito, getito ir lepidokrokito, tuo tarpu bandinyje K2, be fajalito, magnetito ir kvarco, aptikta dar viustito ir leucito, tačiau nerasta korozijos produktams būdingų junginių. Reikia pažymėti, kad šios rūšies šlakų rentgenofazinės analizės duomenys kartais nevisiškai sutampa su mikrostruktūros duomenimis. Tai galima paaiškinti tuo, kad skirtingiems tyrimams imami atskiri mėginiai, ir tai rodo, kad šių radinių sudėtis ir mikrostruktūra nėra tolygi visame gabale. Tai būdinga kalvės žaizdro šlakams (Serneels ir kt., 2003, p. 475).

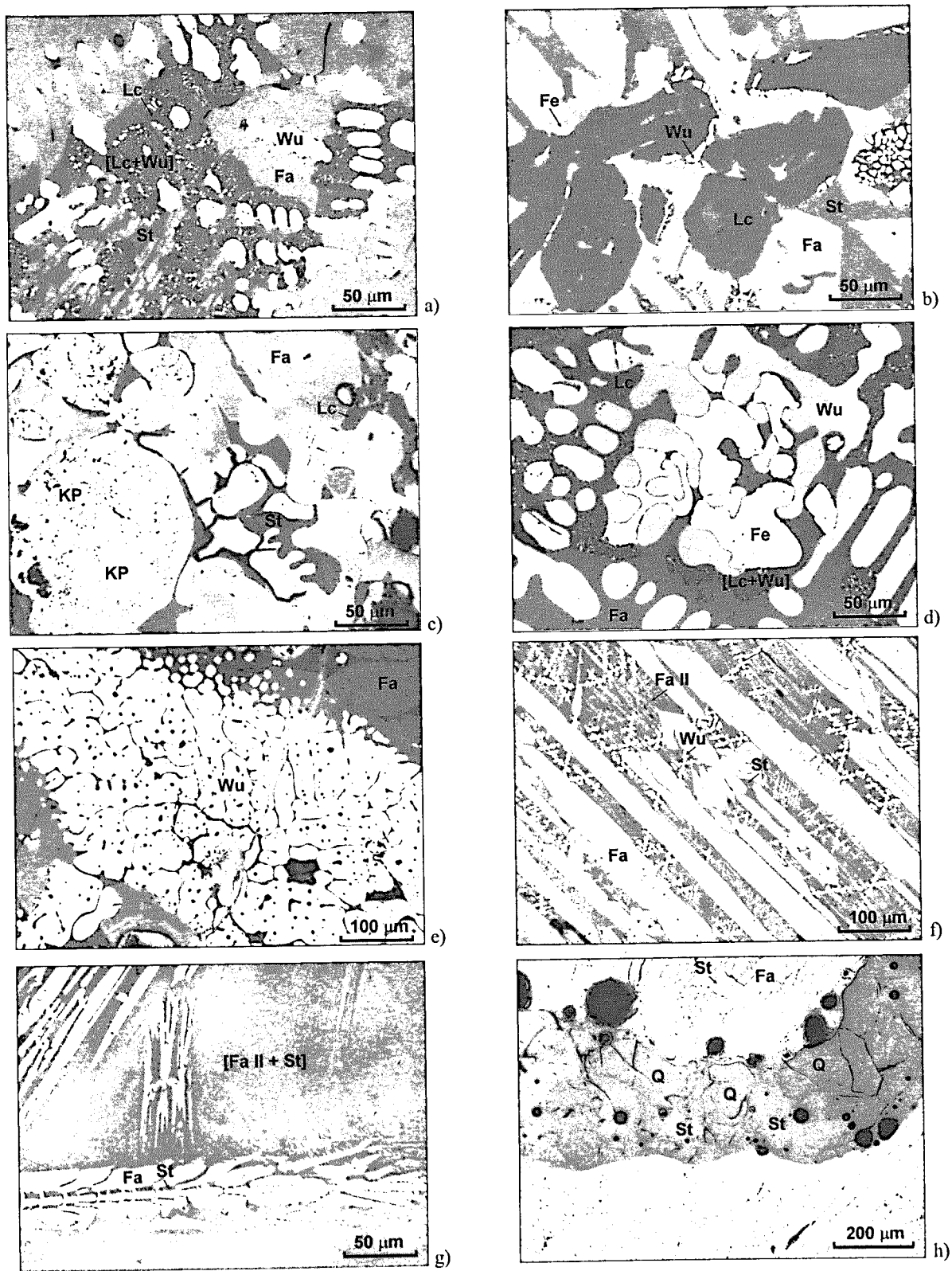
Darant prielaidą, kad radinys K2 yra kalvės žaizdro šlakas (nes yra būdingos dubens formos) ir atsižvelgiant į galimą jo sudėties netolygumą, mikrostruktūrai tirti vienas bandinys buvo paimtas iš jo centrinės dalies (3 pav. d:A), o kitas – iš pakraščio (3 pav. d:B). Tyrimų rezultatai rodo, kad ši gargažė sudaryta iš dviejų rūšių gana stipriai savo sudėtimi ir struktūra besiskiriančio šlako. Pirmasis vyrauja šlifo A apatiniame trečdalyje ir visame kraštinės dalies šlifo B. Čia pagrindinės fazės yra fajalitas ir viustitas, o tarp fajalito kristalų yra leucito (dažniausiai išsikristalizavusio kartu su viustitu) bei stiklo fazės (7 pav. a). Aptikta keletas vietų (daugiausia šlifo B), kur itin daug leucito (7 pav. b). Dažniausiai jos yra netoli išorinio paviršiaus. Tai rodo, kad lokaliai leucito susidarymui įtakos galėjo turėti į lydala patekę daug kalio turintys medžio anglių pelenai. Reikia pažymėti, kad tiriamajame šlake K2, skirtingai nei tekiuosiuose šlakuose, yra nemažai korozijos produktų – didelių apvalainų plotų, sudarytų iš geležies oksidų bei hidroksidų (7 pav. c). Apatinėje šlifo B dalyje aptikta išlikusios metalinės geležies (7 pav. d). Paėsdinus bandinį 3% azoto rūgšties tirpalu etilo alkoholyje (Nital) išryškėjo ferito grūdėliai, rodantys, kad geležis nėra įsianglinusi. Gargažės pakraščiuose matyti įsiterpusių medžio anglių trupinėlių.

Kito tipo šlako aptikta dviejuose viršutiniuose šlifo A trečdaliuose, kuris sudaro apie 12 mm storio sluoksnį. Struktūra čia ne tik gerokai skiriasi nuo anksčiau paminėtosios, bet ir kinta. Apatinėje sluoksnio dalyje matyti kelios viustito sankaupos (7 pav. e). Manoma, kad tai kaitinamo dirbinio paviršiuje susidariusios, vėliau atskilusios ir patekusios į šlaką, bet nevysiškai lydale ištirpusios geležies oksido dalelės. Iš karto po jų kylant į viršų atsiranda įprasta tekiajam šlakui mikrostruktūra, sudaryta iš fajalito (daug kur ilgų ir siaurų, dažniausiai skeletinių kristalų pavidalu) ir tarpkristalinės masės, kurioje matyti antrinis fajalitas, stiklas ir smulkūs viustito dendritai (7 pav. f). Viustito ir

leucito čia yra itin mažai. Struktūra einant į viršų smulkėja, ir viršutiniame trečdalyje vyrauja stiklo fazės bei smulkių kristalų matrica su kartais pasitaikančiais didesniais fajalito kristalais (7 pav. g). Toks struktūros smulkėjimas rodo viršuje greičiau aušus. Čia aptikta nemažai išlikusios metalinės geležies, o korozijos produktai daug kur yra išlaikę metalinės geležies kruopelių formą. Paėsdinus bandinį su Nital paaiškėjo, kad geležis čia taip pat yra feritinė ir nėra įsianglinusi. Ypač svarbu pažymėti, kad šiame sluoksnyje aptikta keletas 2–3 mm dydžio intarpų, sudarytų iš apsilydžiusių kvarco grūdelių stiklo matricoje (7 pav. h). Tai rodo, kad gargažės susidarymo pabaigoje galėjo būti beriamas smėlis. Atsiradęs didesnis silicio dioksido kiekis iš esmės pakeitė lydalo sudėtį ir sustingusio viršutinio sluoksnio mikrostruktūrą: laisvo geležies oksido perteklius susijungė su silicio dioksidu į fajalitą, todėl struktūroje liko gerokai mažiau viustito.

Šlako K1 mikrostruktūra taip pat pasižymi dideliu netolygumu ir įvairiose šlako vietose labai skiriasi. Bandinio apatinėje pusėje, kaip ir šlake K2, vyrauja fajalitas ir viustitas, o viršutinėje pusėje viustito aptikta gerokai mažiau. Viename viršutinės dalies pakraštyje ir pačiame bandinio paviršiuje matyti itin daug lokaliai išsikristalizavusio leucito. Šiame šlake, kaip ir radinyje K2, pastebėta kur kas daugiau ir gerokai didesnių metalinės geležies intarpų nei tekiuosiuose ar dugno šlakuose. Visame šlake gausu medžio anglių likučių ir korozijos produktų, kurių, beje, čia yra žymiai daugiau nei šlake K2. Tai patvirtina ir šlakų cheminė bei fazinė sudėtis: bandinyje K1, palyginti su K2, yra daugiau geležies ir kaitmenų (2 lent.), be to, aptikta maghemito, getito bei lepidokrokito.

Kai kurie autoriai, tyrinėję kalvės žaizdro šlakų sudėtį, nurodo, kad juose, palyginti su lydymo šlakais, gali būti mažiau mangano ir fosforo (Thomsen, 1971, p. 108, Fröhlich ir kt., 1987, p. 60). Mūsų gauti duomenys šiam teiginiui neprieštarauja. Tyrimų metu pastebėtas struktūros



7 pav. Kalvės žaizdro šlako K2 mikrostruktūra skirtingose bandinio vietose (a-h). Fa – fajalitas, Fa II – antrinis fajalitas, Fe – metalinis geležis, KP – korozijos produktai, Lc – leucitas, St – stiklo fazė, Q – kvarcas, Wu – viustitas. A. Selskienės nuotr.

netolygumas taip pat yra būdingas kalvės žaizdre susidariusiems šlakams (Serneels ir kt., 2003, p. 475). Taigi šlakų K1 ir K2 cheminės sudėties ir mikrostruktūros ypatumai leidžia šiuos radinius priskirti kalvės žaizdro šlakams.

Kadangi Lietuvoje rasto III–V a. kalvės žaizdro šlako cheminių tyrimų duomenų literatūroje neaptikta, palyginimui buvo paimti užsienio šalyse (Slovakijoje, Vokietijoje, Prancūzijoje) rasto šios rūšies šlako tyrimų duomenys. Pateiktoje diagramoje (4 pav.) matyti, kad kalvės žaizdro šlakų cheminę sudėtį atspindintys taškai, palyginti su tekiųjų ir dugno šlakų taškais, yra labiausiai išsisklaidę, nes šiuose šlakuose esančių pagrindinių elementų kiekis kinta gana plačiose ribose: geležies juose rasta nuo 32,3 iki 59,8%, o silicio oksido – nuo 12,9 iki 39,8% (2 lent.). Reikia pažymėti, kad beveik visuose šios rūšies šlakuose tiek mangano oksido, tiek ir fosforo oksido aptikta palyginti nedaug (iki 1%). Taigi ištirtieji Paplienijos šlakai K1 ir K2 turi gana ryškių kalvės žaizdro šlakų požymių, kurie yra būdingi ir kitų vietovių analogiškiems radiniams.

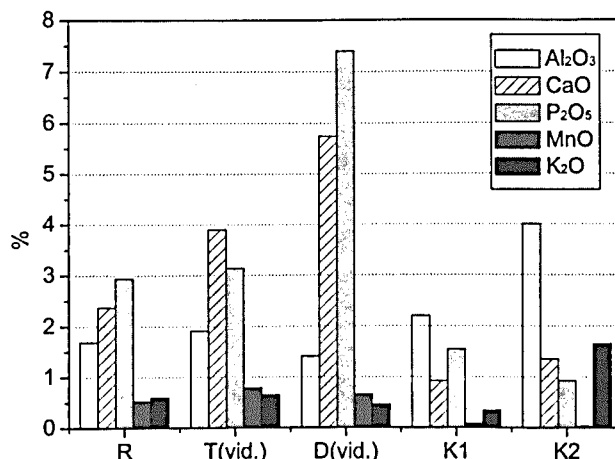
REZULTATŲ APTARIMAS

Šlako radinių cheminės, fizinės sudėties bei mikrostruktūros tyrimų rezultatai rodo, kad archeologinių kasinėjimų metu Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietėje buvo aptikta lydymo (tekiųjų bei dugno) ir kalviškųjų (kalvės žaizdro) šlakų. Kadangi senovės metalurginiai šlakai paprastai likdavo ten, kur susidarydavo, galima teigti, kad šioje vietovėje vyko geležies dirbinių gamybos abiejų pagrindinių etapų darbai, t.y. geležis čia buvo ir išgaunama iš rūdos, ir apdirbama.

Kadangi Paplienijos gyvenvietėje rūdos neaptikta, apie naudotą žaliavą galima spręsti tikrai netiesiogiai, t.y. iš lydymo šlako sudėties. Geležiai lydyti rudnelėse reikalinga apie 44–50% geležies turinti rūda (Navasaitis, 2003, p. 22), tačiau Paplienijos gyvenvietės lydymo šlakuose likusios gele-

žies kiekis rodo, kad čia naudota rūda turėjusi būti sodresnė, t.y. turėti per 50% Fe, o silicio oksido rūdoje būta mažai. Lieporių senovės gyvenvietės tekijame šlake taip pat yra apie 51% Fe, o lydymui paruoštos rūdos sudėtyje aptikta iki 57,8% Fe (Navasaitis, 2003, p. 31). Matyt, panašus geležies kiekis galėjo būti ir Paplienijos gyvenvietėje lydymui naudotos rūdos sudėtyje.

Šiuos duomenis įdomu palyginti su tame pačiame regione, t.y. Telšių rajone, rastos šiuolaikinės balų rūdos (R) chemine sudėtimi (2 lent.) (Navasaitis, 2003, p. 22). Tyrimams buvo naudotas 1000°C temperatūroje kaitintas bandinys. Jis, galima sakyti, atitinka apdegtos rūdos sudėtį. Cheminės sudėties duomenys rodo, kad rūdoje geležies yra mažiau (36,5%), o silicio oksido gerokai daugiau (36,7%) nei Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės lydymo šlakuose (~46–50% Fe ir ~13–23% SiO₂, 2 lent.). Kitų oksidų (aliuminio, kalcio, fosforo, mangano, kalio) kiekio palyginimas rūdoje ir tirtuose šlakuose pateiktas 8 pav. Matyti, kad pastarųjų oksidų santykis rūdoje yra labiausiai panašus į jų santykį tekiuosiuose šlakuose, tuo tarpu dugno šlakuose yra daugiau kalcio ir fosforo oksidų. Absoliutūs aliuminio, kalcio, fosforo, mangano ir kalio oksidų kiekiai išdegoje



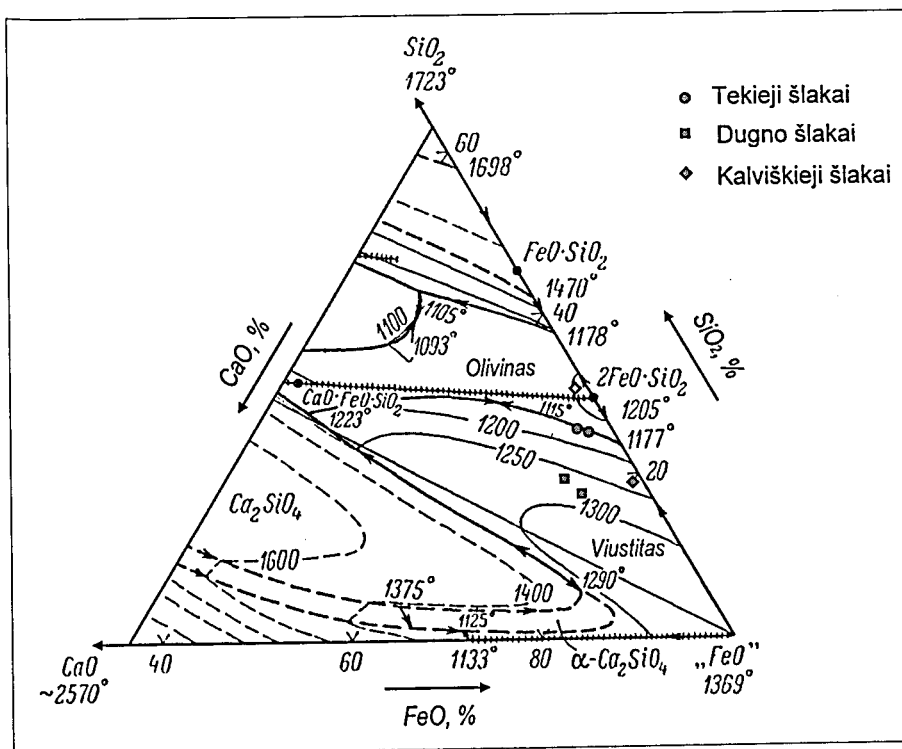
8 pav. Telšių r. balų rūdos (R) ir Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės skirtingų rūšių šlako (T, D, K) sudėties palyginimas. Sudarė A. Selskienė.

rūdoje ir tekiuosiuose šlakuose taip pat yra gana panašūs, nors technologiniu požiūriu po geležies redukavimo šlakuose jų turėtų būti šiek tiek daugiau. Kalvės žaizdro šlakuose minėtų oksidų santykis yra kitoks nei rūdoje, nes šios gargažės formavosi ne tiesiogiai iš rūdos, o iš kritėje buvusių šlakų ir kitų priedų.

Nemažas fosforo kiekis rudnelės tekiuosiuose ir dugno šlakuose (3–7,5% P_2O_5) rodo, kad Paplienijos gyvenvietėje naudota rūda turėjo būti fosforinga ir galėjo turėti panašų fosforo oksido kiekį, kaip Telšių rajone rastoji rūda. Be to, panašus aliuminio, kalcio, fosforo, mangano, kalio oksidų santykis rūdoje ir tekiuosiuose šlakuose leidžia daryti prielaidą, kad Paplienijos gyvenvietėje geležiai išgauti galėjo būti naudojama gana panašios sudėties rūda, kaip minėtoji rūda (R). Palyginti nedidelis geležies ir nemažas silicio oksido kiekis šioje rūdoje rodo, kad tokiu atveju ji turėjo būti papildomai sodrinama (plaunama ir/ar atrenkama), siekiant pašalinti dalį bergždziosios uolienos, pirmiausia SiO_2 .

Kitas svarbus parametras, turėjęs didelę įtaką lydymo procesui ir gautos geležies kokybei, buvo šlako lydymosi temperatūra (Navasaitis, 2003, p. 84). Žinant šlako cheminę sudėtį, šį parametą apytiksliai galima įvertinti remiantis trijų svarbiausių šlakus sudarančių oksidų, pvz., FeO , SiO_2 ir CaO trikomponentės sistemos būsenos diagrama (9 pav.). Matyti, kad tekieji šlakai lydosi žemiausioje temperatūroje, t.y. apie $1115^\circ C$, o dugno šlakų lydymosi temperatūra kiek aukštesnė, apie 1250 – $1270^\circ C$. Tikėtina, kad rudnelėje buvo pasiekama pastaroji aukštesnė temperatūra, o žemesnės lydymosi temperatūros tekieji šlakai turėjo pakankamai gerą takumą, kad atsiskirtų ir nutekėtų nuo geležies. Kitose Lietuvos vietovėse aptikto tekiujo šlako lydymosi temperatūros yra panašios: Lieporių šlako – 1150 – $1300^\circ C$, Bakšių – 1100 – $1250^\circ C$ (Navasaitis, 2003, p. 85).

Teikiųjų ir dugno šlakų sudėties tyrimai parodė, kad juose likusios geležies kiekis yra panašus į daugelio kitų vietovių to paties laikotarpio šlakuose aptiktos geležies kiekį. Tai rodo, kad Paplienijos



9 pav. Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės šlakų sudėties taškai trikomponentės sistemos CaO – FeO – SiO_2 būsenos diagramoje (pagal Toponov ir kt., 1972, p. 108).
Sudarė A. Selskienė.

metalurgai turėjo pakankamai įgūdžių ir patirties geležiai išgauti ir lydymo procesui reguliuoti. Kita vertus, pakankamai aukštą technologijos lygį rodo ir tai, kad senovės lydytojai mokėjo sulaikyti fosforą šlake. Kaip jau buvo minėta, šioje vietovėje galėjo būti perdirbama daugiau ar mažiau fosforinga rūda, tuo tarpu geležies konkretizijoje iš Paplienijos fosforo aptikta palyginti nedaug, apie 0,3% P (Navasaitis ir kt., 2001, p. 126). Taigi to meto metalurgai mokėjo reguliuoti lydymo sąlygas ir pasiekti, kad fosforas kaip nepageidaujamas elementas liktų šlakuose ir tik nedidelė dalis jo pereitų į geležį.

Remiantis šlakų tyrimų rezultatais iš dalies galima spręsti ir apie geležies gavybai naudotą įrangą. Paplienijos gyvenvietėje aptikti tekieji šlakai savo forma ir mikrostruktūra yra būdingi rudnelėms, turinčioms angą šlakui ištekėti. Todėl nenuostabu, kad archeologinių tyrinėjimų metu 4-oje perkasoje buvo aptikta ovalinė šachtinė rudnelė su šlako išleidimo anga, nukreipta į 80–120 cm dydžio verpstės formos duobę, kuri ištiesai buvo prisipildžiusi gargažių (Valatka, 2004, p. 360). Spėjama, kad būtent ovalinės formos rudnelėse buvo galima apsaugoti išlydomą geležį nuo pernelyg didelio prisotinimo fosforu, kas ypač aktualu lydant geležį iš fosforingos balų rūdos. Be to, tikėtina, kad jose buvo pasiekiamas tolygesnis redukuotos geležies įsianglinimas, išlydoma geresnės kokybės geležis ir net plienas (Navasaitis, 2003, p. 72). Lyginant su kitomis to paties laikotarpio Lietuvoje rastomis ovalinėmis rudnelėmis matyti, kad Paplienijos gyvenvietės rudnelė (vidaus skersmuo 25x40 cm) yra didžiausia iš visų rastųjų, nors nuo kai kurių skiriasi nežymiai: Lavoriškių rudnelių vidaus skersmuo yra 17x26 ir 20x27 cm, Lieporių – 18x28 cm, Nemenčinės piliakalnio – 21x30 cm, Semeniškių – 22x35 cm ir Bakšių – 22x36 cm (Navasaitis, 2003, p. 56).

Tikėtina, kad 7-oje perkasoje aptiktos trys mažesnės, ~18 cm vidaus skersmens, krosnelės, kurių interpretacija gana prieštaringa (žr. įvadą), buvo naudojamos taip pat geležiai išgauti. V. Valatka (2004, p. 361) mini, kad tiek prie ovalinės, tiek ir prie trijų mažesnių krosnelių buvo aptikta

panašių gargažių. Šios krosnelės, kaip ir ovalinė rudnelė, turėjo angas, nukreiptas į bendrą pilną degėsių, anglių ir gargažių duobę, tuo tarpu apie duobę šalia 1-oje perkasoje rastos krosnelės, siejamos su metalų apdirbimu, neužsimenama (Valatka, 1960š, p. 22–23; 1962š, p. 58; 2004, p. 115–116). Panašaus dydžio to paties laikotarpio rudnelėmis laikomų krosnelių rasta ir kitose Lietuvos vietovėse: Bakšiuose (vidaus skersmuo 15 cm), Nendriniuose (15–17 cm), Juodonyse (18–23 cm) (Navasaitis, 2003, p. 56). Be to, mažai tikėtina Endzino (1965) prielaida, kad šiose trijose krosnelėse geležis buvo perlydoma į plieną. Šlakų, kurie būtų būdingi geležies perlydymui į plieną ir patvirtintų šį teiginį, neaptikta. Kita vertus, rudnelių konstrukcija nepritaikyta reikalingai aukštai, per 1500°C, temperatūrai pasiekti. Tai liudija nedidelis rudnelių sienelių storis (8–10 cm) ir palyginti siauras perdegusio molio ruoželis vidinėje pusėje (dviejose krosnelėse jis sudaro tik 3 cm, trečioje krosnelėje dar mažiau – tik 0,5–1 cm.).

Kalbant apie geležies apdirbimą Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietėje, pirmiausia reikia pažymėti, kad rastieji kalvės žaizdro šlakai leidžia pagrįsti V. Valatkos (2004, p. 115) ir J. Navasaičio (2003, p. 88) teiginius, kad 1-oje perkasoje rasta krosnelė yra susijusi su metalų apdirbimu ir kad tai yra išlikęs kalvės žaizdras. Būdingos dubens formos kalviškųjų šlakų (taip pat ir šlakas K2) yra aptikta netgi toje pačioje perkasoje, netoli krosnelės (Valatka, 1960š, p. 24).

Netolygi kalvės žaizdro šlakų sudėtis ir mikrostruktūra atspindi procesus, vykčius jų susidarymo metu, ir leidžia juos susieti su vykdytais darbais. [vertinus skirtingos sudėties šlako kiekį (žr. skyrelį „Šlako susidarymas ir morfologija“, taip pat Serneels ir kt., 2003, p. 475–476) gargažėse K1 ir K2 paaiškėjo, kad bandinyje K1 apie 60% yra daug geležies (metalo, oksido, hidroksido–oksido pavidalu) turinčio šlako ir apie 40% – fajaltinio šlako. Tuo tarpu bandinyje K2 didžiąją dalį, apie 90%, sudaro fajalitinis šlakas, o apie 10% – daug silicio oksido turintis šlakas. Anot Serneels (2003, p. 476), kalvės žaizdro šlakai, sudaryti daugiausia iš fajalitinio šlako (apie 90%) ir viršuje turintys

nedidelį iškilimą iš daug silicio oksido turinčio šlako, yra labai įprasti. Autorius mano, kad tokios gargažės gali būti ilgai trukusio karšto kalimo formuojant objektą (susidaro daug fajalitinio šlako) ir po to sekusios trumpesnės užbaigiamosios fazės, kada smėlis yra naudojamas metalo apsaugai (susidaro daug silicio oksido turintis šlakas), rezultatas.

Pirmosios fazės metu, t.y. kaitinant geležį, šlakas daugiausia susidaro susijungiant geležies oksidacijos produktams su nedideliu kiekiu silicio oksido. Pastarasis į šlakus galėjo patekti tiek kaip sąmoningai dedamas flusas, tiek ir lydantis žaizdro sienelėi. Didesnis aliuminio ir kalio oksidų kiekis šlake K2 rodytų, kad į šlaką galėjo patekti daug šių elementų turėjusi žaizdro sienelė (Hauptmann ir kt., 1989, p. 96–97), nors taip pat yra tikėtina, kad kaip flusas galėjo būti naudojamas smėlis su molio priemaišomis. Kita vertus, didesnę kalio oksido kiekį galėjo lemti šlake ištirpę medžio anglių pelenai. Tai rodo netolygus leucito išsidėstymas šlako mikrostruktūroje, ypač didesnės jo sankaupos. Tokiam pat šlako kiekiui susidaryti kalvės žaizdre yra sunaudojama žymiai daugiau medžio anglių nei rudnelėje (Kronz, 1997, p. 190), taigi nenuostabu, kad leucito kalvės žaizdro šlakuose aptikta daugiau nei tekiuosiuose ar rudnelės dugno šlakuose. Tirtuose kalvės žaizdro šlakuose aptikta šiek tiek kalcio bei fosforo, ir tai rodo, kad iš ruošiamo dirbinio galėjo nutekėti dalis lydymo šlakų.

Šlako K2 centrinės dalies viršuje esančio sluoksnio sudėties kitimas gana ryškiai atspindi baigiamojoje fazėje vykusių procesus: pirmiausia pasirodo didesnis kiekis oksidacijos produktų, kurie nebegali visiškai ištirpti šlake (viustito sankaupos), po to atsiranda daug silicio oksido turintis šlakas. Tai reiškia, kad objekto formavimo (kartu ir šlako susidarymo) pabaigoje metalo oksidacijai sustabdyti pradėtas berti smėlis arba bent jau padidintas beriamo smėlio kiekis.

Kalvės žaizdro šlake K1 aptikta daug korozijos produktų, tai rodo kažkada buvus nemažai metalinės geležies. Ji šlake galėjo atsirasti nuo kaitinamo gabalo atitrūkus geležies dalelėms (kai apdirbama nelabai kompaktiška medžiaga arba kai dirbama temperatūroje, artimoje metalo lydymosi tempe-

ratūrai, pavyzdžiui, atliekant suvirinimo operacijas) arba pačiame žaizdre redukuojantis geležies oksidams (Serneels ir kt., 2003, p. 471, 475–476).

Kalviškųjų šlakų tyrimo rezultatai akivaizdžiai rodo, kad Paplienijos gyvenvietės kalvio žaizdre buvo kaitinami objektai karštajam kalimui, o metalo oksidacijai sustabdyti kaip flusas buvo naudojamas smėlis.

IŠVADOS

1. Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietės šlakuose aptikta ~59–68% geležies oksido, ~13–28% silicio oksido ir nedideli kiekiai kitų (aliuminio, kalcio, fosforo, mangano, magnio, kalio, natrio, titano, bario) oksidų, kurie kartu sudaro ~6–19%. Tokia sudėtis yra panaši į ankstyvosios geležies gavybos metalurginių šlakų sudėtį, ir tai liudija, kad radiniai iš tiesų susiję su šiuo amatu.

2. Remiantis Paplienijos šlako radinių išoriniais požymiais bei cheminės, fazinės sudėties ir mikrostruktūros tyrimų rezultatais buvo identifikuoti lydymo (tekietji ir dugno) ir kalviškieji (kalvės žaizdro) šlakai. Tai rodo, kad šioje vietovėje geležis buvo ir išgaunama, ir apdirbama.

3. Tekiųjų ir dugno šlakų cheminė sudėtis yra panaši, nors kai kurių elementų kiekis šiek tiek skiriasi: tekiuosiuose šlakuose aptikta ~64% geležies oksido, ~23% silicio oksido, ~3,9% kalcio oksido, ~3,1% fosforo oksido, o dugno šlakuose aptikta mažiau, t.y. ~60% geležies oksido ir ~14% silicio oksido, tačiau daugiau, t.y. ~5,7% kalcio oksido ir ~7,4% fosforo oksido. Fazinės analizės ir mikrostruktūros tyrimai parodė, kad tekiuosius šlakus daugiausia sudaro fajalitas, viustitas ir stiklo fazė, o jų mikrostruktūra yra tolygi, šiek tiek smulkėjanti srovelių pakraščiu link. Tuo tarpu dugno šlakuose, be minėtų fazių, aptikta medžio anglių intarpų, viename iš bandinių – kalcio–geležies fosfato, kitame – nevysiškai redukuotos rūdos junginių. Be to, dugno šlakų mikrostruktūra yra netolygi, fazių kiekis ir jų išsidėstymas yra įvairus.

4. Didelis fosforo kiekis lydymo šlakuose rodo, kad Paplienijos gyvenvietėje naudota rūda buvo gana fosforinga. Tačiau čia aptiktoje geležies

konkrečioje rasta palyginti nedaug, 0,3% fosforo (Navasaitis ir kt., 2001, p. 126). Tai liudija, kad šios vietovės senovės metalurgai mokėjo reguliuoti lydymo sąlygas ir pasiekti, kad fosforas kaip nepageidaujamas elementas liktų šlakuose ir tik nedidelė jo dalis pereitų į geležį.

5. Atrastos rudnelių liekanos (neblogai išsilaičiusios apatinės rudnelių dalys 4-oje ir 7-oje perkasoje), taip pat lydymo šlakų sudėtis ir morfologija rodo, kad Paplienijos piliakalnio papėdės gyvenvietėje buvo naudojamos šachtinės rudnelės su šlako išleidimo anga. Lydymo šlakų sudėtis rodo, kad rudnelėse galėjo būti pasiekama 1250–1270°C temperatūra.

6. Kalvės žaizdro šlakų sudėtis ir mikrostruktūra skiriasi nuo lydymo šlakų. Nors pagrindinių elementų kiekis kalviškuosiuose šlakuose (~62–68% geležies oksido ir ~16–28% silicio oksido) yra panašus kaip ir lydymo šlakuose, tačiau kalviškuosiuose aptikta gerokai mažiau, t.y. 0,9–1,4% kalcio oksido, 0,9–1,6% fosforo oksido ir 0,03–0,08% mangano oksido. Be to, viename iš kalvės žaizdro šlakų aptikta kur kas daugiau kalio oksido (1,65%) nei kituose tirtuose šlakuose. Fazinės analizės ir mikrostruktūros tyrimai parodė, kad, be fajalito, viustito ir stiklo fazės, juose dar yra leucito, kvarco, metalinės geležies, jos korozijos produktų, medžio anglių intarpų. Kalvės žaizdro šlakų mikrostruktūra yra itin netolygi dėl vykusių procesų įvairovės.

7. Identifikuoti kalvės žaizdro šlakai leidžia pagrįsti kitų autorių prielaidas (Valatka, 2004, p. 115; Navasaitis, 2003, p. 88), kad 1-oje perkasoje rasta krosnelė yra susijusi su geležies apdirbimu, todėl visiškai tikėtina, kad tai yra išlikęs kalvės žaizdras.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju Telšių muziejaus „Alka“ darbuotojams už suteiktą galimybę atlikti archeologinių radinių tyrimus, taip pat doc. J. Navasaičiui už pagalbą ir konsultacijas interpretuojant tyrimų rezultatus.

KAI KURIŲ TERMINŲ PAAIŠKINIMAI

- Anortitas – kalcio aliuminio silikatas $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.
- Cementitas – geležies karbidas Fe_3C .
- Fajalitas – geležies silikatas $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$.
- Getitas – geležies hidroksidas–oksidai $\alpha\text{-FeOOH}$.
- Kvarcas, smėlis – silicio dioksidas SiO_2 .
- Leucitas – kalio aliuminio silikatas $\text{KAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$.
- Lepidokrokitas – geležies hidroksidas–oksidai $\gamma\text{-FeOOH}$.
- Maghemitas – geležies oksidas $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.
- Magnetitas – geležies oksidas FeFe_2O_4 .
- Stiklo fazė – žemiausią stingimo temperatūrą turėjęs ir, išsikristalizavus kitoms fazėms, paskutinis sustingęs lydalas.
- Viustitas – geležies oksidas FeO .

LITERATŪROS ŠARAŠAS

- Coustures M. P., Béziat D., Tollon F., Domergue C., Long L., Rebiscoul A., 2003 – The Use of Trace Element Analysis of Entrapped Slag Inclusions to Establish Ore – Bar Iron Links: Examples From Two Gallo–Roman Iron–Making Sites In France (Les Martyrs, Montagne Noire, and Les Ferrys, Loiret) // *Archaeometry*. 2003, 45(4), p. 599–613.
- Endzinas A., 1965 – Paplinio metalurgai // *Mokslas ir gyvenimas*. 1965, Nr. 7, p. 28–29.
- Endzinas A., 1968 – Geležies gamybos klausimu Lietuvoje // *Geografinis metraštis*. 1968. T. 9, p. 147–166.
- Erze, 1991 – Erze, Schlacken, Eisen. Einführungskurs zum Studium der frühen Eisenmetallurgie und der Identifikation der Abfälle dieser Industrie // *Grabungstechnik, SAGEA, VATG, Sonderheft*, 1991.
- Fröhlich F., Rose D., Enlicher G., 1987 – Mineralogische Typisierung mittelalterlicher Eisenschlacken aus der Grabung im Regensburger Dom // *Schriftenreihe Bergbau- und Industriemuseum Ostbayern*. 1987, 12(1), p. 59–70.
- Grigalavičienė E., 1995 – Žalvario ir ankstyvasis geležies amžius Lietuvoje. Vilnius, 1995.
- Hauptmann A., Mai P., 1989 – Chemische und mineralogische Untersuchungen an Schlacken aus der Colonia Ulpia Traiana // *Berträge zur Geschichte des Xantener Raumes*. Hrg. von G. Precht und H.–J. Schalles. 1989, p. 93–107.
- Yalcin Ü., Hauptmann A., 1995 – Zur Archäometallurgie des Eisens auf der Schwäbischen Alb // *Beiträge zur Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb*.

Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg, 1995. B. 55, p. 269–309.

Keesmann I., Hilgart T., 1992 – Chemische und mineralogische Untersuchung der Schlacken von Manching // Ergebnisse der Ausgrabungen 1984–1987 in Manching. 1992, 15, p. 391–413.

Kronz A., 1997 – Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen – Untersuchungen an Eisen- und Buntmetall Schlacken. Dissertation. Mainz, 1997.

Michelbertas M., 1986 – Senasis geležies amžius Lietuvoje. Vilnius, 1986.

Mihok L., Pribulova A., Javorsky F., 2001 – Iron Smelting and Working in Spiš in Roman and Slav Periods // Acta Metallurgica Slovaca. 2001, 7, p. 102–118.

Navasaitis J., 2003 – Lietuviška geležis. Kaunas, 2003.

Navasaitis J., Pilkaitė D., Sveikauskaitė A., Matulionis E., 2001 – Metallographic analysis of the as-smelted bloomery iron // Acta Metallurgica Slovaca. 2001, 7, p. 119–126.

Navasaitis J., Sveikauskaitė A., Selskis A., 1999 – Lietuvos rudnių šlako sudėtis ir savybės // Lietuvos archeologija. Vilnius, 1999. T. 18, p. 121–133.

Navasaitis J., Sveikauskaitė A., Selskis A., Matulionis E., 2003 – Ironmaking Techniques During the Roman Period in Lithuania // Prehistoric and Medieval Direct Iron Smelting in Scandinavia and Europe. Aspects of Technology and Society. Ed. by L. C. Norbach. Acta Jutlandica LXXVI:2, Humanities Series 75. Aarhus University Press, 2003, p. 87–94.

Oelsen W., Schürmann E., 1954 – Untersuchungsergebnisse alter Rennfeuerschlacken // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1954, Jg. 25, Heft 11–12, p. 507–514.

Paynter S., 2006 – Regional Variations In Bloomery Smelting Slag Of The Iron Age And Romano-British Periods // Archaeometry. 2006, 48(2), p. 271–292.

Piaskowski J., 1982a – Hypothetische Ableitung der Merkmale des im altertümlichen Masowien-Zentrum erschmolzenen Eisens // Archeologia iterregionalis. Ancient Iron Manufacture Centres in Northern Central Europe. Ed. J. K. Kozłowski, S. K. Kozłowski. Krakow-Warszawa, 1982, p. 29–52.

Piaskowski J., 1982b – Charakteristik des Herstellungsverfahrens in zwei altertümlichen Hüttenzentren: Luboszyce- und Balten-Zentrum // Archeologia iterregionalis. Ancient Iron Manufacture Centres in Northern Central Europe. Ed. J. K. Kozłowski, S. K. Kozłowski. Krakow-Warszawa, 1982, p. 53–64.

Piaskowski J., 1992 – Hutnictwo i odlewnictwo // Z dziejow techniki w dawnej Polsce, pod red. Bolesława Orłowskiego. Warszawa, 1992, p. 17–135.

Pleiner R., 2004 – Problems with ancient smithing slag // Acta Metallurgica Slovaca. 2004, 10, p. 664–667.

Scott B.G., 1990 – Early irish ironworking. Ulster Museum, 1990.

Serneels V., Perret S., 2003 – Quantification of smithing activities based on the investigation of slag and other material remains // Proceedings of the International Conference “Archaeometallurgy in Europe”, Milano, 24–26 September 2003. Milano: Associazione Italiana di Metallurgia, 2003. Vol. 1, p. 469–478.

Sperl G., 1980 – Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhütenschlacken. Wien, 1980.

Stankus J., 1978 – Juodoji metalurgija // Lietuvių materialinė kultūra IX–XIII amžiuje. Vilnius, 1978. T. 1, p. 73–88.

Stankus J., 2001 – Geležies gamybos Lietuvoje apžvalga // Lietuvos archeologija, 2001. T. 21, p. 171–182.

Thomsen R., 1971 – Essestein und Ausheizschlacken aus Haithabu // Untersuchungen zur Technologie des Eisens. Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu. 1971, p. 100–109.

Tylecote R. F., 1987 – The early history of metalurgy in Europe. London and New York, 1987.

Valatka V., 1960š – Paplinijo gyvenvietė (archeologinių kasinėjimų 1959–1960 m. ataskaita). LIIR. F. 1, Nr. 91.

Valatka V., 1962š – Prie Plinijos piliakalnio (Telšių r., Žarėnų apyl.) šiaurinės pusės gyvenvietės 1959–1962 m. tyrinėjimų dienoraščiai. LIIR. F. 1, Nr. 1696.

Valatka V., 2004 – Žemaičių žemės tyrinėjimai. Rašytinis palikimas Žemaičių muziejuje „Alka“. Knyga I. Archeologija. Vilnius, 2004.

Станкус Й., 1985 – Исследование производства железа и кузнечного дела в Литве // Новое в археологии Прибалтики и соседних территорий. Таллин, 1985, с. 131–139.

Торопов Н. А., Барзаковский В. П., Лапин В. В., Курцева Н. Н., Бойкова А. И. 1972 – Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Тройные системы. Ленинград, 1972.

Эндзинас А., 1973 – Древнее производство железа на территории Литвы // Acta Baltico-Slavica, 1973. T. 8, с. 21–52.

INVESTIGATION OF THE IRON METALLURGICAL SLAG FROM THE PAPLIENIJA HILL-FORT FOOT SETTLEMENT

Aušra Selskienė

Summary

The results of a study of the chemical and phase composition as well as microstructure of iron metallurgical slags of the 3rd–5th century AD from the Paplienija hill-fort foot settlement are presented in this paper. The data obtained in this work are analysed from the technological aspects of iron smelting and smithing processes.

The type of the slags of iron smelting (tap slags and furnace bottom slags) and smithing (“plano-convex bottoms”) has been determined by comparison of the data obtained with those obtained by other authors. Iron oxide (~59–68%) and silicon oxide (~13–28%) are predominant in all the slags. The smelting slags additionally contain some calcium oxide (3.8–6.2%) and phosphorus oxide (3.0–7.4%), also an insignificant quantity of manganese oxide (0.2–1%). However, in smithing slags lower concentrations of the mentioned compounds were detected: 0.9–1.4%; 0.9–1.6%; 0.03–0.08% of calcium, phosphorus and manganese oxides, respectively. The investigation of the phase composition and microstructure demonstrates that the main phases of almost all the slags are fayalite and wustite. Tap slags additionally contain glass phase, furnace bottom slags have calcium-iron phosphate, a partially reduced bog ore, and charcoal, the smithing slags additionally contain leucite, glass phase, quartz, metallic iron, corrosion products, and charcoal. The microstructure of tap slag is homogeneous, however it slightly becomes finer towards the margins of the trickles, whereas the amounts of phases and their distribution are more varied in the furnace bottom slags and especially in the smithing ones.

The remains of smelting furnaces discovered in trenches 4 and 7, as well as the composition and morphology of the smelting slags, show that the slag-tapping shaft furnaces were used in this place. The composition of smelting slags demonstrates that the temperatures of 1250–1270°C could be reached in these furnaces. A comparatively high quantity of phosphorus in

the smelting slags means that the iron in the Paplienija settlement was produced from an ore rich in phosphorus, as well that the metallurgists succeeded to hold phosphorus in slags in ancient times. The identified smithing slags allow justifying the assumptions of the other authors that the oven found in trench 1 can be related to the iron working process and it is fully believable that it is the extant smithing hearth.

THE LIST OF ILLUSTRATIONS

Fig. 1. Scheme of the iron smelting in a slag-tapping shaft furnace.

Fig. 2. Scheme of the smithing hearth.

Fig. 3. Samples of the investigated slags: a) a general view of slag T1; b) a break of slag D2; c) a general view of slag K2; d) a cross break of slag K2 and sample spots (A and B) taken for investigation of the microstructure.

Fig. 4. Chemical composition of various kinds of slags (tap slag, furnace bottom slag and smithing slag) from the Paplienija hill-fort foot settlement and from the other places in Lithuania and abroad (see Table 2).

Fig. 5. Microstructure of two distinct trickles of slag T1 (a and b). Fa – fayalite, Fa II – secondary fayalite, St – glass phase, Wu – wustite.

Fig. 6. Microstructure of slag D2 in the different points of the sample (a and b). Fa – fayalite, Lc – leucite, P – calcium-iron phosphate, Wu – wustite.

Fig. 7. Microstructure of slag K2 in the different points of the sample (a–h). Fa – fayalite, Fa II – secondary fayalite, Fe – metallic iron, KP – corrosion products, Lc – leucite, St – glass phase, Q – quartz, Wu – wustite.

Fig. 8. Comparison of the composition of bog ore (R) from Telšiai dist. and of different kinds of slags (T, D, K) from the Paplienija hill-fort foot settlement.

Fig. 9. Composition of slags from the Paplienija hill-fort foot settlement in the phase diagram of the system CaO-FeO-SiO_2 .