

MARVELĖS KAPINYNŲ GELEŽIES DIRBINIŲ METALOGRAFINIAI, MECHANINIŲ SAVYBIŲ IR ELEMENTINĖS SUDĖTIES TYRIMAI

MINDAUGAS BERTAŠIUS, JONAS NAVASAITIS, AUŠRA SELSKIENĖ,
GINTAUTAS ŽALDARYS

Straipsnyje pateikiami Marvelės kapinyno geležies dirbinių metalografinių, mechaninių savybių ir elementinės sudėties tyrimų rezultatai. Tyrimams naudoti 2006 metais iširtų III–V a. griautinių kapų radiniai: kirviai (3), ietigaliai (4), peiliai (2) ir sagtis bei metalurginiai šlakai, gargažės ir geležies koncentracijos iš kapų aplinkos. Tyrimams taikyta įprasta metodika, tad jų rezultatai gali būti lyginami su kitų vietų duomenimis. Metalografinių tyrimų metu nustatyta, kad gaminant buvo gaunamos skirtingo kietumo dirbinio dalys. Kirviai gaminti iš dviejų atskirų geležies ruošinių, ietigaliai ir peiliai – iš vientisų. Elementinė dirbinių sudėtis yra panaši į kitų Lietuvos archeologinių vietų, tačiau egzistavo ir kai kurie skirtumai, kurie perša mintį apie nevietinę tokių dirbinių kilmę.

Reikšminiai žodžiai: Marvelės dirbiniai, kalviškoji geležis, mikrostruktūra, elementinė sudėtis.

The article presents the results of a metallographic, mechanical properties, and elemental analysis of iron artefacts from Marvelė cemetery. Finds from 3rd–5th-century inhumations excavated in 2006: axes (3 examples), spearheads (4), knives (2), and a buckle as well as metallurgical slag, clinkers, and iron droplets found in the vicinity were used for the analysis. Ordinary methodology was used for the analysis, thus the results are comparable with those from other sites. The metallographic analysis determined that a varying hardness was achieved in manufacturing the different parts of the artefacts. The axes were forged from two separate pieces of iron, the spearheads and knives from one. The chemical composition of the artefacts is similar to that of artefacts from other Lithuanian archaeological sites; nevertheless some differences exist, which presupposes the idea of the non-local origin of some artefacts.

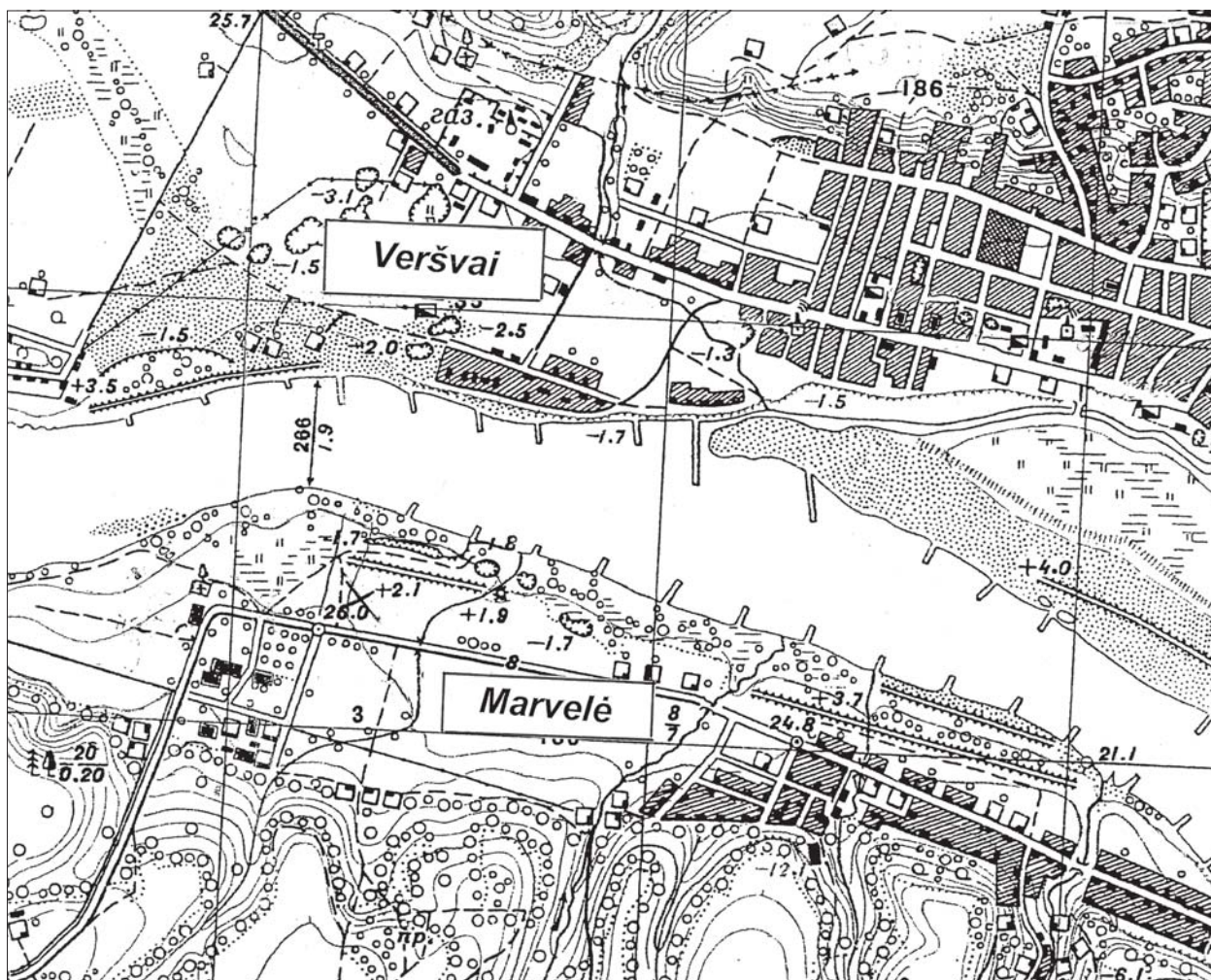
Keywords: Marvelė artefacts, bloomery iron, microstructure, elemental composition.

IVADAS

Nuo II a. po Kr. Kauno apylinkės išsiskiria savitais archeologiniais paminklais. Tai plokštinių kapinynų grupė (Tautavičius, 1996, 58). Paminklai gana intensyviai tyrinėti 1938–1941 m.: Veršvų, Grauzių, Sargėnų, Ruseinių, Pakapių kapinynai. Vėliau tyrinėta dar keletas šio regiono kapinynų – Seredžius, Mikytai, Kejėnai, Kriemalos kapinyno likučiai. Tyrimų medžiagą labai papildė didelių Pakalniškių, Nendrinų bei Masteikių kapinynų tyrimai. Tačiau ypač daug medžiagos

gauta 1991 m. pradėjus tyrinėti Marvelės kapinyną Kaune.

Marvelės kapinynas yra vakarinėje Kauno miesto dalyje, prie senojo kelio į Šakius, Nemuno slėnyje (1 pav.). 1991–2007 m. visiškai iširta kapinyno teritorija apima 28 100 m² (Bertašius, 2009, 105). Marvelės kapinynas su beveik 1530 kapų, datuojamų nuo II a. pab. iki XII a., ir beveik 250 žirgų kapų teikia svarbios medžiagos, leidžiančios argumentuotai spręsti apie baltų genčių kilmę. Ja remiantis turime galimybę tyrinėti čia gyvenusios bendruomenės materialinę kultūrą, gyvenamosios



1 pav. Marvelės ir Veršvų kapinynai Nemuno slėnyje XX a. 6 dešimtmčio žemėlapyje. Šiuo metu Marvelės kapinynas iš dalies užstatytas Kauno miesto nuotekų valymo įrenginiais.

bruožus, elgesio formas, socialines praktikas, tradicijas, papročius bei atsekti jų tęstinumą ir kaitą daugiau nei per tūkstantmetį.

Savitos Vidurio Lietuvos kultūrinės grupės kilmė iki šiol lieka neaiški. Aiškūs ir pastovūs laidojimo papročio bruožai susiformavo dar romėniškuoju laikotarpiu (fazė B, I–II a. po Kr.). Kapinynai sutelkti palyginti nedidelėje teritorijoje, patogioje geografinėje erdvėje – Nemuno ir Neris santakos rajone. Visai netoli į Nemuną įteka Nevėžis ir Dubysa. Šioje nedidelėje teritorijoje su-

eina visi pagrindiniai Lietuvos vandens keliai. Marvelės kapinyno tyrimo rezultatų reikšmė yra labai svarbi – jis patikimai reprezentuoja kultūrinės kaitos klausimus nuo romėniškojo iki vikingų laikotarpio.

Straipsnyje pristatomi Marvelės kapinyno geležies dirbinių metalografiniai, mechaninių savybių ir elementinės sudėties tyrimai, atlikti Kauno technologijos universiteto Gamybos technologijų katedroje ir Chemijos institute. Tokio pobūdžio tyrimų Lietuvos archeologinės medžiagos tyrimų

praktikoje nėra daug. Nors jie atliekami nuo šeštojo dešimtmečio pabaigos, tačiau turimi rezultatai dar neleidžia daryti argumentuotų apibendrinimų ir palyginimų. Šios priežastys lėmė siekį ir pastangas sukaupti išsamesnę tokio pobūdžio duomenų bazę. Tyrimo tikslas buvo nustatyti radinių cheminę sudėtį, ištirti metalo sandarą, mechanines savybes, pateikti technologinį dirbinių vertinimą. Taip pat buvo siekiama nustatyti radinių gamybos vietą.

2003–2007 m. vykusių Marvelės kapinyno archeologinių tyrimų metu įvairių laikotarpių (romėniškojo, tautų kraustymosi bei vikingiškojo) kapų aplinkoje surinkta įvairios su geležies apdirbimu susijusios medžiagos. Daugiausia tai metalurginiai šlakai, gargažės bei geležies konkretijos. Šie antriniai geležies gamybos proceso artefaktai žadino viltį tyrimų metu atrasti ir daugiau geležies apdirbimo procesą nusakančios medžiagos. Nors kol kas tai nepavyko, šie radiniai kėlė autorių susidomėjimą, nes ryškėjo galimybė nustatyti dirbinių kilmės vietą, kompleksiskai palyginant vieno objekto medžiagą: kapų dirbinių ir kapų aplinkoje rastų šlakų bei konkretijų struktūras.

Buvo parinkta medžiaga, kuri atspindi tiek skirtingo laikotarpio kapus, tiek paplitimo kapinyne skirtumus bei skirtingas dirbinių funkcijas. Tyrimams naudoti dirbiniai chronologiškai apima periodą nuo II a. pab. iki V a. pr. Tai Vidurio Lietuvai būdingi ginklai bei buities dirbiniai – įmoviniai kirviai ir kelių tipų ietigaliai, skirtingų dydžių peiliai ir sagtis.

Tyrimams buvo panaudota šių kapų medžiaga (Bertašius, 2007š, 2008š):

Kapas 1357 (224 tyrimų plotas); griautinis 25–30 m. amžiaus moters karste kapas, ryški kapo duobė; įkapes sudaro (inv. 63–69) sudėtinis krūtinės papuošalas, juostinis žiedas, įvija, kirvis, ietigalis, peilis ir smeigtukas. Medžiaga datuojama III a. Tyrimams panaudotas **įmovinis kirvis**.

Kapas 1405 (255 plotas); griautinis 35–40 m.

amžiaus vyro kapas, ryški kapo duobė; įkapes sudaro (inv. 152–155) smeigtukas, kirvis, ietigalis, peilis. Medžiaga datuojama II–III a. sandūra. Tyrimams paimtas **įmovinis kirvis, įmovinis ietigalis** (artimas VI tipui, čia ir toliau tipai nurodomi pagal: Казакиявичюс, 1988, 22–55), **peilis lenkta įkote**.

Kapas 1410 (225A plotas); griautinis 35–45 m. amžiaus vyro kapas; įkapes sudaro (inv. 171–172) ietigalis ir peilis. Medžiaga datuojama apie III a. Tyrimams paimtas **įmovinis ietigalis** (IV tipo b variantas – IVB).

Kapas 1414 (253 plotas); griautinis per 20 m. amžiaus greičiausiai moters (?) kapas; įkapes sudaro (inv. 188–195) karolių vėrinys, lankinė segė, įvijinis žiedas, kovos peilis, kirvis, ietigalis, sagtis, antskydis. Medžiaga datuojama IV–V a. sandūra. Tyrimams paimtas **įmovinis kirvis ir įmovinis ietigalis** (I tipo d variantas – ID).

Kapas 1446 (240C plotas); griautinis 24–40 m. amžiaus greičiausiai vyro kapas, kapo duobė išsiskyrė ypatinga įranga – gausiais degėsiais ir perdegusiais suskaldytomis akmenimis; įkapes sudaro (inv. 284–285) sagtis ir nenustatyto dirbinio fragmentas, datuojami apie IV–V a. Tyrimams paimta **sagtis**.

Kapas 1468 (285A plotas); griautinis 25–40 m. amžiaus vyro kapas; įkapes sudaro (inv. 368–369) ietigalis ir peilis. Medžiaga datuojama III–IV a. Tyrimams paimtas **įmovinis ietigalis** (I tipo b variantas arba IV tipo A variantas – atitinkamai IB arba IVA) ir **peilis lenkta įkote**.

Taip pat tyrimams paimti 6 metalurginio šlako pavyzdžiai, dvi redukuotos geležies konkretijos ir viena neaiškios sudėties gargažė. Visi jie rasti pietrytinėje kapinyno dalyje, 2005 ir 2006 metų tyrimų metu minėtų kapų aplinkoje. Kadangi jokių kitų geležies apdirbimo pėdsakų (lydymo krosnelių liekanų ar pan.) kapų aplinkoje nerasta, šie radiniai gali būti vandens srauto atnešti iš tolėliau. Tačiau akivaizdu, kad geležis buvo apdirbama netoliese, Nemuno slėnyje.

TYRIMŲ METODIKA

Dalis tiriamų bandinių (visi tiriami įmoviniai kirviai bei vienas ietigalis) buvo perpjauti išilgai, siekiant iš pjūvio gauti maksimalios informacijos apie dirbinių sandarą bei gamybos būdą, analizuojant jų mechaninę charakteristiką ir cheminę sudėtį. Kai kurių radinių buvo išpjauti papildomi smulkūs bandiniai, skirti detalesniems tyrimams. Radinių, kurie nebuvo pjaunami išilgai, buvo atliekami skerspjūviai (ietigaliai, peiliai, diržo sagtis). Tai įprasta tyrimų metodika tiek Lietuvoje, tiek kitur. Geležies dirbinių technologijai ir metalo struktūrai nustatyti metalografinį (makro- ir mikrošlifų analizavimo) metodą plačiai taikė J. Stankus (Stankus, 1978, 75–76). Žinomas lenkų tyrinėtojas J. Piaskowski tokiu metodu tyrinėjo įvairių laikotarpių dirbinius (Piaskowski, 1983 (1987), 102), latvių tyrinėtojas A. Anteins šiuo metodu tyrė baltiškuosius kirvius, ietigalius bei kt. (Anteins, 1976, 19, 39, 41). Net įvertinant naujų tyrimų galimybes šis metodas lieka pagrindinis ir taikomas tiriant įvairių periodų dirbinius (Biborski ir kt., 2002; Peets, 2003). Galima pažymėti, kad tyrinėjant tokią netolygios struktūros ir sudėties medžiagą kaip kalviškoji geležis ir jos dirbiniai, detalai ištirti ir argumentuotai pagrįsti medžiagos sudėtį kol kas tai labiausiai pasiteisinęs metodas. Jis leidžia gauti kokybiškus ir išsamius duomenis tiriant dirbinio sandarą, mikrostruktūrą ir savybes.

Metalografiniams tyrimams perpjautų bandinių paviršiai buvo šlifuojami mažėjančio smulkuo šlifavimo popieriumi ir poliruojami naudojant chromo oksido miltelių emulsiją arba deimantinę pastą. Mikrostruktūroms ryškinti naudotas 3% azoto rūgšties (HNO_3) tirpalas etilo alkoholyje. Mažo didinimo (makrotyrimai, padidinant nuo 6 iki 60 kartų) struktūros tyrimai buvo atlikti metalografiniu mikroskopu MBC-1. Didesnio didinimo mikrostruktūros tyrimai buvo atliekami metalografiniais mikroskopais Axio Scope, A1 (Carl Zeiss) ir Olympus BH-2.

Radinių mechaninėms savybėms įvertinti buvo atlikti jų kietumo ir mikrokietumo tyrimai. Kietumas nustatytas Rokvelo kietmačiu TK-2M, naudojant deimantinį kūgio formos indentorių. Mikrostruktūros dedamųjų fazių mikrokietumas buvo tiriamas mikrokietmačiu ПМТ-3У42. Kad būtų galima lengviau palyginti rezultatus, gauti duomenys buvo perskaičiuoti į Brinelio vienetus (HB).

Bandinių elementinė sudėtis nustatyta rentgenospektrinės mikroanalizės metodu, skleidžiamuoju elektroniniu mikroskopu (toliau SEM) EVO 50EP (Carl Zeiss SMT AG) su rentgeno spindulių banginės dispersijos spektrometru (Oxford Instruments). Matavimų sąlygos: greitinanti įtampa 20 kV, elektronų pluoštelio srovė 500 nA.

Šlako bandiniai buvo sutrinti ir iš jų presavimo būdu suformuotos 8 mm skersmens ir 1 mm storio tabletės. Kiekviename bandinyje elementų koncentracija matuota trijuose 100x200 mm dydžio ploteliuose (elektronų pluoštelio srovė 40 nA). Darbe pateikiami šių matavimų vidurkiai.

ŽYMĖJIMAI IR PAAIŠKINIMAI

F – feritas, techniškai švari geležis.

Pe – perlitas, ferito ir cementito mechaninis mišinys, turintis 0,8% anglies.

Cementitas – geležies ir anglies cheminis junginys Fe_3C .

Sorbitas – geležies ir anglies lydinių struktūrinė dedamoji, kuri sudaryta iš cementito ir ferito mechaninio mišinio, susidariusio alotropinio virsmo metu iš austenito, metalą aušinant tam tikru greičiu. Skirtumas tarp perlito ir sorbito tas, kad sorbitas yra daug dispersiškesnis mišinys, dėl to kietesnis ir atsparesnis dilimui.

Trostitas – geležies ir anglies lydinių struktūrinė dedamoji, sudaryta iš ferito ir cementito dispersinio mišinio, susidarančio grūdinimo metu. Nuo ferito ir perlito skiriasi smulkesne sandara ir didesniu kietumu.

Matrica (mikrostruktūroje) – lydinio pagrindas arba pagrindinė lydinio fazė.

GELEŽIES KONKRECIJOS IR METALURGINIAI ŠLAKAI

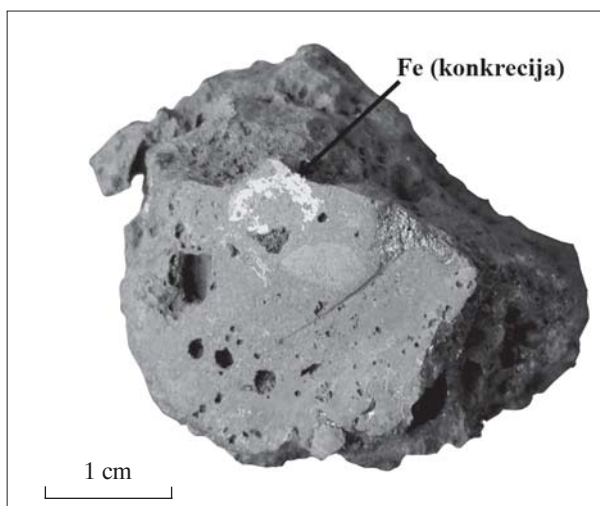
Geležies konkretijos – tai redukuotos (atgavintos) geležies trupinėliai, nepakliuvę į kritę ir likę lydymo šlake. Šlako susidarymas buvo neišvengiamas procesas lydant geležį rudnelėse. Šlakte susijungia bergždžioji rūdos uoliena, kuro pelenai ir kitos specialiai pridamos ar atsitiktinės priemaišos. Rudnelių šlakuose aptinkamos konkretijos būna įvairaus dydžio: nuo mažų pavienių trupinėlių iki kelių dešimčių gramų masės gabalėlių. Geležies konkretijų sudėties analizės ir metalografiniai tyrimai duoda labai vertingos informacijos apie rudnelėje išlydytos geležies elementinę sudėtį, jos įanglinimą ir struktūrinę sandarą. Taip pat žinant ir lydymo šlako sudėtį, galima patikimai spręsti apie naudotą rūdą bei technologinius lydymo procesus. Svarbu pažymėti, kad kai kurie geležies rūdoje esantys elementai – varis (Cu), nikelis (Ni), kobaltas (Co), arsenas (As), fosforas (P) rudnelėse palyginti lengvai redukuojami iš oksidų ir patenka į išlydytą geležį. Jie išlieka ir pagamintuose šios geležies dirbiniuose. Todėl konkretijų sudėties analizės gali vaidinti labai svarbų vaidmenį tiriant geležies dirbinių kilmę ir jų gamybos technologiją.

Tarp Marvelės archeologinių gargažių buvo aptikti du magnetui jautrūs lydymo šlako fragmentai, kurie ir buvo paimti tyrimams. Jų pjūviuose išryškėjo geležies konkretijos (2 pav.).

Buvo paruošti ir ištirti šie bandiniai:

- 1) Bandinys – Marvelė 20070717/2 (šlifas Nr. 150).
- 2) Bandinys – Marvelė 20070717/4 (šlifai Nr. 152 ir 153).

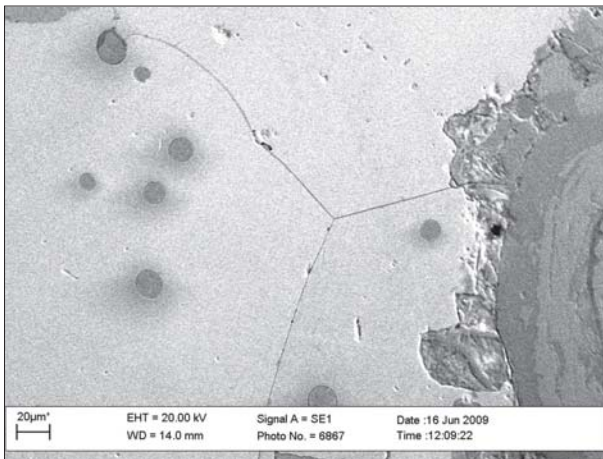
Geležies konkretijų elementinė sudėtis yra pateikta 1 lentelėje. Geležies kiekis metalinėje konkretijų matricoje (99,51–99,83% Fe) rodo palyginti didelį geležies grynumą. Konkrecijose aptikta labai mažai vario (tik pėdsakai) ir nikelio (nuo 0 iki 0,011%), taip pat labai mažai sieros (vid. 0,005%). Kur kas daugiau rasta kobalto (vid. 0,164%) ir arseno (vid. 0,123%). Nedaug paste-



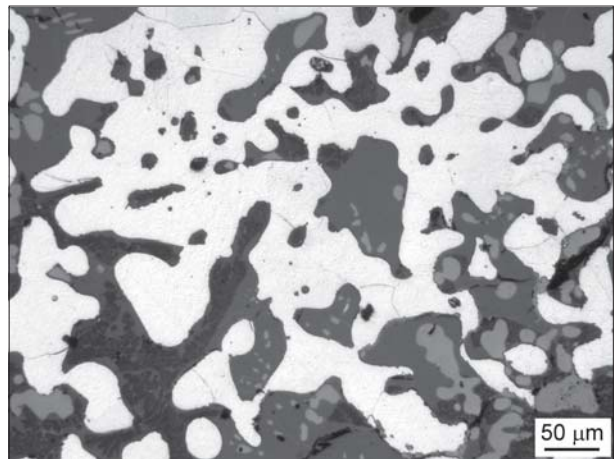
2 pav. Lydymo šlakas su geležies konkretija (bandinys Nr. 20070717/4, poliruotas, neryškintas). *A. Selskienės nuotr.*

bėta ir fosforo (šlifuose 150 ir 152 jo aptikta tikrai vid. 0,008%), tačiau šliffe 153 didžiausias fosforo kiekis siekė 0,455%. Tai rodo, kad Marvelės vietovėje geležis buvo lydoma ir iš palyginti fosforingos rūdos. Verta paminėti, kad šių elementų (Cu, Ni, Co, As, P, S) koncentracijos yra panašios ir daugelyje kitų Lietuvos teritorijoje aptiktų geležies konkretijų, nors elementų tarpusavio santykis atskirose konkretijose būna skirtingas. Metalografiniai tyrimai parodė, kad konkretijose vyrauja neįanglinta geležis, kurios mikrostruktūroje matomi stambūs ferito grūdėliai (3 pav.). Tačiau yra ir įanglintų konkretijos vietų, kurios susideda iš ferito ir perlito grūdėlių (4 pav.). Taip pat pastebėta vietų, kuriose redukuotos geležies grūdėliai yra susimaišę su lydymo šlaku (5 pav.).

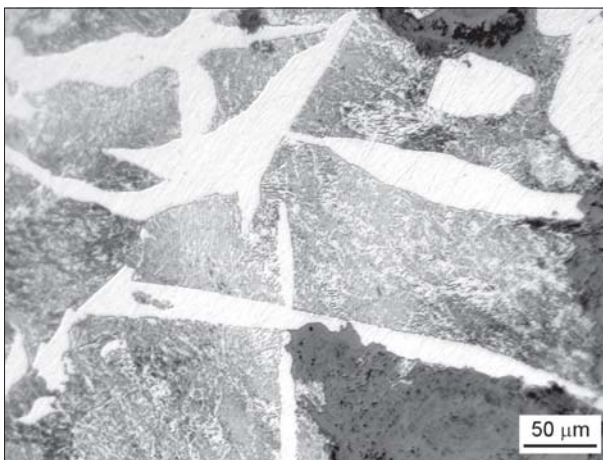
Metalurginiai šlakai. Marvelės metalurginio šlako radiniai rodo, kad šioje vietovėje buvo lydoma ir apdorojama geležis. Tyrimams vizualiai buvo atrinkti penki lydymo šlako pavyzdžiai (bandiniai Nr. 20070717/1, 2, 3, 7 ir Nr. 20081210/1), vienas kalviškojo žaizdro šlako gabalėlis (bandinys Nr. 20070717/6) ir viena neaiškios kilmės gargažė (bandinys Nr. 20070717/8). Buvo atlikti visų šių bandinių cheminės sudėties tyrimai. Bandinių analizių numeriai buvo:



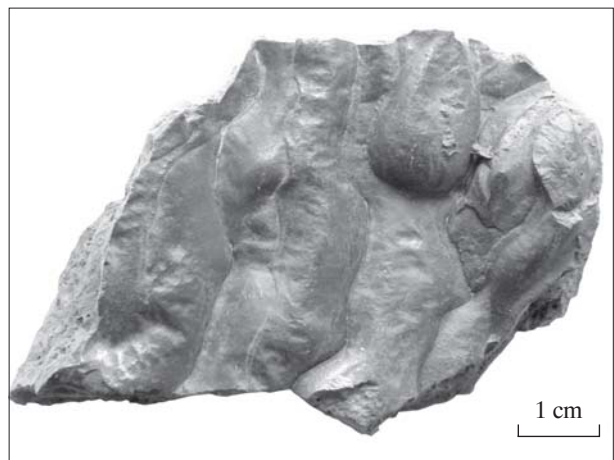
3 pav. Geležies konkracijos (bandinio Nr. 20070717/4; šlifas 153) mikrostruktūra: ferito grūdėliai (šviesūs) ir lydymo šlakas (pilkas). SEM, bandinys ryškintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*



5 pav. Geležies konkracijos (bandinio Nr. 20070717/4; šlifas 152) mikrostruktūra: redukuotos geležies grūdėliai (šviesūs) susimaišę su lydymo šlaku. Optinis mikroskopas, bandinys ryškintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*



4 pav. Geležies konkracijos (bandinio Nr. 20070717/2; šlifas 150) mikrostruktūra: ferito grūdėliai (šviesūs), perlitas (šviesiai pilkas) ir šlakas (tamsus). Optinis mikroskopas, bandinys ryškintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*



6 pav. Marvelė. Tekus lydymo šlakas. Bandinys Nr. 20081210/2. *A. Selskienės nuotr.*

– lydymo šlako bandinių Nr. 20070717/1, 2, 3, 7 – atitinkamai analizės Nr. 298, 299, 300, 302 ir bandinio Nr. 20081210/1 – Nr. 304,

– kalviškojo žaizdro šlako bandinio Nr. 20070717/6 – Nr. 301.

Tirtųjų lydymo šlako fragmentų išvaizda yra būdinga rudnelių tekiesiems šlakams, nes jų paviršiuje aiškiai matomos sustingusio šlako srovės (6 pav.).

Metalurginių šlakų cheminės analizės duomenys pateikti 2 lentelėje. Marvelės lydymo šlakų analizė rodo, kad jų cheminė sudėtis yra būdinga tiesioginės geležies gavybos šlakams. Tokie šlakai susidarydavo rudnelėse lydant geležį iš balų ar kitokios rūdos. Palyginti su dauguma Lietuvos teritorijoje rastų ir ištirtų šlakų, Marvelės šlakuose yra aptiktas kur kas didesnis mangano (Mn) kiekis (Navasaitis ir kt., 1999). Matyt, šioje vietovėje ar apylinkėse būta balų rūdos, turinčios daugiau mangano mineralų.

1 lentelė. Marvelės geležies konkretijų Nr. 20070717/2 (šlifas 150) ir Nr. 20070717/4 (šlifai 152, 153) elementinė sudėtis, %

Elementai	Band. 20070717/2		Band. 20070717/4		Vidurkis	Elementų ribos konkretijų geležyje (vid.)
	Šlifas 150		Šlifas 152 Ferite (vid.)	Šlifas 153 Ferite (vid.)		
	Ferite (vid.)	Perlite (vid.)				
Fe	99,55	99,61	99,83	99,51	99,63	99,51–99,83
Co	0,169	0,169	0,165	0,154	0,164	0,149–0,174
Cu	–	Pėds.	–	0,001	Pėds.	Pėds.
Ni	0,005	0,006	Pėds.	0,002	0,003	0–0,011
As	0,271	0,179	0,005	0,036	0,123	0,005–0,486
P	0,008	0,007	0,003	0,295	0,078	0,002–0,455
S	0,002	0,003	0,012	0,003	0,005	0–0,016
Mn	–	–	0,015	–	–	0–0,037
Σ	100,005	99,974	100,015	100,001	100,003	–

2 lentelė. Marvelės metalurginių šlakų cheminė sudėtis, %

Analizių Nr. Sudėtis	Tekūs lydymo šlakai			Šlakai, turintys geležies konkretijų*		Kalviškasis šlakas
	298	302	304	299	300	
FeO	52,96	64,39	66,87	67,71	65,87	59,08
SiO ₂	25,62	16,33	18,92	18,75	19,65	16,13
Al ₂ O ₃	2,64	1,59	3,28	2,06	1,25	1,24
CaO	3,72	3,09	2,38	2,43	1,55	1,11
MgO	0,75	0,46	0,25	0,56	0,88	0,59
MnO	6,92	10,58	1,01	4,97	6,14	13,49
P ₂ O ₅	1,71	0,91	5,34	1,18	0,80	0,51
K ₂ O	0,76	0,48	1,11	0,58	0,25	0,27
Na ₂ O	0,23	0,19	0,23	0,16	0,06	0,06
TiO ₂	0,13	0,07	0,16	0,08	0,04	–
BaO	0,46	0,79	0,21	0,28	0,14	0,43
S	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02
Co	0,05	0,06	–	0,06	0,06	0,06
Ni	Pėds.	0,01	–	–	Pėds.	Pėds.
Cu	–	–	–	–	Pėds.	–
As	–	–	–	–	–	–
Σ	96,13	98,95	99,79	98,85	96,76	93,04

* Tyrimams parinkta šlako vieta be redukuotos geležies.

Tikėtinas kalviškojo žaizdro šlako fragmentas (analizės Nr. 301) savo išvaizda yra panašus į kalviškuosius, tačiau jo sudėtis yra artima lydymo šlakams, todėl negalime tvirtai teigti, kad tai kalviškojo žaizdro šlakas.

Marvelės gargažė. Tarp Marvelėje atkastų geležies metalurginio šlako radinių buvo viena gargažė, kuri skyrėsi nuo kitų savo spalva ir išvaizda.

Jos paviršiuje buvo matomas žvirgždas ir organinių medžiagų įspaudai. Gargažė buvo paimta cheminės sudėties tyrimams (suteiktas Nr. 20070717/8, analizės Nr. 303). Cheminė jos sudėtis pateikta 3 lentelėje. Analizės duomenys byloja, kad gargažės cheminė sudėtis yra artima geležies lydymo krosnelių ar kalviškųjų žaizdrų, pagamintų iš smėlio ir molio mišinių, sudėčiai. Tikėtina, kad tai

3 lentelė. Gargažės Nr. 20070717/8 (analizės Nr. 303) cheminė sudėtis, %

Sudėtis	Gargažė Nr. 20070717/8	Virbaliūnų rudnelės sienelė (pagal Navasaitis, Selskienė, 2007, 388)	Merkinės rudnios sienelė *
FeO	13,06	Fe ₂ O ₃ 6,12	Fe 5,48
SiO ₂	60,75	74,27	72,52
Al ₂ O ₃	8,72	10,98	8,16
CaO	6,52	1,06	6,70
MgO	3,76	1,48	1,96
MnO	0,82	0,11	0,17
P ₂ O ₅	0,38	0,45	0,72
K ₂ O	2,38	3,88	–
Na ₂ O	0,20	0,61	0,92
TiO ₂	0,54	0,56	0,28
BaO	0,08	0,18	0,07
S	0,01	–	–
Co	0,02	–	–
Σ	97,24	99,69	96,98 (99,32)

* Atsitiktinis J. Navasaičio radinys, asmeninis autoriaus archyvas.

išlikusi rudnelės statybai skirta medžiaga. Svarbu paminėti, kad į rudnelių sienelių mišinius būdavo primaišoma šiaudų arba stambios žolės. Taigi jų pėdsakai galėjo išlikti gargažės paviršiuje. Palyginimui lentelėje pateikiamos Virbaliūnų rudnelės ir Merkinės rudnios sienelių sudėtys.

ĮMOVINIAI KIRVIAI

Kirvis 1405-K. Kirvio masė – 589 g, išorė buvo pasidengusi storu rūdžių sluoksniu. Įmovoje prie vidinių sienelių buvo išlikusių suakmenėjusios medienos liekanų. Bendras kirvio vaizdas parodytas 7 pav. Tyrimams paruošti bandiniai: išilginis pjūvis Nr. 1405-K/1, ašmenų bandinys 1405-K/2 ir įmovo bandinys 1405-K/3.

Kirvio išilginiame pjūvyje (1405-K/1) galima įžiūrėti unikalią jo sandarą: centrinę kirvio dalį gaubia trijų keturių milimetrų storio (vietomis sustorėjantis iki penkių šešių milimetrų) išorinis sluoksnis, kuris viršuje baigiasi kirvio įmova. Išorinis sluoksnis kalviškuoju būdu yra privirintas prie centrinės dalies. Suvirinimo siūlė labai koky-

biška, tikrai ties įmova yra likęs 15–25 mm ilgio tarpelis, užsipildęs šlaku. Ašmenų link išorinis sluoksnis laipsniškai plonėja ir baigiasi maždaug 15 mm nepasiekęs smaigalio. Tačiau nežinia, kiek ašmenys yra sutrumpėję dėl korozijos.

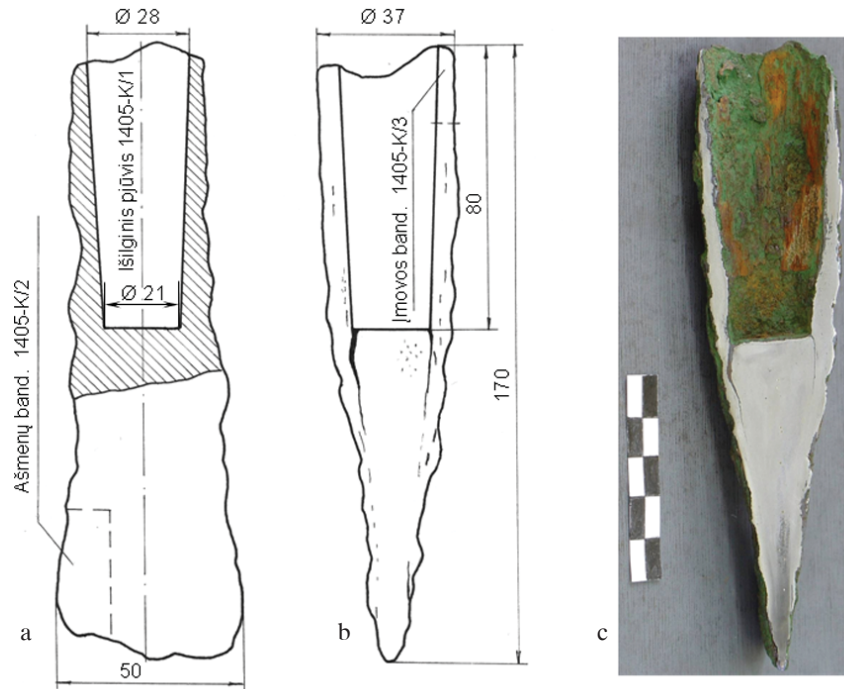
Metalografinis tyrimas parodė, kad centrinėje kirvio dalyje geležis yra žymiai daugiau įanglinta nei išoriniame sluoksnyje. Nors geležies įanglinimas labai netolygus, tačiau aiškiai matomas anglingumo didėjimas einant nuo įmovo ašmenų link (7:c, 8:a pav.). Maždaug 30–35 mm gylyje nuo smaigalio anglies kiekis geležyje pasiekia 0,8%. Tokio anglingumo plienas gerai grūdinamas, o tuo pasinaudojo kirvį gaminęs meistras. Ašmenų struktūra yra sorbitinė (kietumas siekia apie HB 318), liudijanti, kad kirvis buvo grūdin-tas. Kirvio kietumo matavimų rezultatai pateikti 4 lentelėje, o kietumo kitimas ašmenyse parodytas grafike (8:b pav.). Centrinės kirvio dalies, esančios arčiau įmovo, taip pat ir išorinio sluoksnio anglingumas svyruoja maždaug nuo 0 iki 0,4–0,5% C. Mikrostruktūrą šiose vietose sudaro feritas ir perlitas. Ašmenų sandaros schema ir jų mikro-

struktūra (apie 25 mm nuo smaigalio) parodyta 9 ir 10 paveiksluose. Kirvio metalinėje matricoje yra metalurginio šlako intarpėlių (11 pav.), kurie neišvengiami kalviškojoje geležyje. Tačiau jų yra nedaug ir kirvio mechaninių savybių nemenkina. Geležies įanglinimas įmovos dalyje (bandinys 1405-K/3) labai įvairus. Anglies kiekis čia svyruoja maždaug nuo 0,05 iki 0,7%, kartu kinta ferito ir perlito santykis struktūroje. Įmovoje yra palyginti daug šlako intarpėlių ir tuštumėlių. Matyt, įmovos metalo kokybei buvo skiriama mažiau dėmesio.

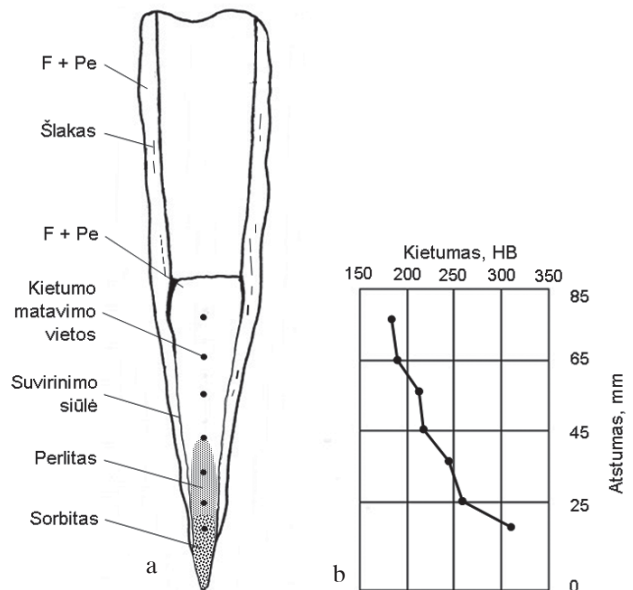
Kirvio elementinės sudėties tyrimų rezultatai rodo (5 lent.), kad ašmenyse, ir centrinėje dalyje, ir kraštuose, yra aptikta labai mažai vario ir nikelio. Vidutinė vario koncentracija sudaro 0,006% Cu, svyruoja nuo 0 iki 0,023%. Vidutinė nikelio koncentracija siekia 0,007% Ni, ribos – nuo 0 iki 0,025%. Tačiau kalviškojo suvirinimo siūlėse vario ir nikelio koncentracija pastebimai išauga: Cu iki 0,016–0,031%, Ni iki 0,053–0,079%. Taip pat labai mažai pastebėta ir sieros: 0–0,003% S. Kirvio centrinė dalis turi daugiau fosforo (0,061–0,184% P), palyginti su jo

4 lentelė. Kirvio 1405-K kietumo matavimų rezultatai

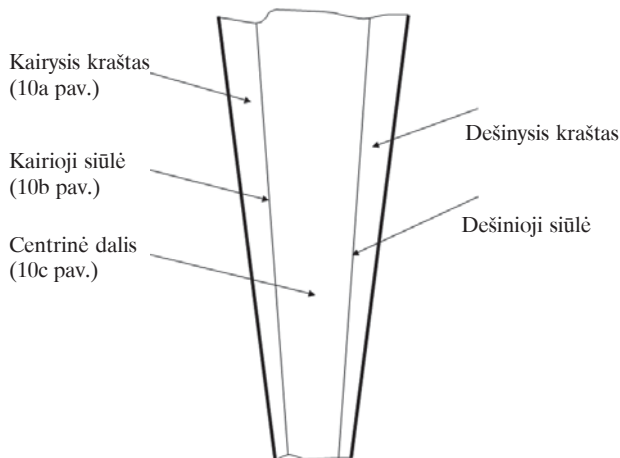
Atstumas nuo ašmenų	Kietumas, HRC	Kietumas, HB	Kietumas HV ₂₀₀ , MPa
10	–	318	3360
25	25	255	–
35	24	247	–
45	18	217	–
55	14	207	–
65	–	187	–
75	–	183	1920



7 pav. Kirvio 1405-K bendras vaizdas ir pjūvis: a – vaizdas iš plačiojo šono, b – išilginis pjūvis 1405-K/1 (nebrūkšniuotas), pjūvyje parodytas stambiuųjų šlako intarpų išsidėstymas, c – išilginio pjūvio vaizdas; paviršius poliruotas ir ęsdintas HNO₃ tirpalu. Išryškėjo įanglinta (iki 0,8%) ašmenų dalis (tamsesnė). *M. Bertašius nuotr.*



8 pav. Kirvio 1405-K mikrostruktūros schema ir ašmenų kietumo grafikas: a – mikrostruktūra ir kietumo matavimo vietos, b – ašmenų kietumo grafikas.

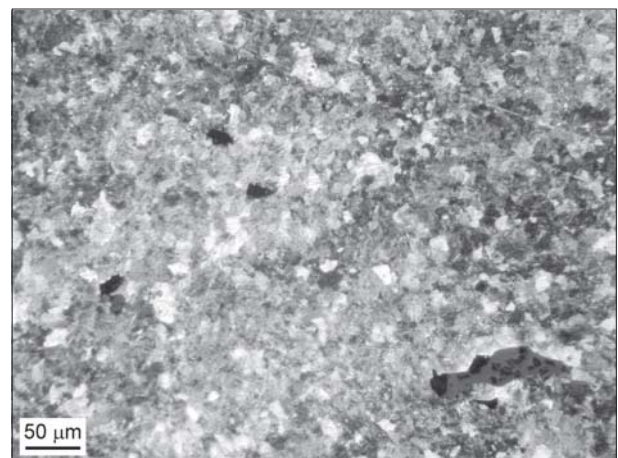
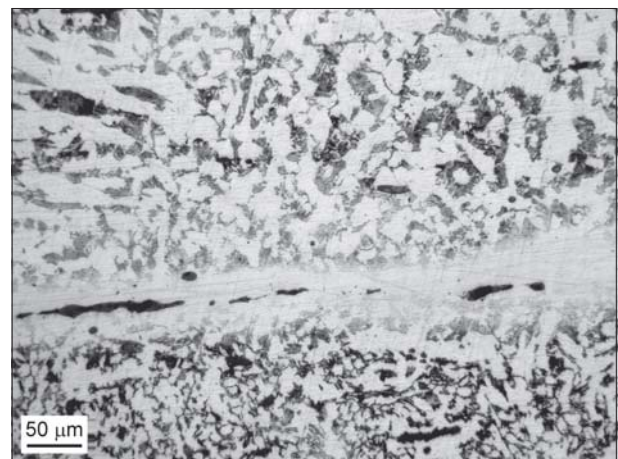
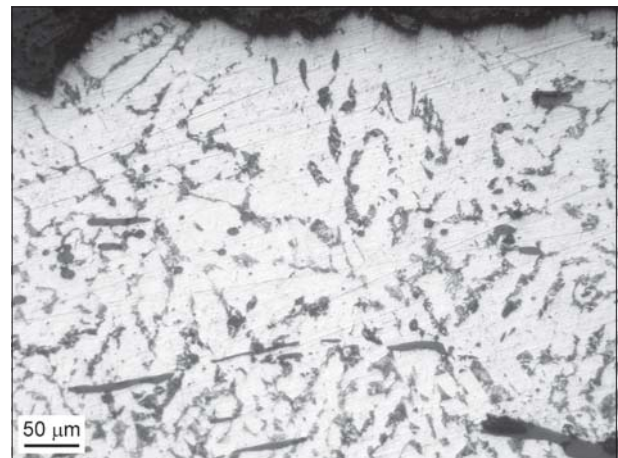


9 pav. Ašmenų bandinio 1405-K/2 schema (mikrostruktūros parodytos 10 paveiksle) a, b, c.

kraštais (0,003–0,009% P). Tai patvirtina mintį, kad ši kirvio dalis yra suformuota iš atskirai išlydyto, o gal rūpestingai atrinkto tinkamai įanglintos geležies gabalo. Kita vertus, įmovos bandinyje 1405-K/3 fosforo aptikta taip pat palyginti daug (apie 0,102%), bet, matyt, fosforo kiekis padidėja atsitiktinai dėl jo segregacijos.

Labai panašus kobalto (0,146–0,185% Co) ir arseno (apie 0,037–0,176% As) kiekis visose kirvio vietose (išskiriant suvirinimo siūles) leidžia manyti, kad geležis jo gamybai buvo išlydyta iš vieno rūdos šaltinio. Įdomu, kad kirvio centrinė dalis, palyginti su kraštais, yra labiau įanglinta (ašmenyse iki 0,7–0,8%) ir turi daugiau fosforo (0,061%–0,184%). Tikėtina, kad tokia geležis buvo išlydyta kiek aukštesnėje temperatūroje nei įprastai, nes kylant temperatūrai geležies įsianglinimo intensyvumas didėja, tačiau kartu padidėja redukuoto fosforo kiekis (jeigu jo yra rūdoje). Antra vertus, fosforo koncentracija, esanti kirvio 1405-K geležyje, nėra žalinga. Atvirkščiai, ribotas fosforo kiekis (maždaug iki 0,2%) didina geležies kietumą, nekeldamas trąpimo pavojaus.

Kirvis 1414-K. Kirvio masė – 886 g, išorė padengta rūdžių sluoksniu. Įmovoje yra kirvio koto liekanų. Bendras kirvio vaizdas parodytas 12 pav. Tyrimams paruošti bandiniai: išilginio pjūvio



10 pav. Kirvio 1405-K ašmenų mikrostruktūra: a – kirvio pakraštys: feritas (šviesus) su perlitu (pilkas), b – kalviškojo suvirinimo siūlė (šviesi, tamsūs – šlako intarpai), c – ašmenų centrinė dalis (sorbitas). Optinis mikroskopas, bandinys esantis HNO₃ tirpalu. A. Selskienės nuotr.



11 pav. Metalurginių šlakų intarpai kirvio 1405-K ašmenyse. Optinis mikroskopas, bandinys neryškintas. A. Selskienės nuotr.

331-363 (13 pav. ir 6 lent.). Kirvio įmovos ir išoriniai sluoksniai įanglinti daug mažiau ir netolygiai. Tarp išorinių sluoksnių ir centrinės ašmenų dalies matyti kalviškojo suvirinimo siūlė, tačiau suvirinta taip meistriškai, kad daugelyje vietų siūlė yra sunkiai pastebima, net ir tyrinėjant mikroskopu. Nepaisant gero, rūpestingo geležies iškalimo, metalinėje kirvio matricoje yra likę nemažai šlako intarpų. Stambesnieji intarpai matomi net makrostruktūroje (12:c ir 13:a pav.). Suvirinimo siūlių išsidėstymas ir metalinės matricos sudėtis rodo, kad centrinė kirvio dalis ir jį gaubiantis išorinis sluoksnis su įmova yra padaryti iš atskirų ruošinių.

5 lentelė. Kirvio 1405-K elementinė sudėtis, %

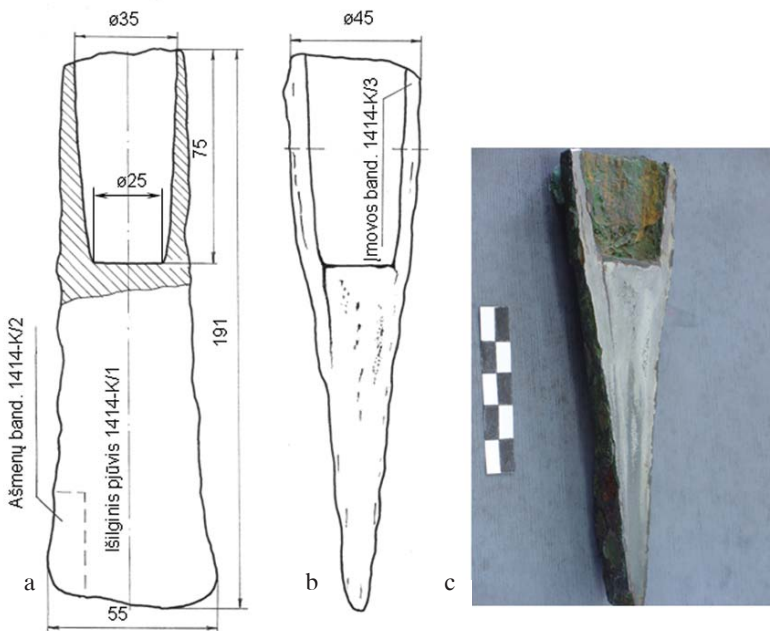
Elementas	Ašmenų bandinys 1405-K/2						Įmovos bandinys 1405-K/3		Suvirinimo siūlės	
	Išorinis sluoksnis, kairysis		Išorinis sluoksnis, dešinysis		Centrinė dalis		Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos
	Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos				
Fe	98,77	98,62–99,02	97,81	97,25–98,24	98,40	97,92–99,9	99,71	99,65–99,77	97,86	97,44–98,25
Co	0,183	0,181–0,185	0,165	0,163–0,171	0,173	0,168–0,177	0,155	0,146–0,166	0,205	0,194–0,214
Cu	–	–	0,004	0,003–0,004	0,002	0–0,005	0,001	0–0,002	0,020	0,016–0,031
Ni	0,003	0–0,007	0,005	0,002–0,009	0,003	0–0,015	0,001	0–0,002	0,065	0,053–0,079
As	0,150	0,104–0,176	0,071	0,046–0,087	0,127	0,106–0,150	0,037	0,012–0,071	0,596	0,466–0,661
P	0,009	0,005–0,012	0,008	0,003–0,011	0,102	0,061–0,184	0,102	0,072–0,123	0,018	0,005–0,034
Mn	–	–	–	–	0,013	0,009–0,018	–	–	–	–
S	0,002	0,001–0,002	–	–	0,002	0–0,003	–	–	–	–
Σ	99,12	–	98,06	–	98,82	–	100,01	–	98,76	–

1414-K/1, ašmenų bandinys 1414-K/2 ir įmovos bandinys 1414-K/3.

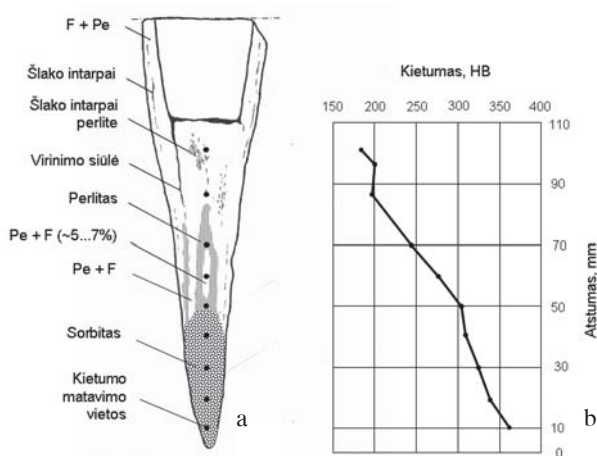
Kirvio išilginio pjūvio struktūra rodo, kad jo sandara yra analogiška kirviui 1405-K, t.y. centrinę kirvio dalį gaubia išorinis 4–5 mm storio sluoksnis, iš kurio suformuota ir įmova (12 pav.). Centrinės dalies mikrostruktūroje ryškiai matomas geležies įanglinimo netolygumas, turintis aiškia tendenciją didėti ašmenų smailiojo galo kryptimi. Ašmenyse apie 40–50 mm atstumu nuo smaigalio anglies koncentracija pasiekia 0,7–0,8%, todėl čia yra ištisinė perlitinė matrica, o gale matyti sorbitinė ir trostitinė struktūra, liudijanti, kad kirvio ašmenys buvo grūdinti. Tai patvirtina ir ašmenų kietumas, siekiantis HB

Skersiniame įmovos pjūvyje galima įžiūrėti kalviškojo suvirinimo siūlę. Dėl stipraus korozijos poveikio didelė siūlės dalis surūdijo, tačiau matyti, kad įmova buvo kalviškoju būdu patvariai suvirinta. Suvirinimo siūlės mikrostruktūra parodyta 14 pav.

Kirvio 1414-K elementinės sudėties rezultatai (7 lent.) rodo, kad jie yra pakankamai artimi kirvio 1405-K sudėčiai. Tiek vieno, tiek kito kirvio dauguma elementų kinta maždaug tose pačiose ribose, tačiau galima pastebėti, kad kirvyje 1414-K arseno yra pastebimai mažiau, o vario ir nikelio – nežymiai daugiau. Centrinėje kirvio dalyje aptikta šiek tiek mangano (vid. 0,016%). Elementinė kirvio 1414-K sudėtis yra artima Marvelės konkretų sudėčiai.



12 pav. Kirvio 1414-K bendras vaizdas ir pjūvis: a – vaizdas iš plokščiojo šono, b – išilginis pjūvis 1414-K/1 (nebrūkšniuotas), parodytas stambiųjų šlako interpų išsidėstymas, c – kirvio išilginio pjūvio nuotrauka. Pjūvio paviršius poliruotas ir ėsdintas HNO_3 tirpalu. Matyti įanglinta (iki 0,8 %) ašmenų dalis (tamsi). *M. Bertašiaus nuotr.*



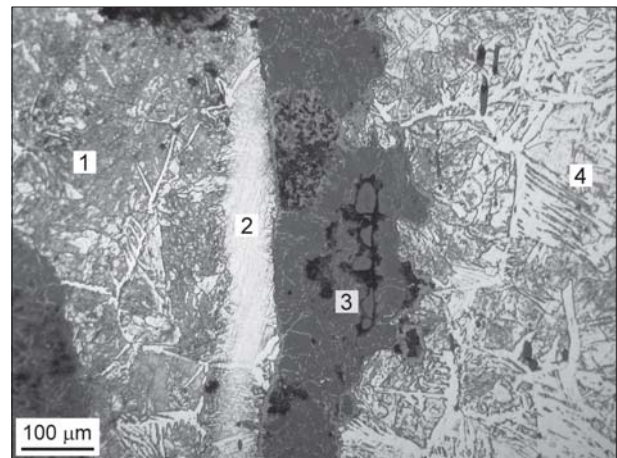
13 pav. Kirvio 1414-K mikrostruktūros schema ir ašmenų kietumo grafikas: a – mikrostruktūros schema ir kietumo matavimo vietas, b – ašmenų kietumo grafikas.

Kirvis 1357-K. Kirvio masė – 1045 g, jis stipriai paveiktas korozijos. Ruošiant bandinius tyrimams rūdys daugelyje vietų savaime nubyrėjo. Kirvio matmenys ir bendras vaizdas pateikti 15 pav. Paruošti bandiniai: išilginis pjūvis 1357-K/1, ašmenų bandinys 1357-K/2 ir įmovos bandinys 1357-K/3.

Kirvio išilginiame pjūvyje (15:b ir 16:a pav.) gerai matoma jo sandara, kuri yra analogiška kirviams 1405-K bei 1414-K. Nepaisant to, kad šis kirvis yra žymiai ilgesnis už pirmuosius du, jį taip pat sudaro centrinė dalis ir ją gaubiantis išorinis sluoksnis, kuris viršutinėje dalyje baigiasi įmova. Kirvio struktūros schema ir kietumas išilginiame pjūvyje 1357-K/1 parodyti 16 pav. Kaip ir kitų kirvių, jo kietumas išmatuotas Rokvelo (HRC) metodu. Matavimo duomenys HRC ir HB vienetais pateikti 8 lentelėje. Centrinė kirvio dalis įanglinta labai netolygiai, o tai būdinga kalviškosios geležies dirbiniams, tačiau ašmenų gale anglies koncentracija yra didžiausia ir siekia 0,7–0,8%. Ašmenų kietumas rodo, kad kirvis buvo grūdintas.

Ašmenų galo kietumas siekia HB 327-341 (16:b pav. ir 8 lent.).

Ašmenų bandinyje (1357-K/2) lengvai pastebimos kalviškojo suvirinimo siūlės (šviesios), jungiančios išorinį sluoksnį su centrine kirvio dalimi



14 pav. Kirvio įmovos skerspjūvio mikrostruktūra (bandinys 1414-K/3): 1 – vidinė įmovos dalis (perlitas ir feritas), 2 – suvirinimo siūlė, 3 – rūdys, 4 – išorinė įmovos dalis (feritas ir perlitas). Optinis mikroskopas, bandinys ėsdintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*

6 lentelė. Kirvio 1414-K kietumo matavimai

Atstumas nuo ašmenų, mm	Kietumas, HRC	Kietumas HV ₂₀₀ , MPa	Kietumas, HB
100	9	–	187
95	13	–	201
85	12	–	197
70	22	–	238
60	28	–	277
50	31	–	302
40	32	–	311
30	–	3201	321
20	–	3343	331
10	–	3846	363
Įmovos sienelėje	–	2484–2524	248–251

ištirta suvirinimo siūlių sudėtis. Apibendrinti kirvio elementinės sudėties duomenys pateikti 9 lentelėje. Šio kirvio sudėtyje nustatytas didžiausias mangano kiekis, centrinėje kirvio dalyje siekiantis vid. 0,053%. Mangano priemaišų į geležį galėjo patekti lydant palyginti daug mangano turinčią rūdą. Tačiau elementinės sudėties tyrimo rezultatai rodo, kad kirvio 1357-K elementinė sudėtis yra artima Marvelėje rastų geležies konkretijų sudėčiai. Tai duoda pagrindą daryti prielaidą, kad šis kirvis yra taip pat vietinės gamybos produktas.

Aptariant Marvelėje rastų kirvių tyrimo rezultatus būtina pažymėti, kad visų kirvių centrinėse dalyse yra aptiktas nedidelis mangano kiekis (kai

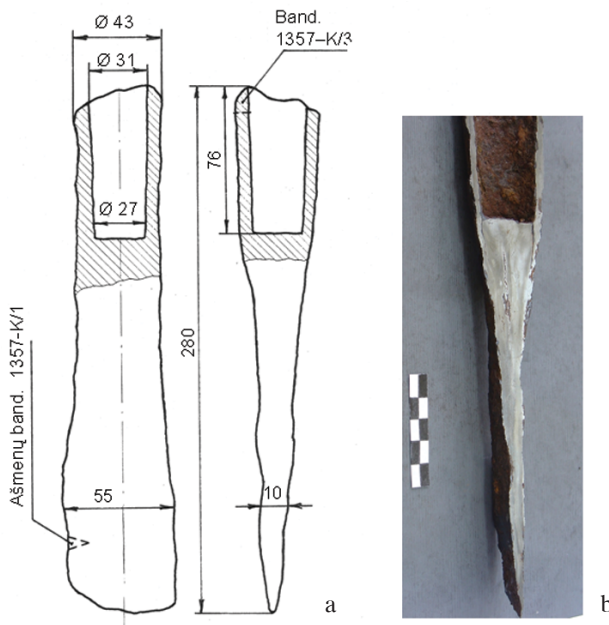
7 lentelė. Kirvio 1414-K elementinė sudėtis, %

Elementas	Ašmenų bandinys 1414-K/2						Įmovos bandinys 1414-K/3		Suvirinimo siūlės	
	Išorinis sluoksnis, kairysis		Išorinis sluoksnis, dešinysis		Centrinė dalis		Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos
	Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos				
Fe	98,70	98,55–98,85	98,26	97,74–98,55	98,45	96,28–100	99,61	99,37–99,78	98,54	97,04–99,28
Co	0,184	0,181–0,186	0,178	0,164–0,189	0,184	0,176–0,193	0,187	0,165–0,199	0,233	0,203–0,261
Cu	0,007	0,006–0,009	0,001	0–0,002	0,001	0–0,004	0,004	0–0,008	0,012	0,011–0,014
Ni	0,005	0,003–0,008	0,011	0–0,018	0,010	0–0,019	0,015	0,001–0,026	0,037	0,037–0,099
As	0,027	0,023–0,031	0,045	0,016–0,079	0,041	0,008–0,10	0,070	0,010–0,179	0,212	0,071–0,311
P	0,010	0,003–0,018	0,060	0,006–0,124	0,072	0,006–0,155	0,073	0,027–0,151	0,031	0,017–0,036
Mn	–				0,016	0,008–0,027				
Σ	98,93		98,56		98,87		99,96		99,1	

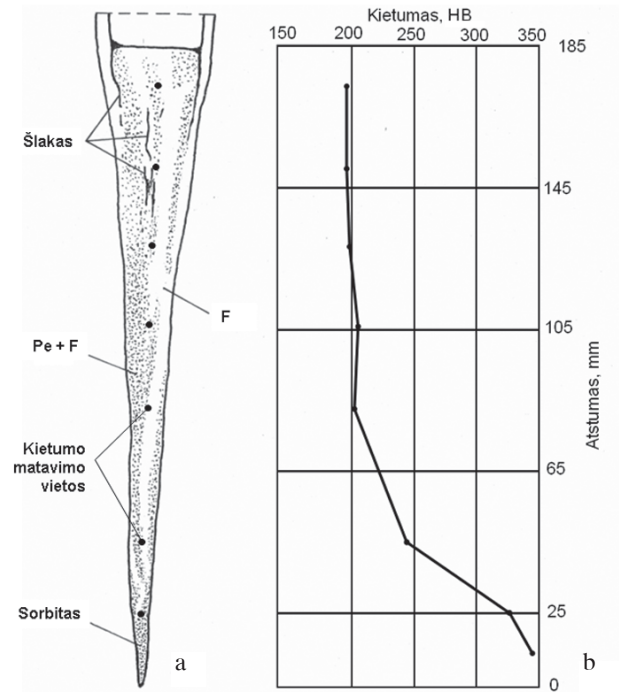
(17 pav.). Centrinės kirvio dalies viršus kaip mažiausiai reikšminga vieta yra menkiausiai iškaltas, čia matome didžiausias šlako intarpų sankaupas. Dalis intarpų yra stambūs ir ilgi. Taip pat labai toli žemyn nuo įmovos nusitęsia ir nesusivirinus, tik šlaku užpildyta siūlės dalis, einanti tarp centro ir išorinių kirvio sluoksnių. Tačiau tai nemenkina nei mechaninių, nei funkcinių kirvio savybių.

Kirvio elementinė sudėtis buvo nustatyta ašmenų 1357-K/2 ir įmovos bandinyje 1357-K/3. Analizuojant bandinį 1357-K/2 buvo ištirtos ašmenų pakraščių zonos ir centrinė dalis, atskirai

kur iki 0,1%). Manganas nėra būdingas kalviškajai geležiai, tačiau įvertinant didelį mangano oksido kiekį, nustatytą dalyje Marvelės šlakų, galima pagrįstai teigti, kad šioje vietovėje bent dalis geležies buvo išlydyta iš mangano turinčios rūdos. Nors manganas su deguonimi sudaro patvaresnius junginius nei geležis, tačiau esant palankioms redukavimo sąlygoms dalis mangano, matyt, redukovosi ir pateko į atgaivintą geležį. Manganas yra pageidautina geležies priemaiša, nes sudarydamas su ja kietąjį tirpalą padidina geležies stiprumą. Marvelės šlakuose, taip pat ir kirviuose aptiktas



15 pav. Kirvio 1357-K bendras vaizdas ir pjūvis: a – kirvio matmenys, b – kirvio išilginio pjūvio nuotrauka. Pjūvio paviršius poliruotas ir ęsdintas HNO_3 tirpalu. *M. Bertašius nuotr.*



16 pav. Kirvio 1357-K mikrostruktūros schema ir kietumo grafikas: a – mikrostruktūros schema ir kietumo matavimo vietos, b – ašmenų kietumo grafikas.

8 lentelė. Kirvio 1357-K kietumas išilginiame pjūvyje

Atstumas nuo ašmenų, mm	Kietumas, HRC	Kietumas, HB
170	11	192
153	10	190
128	12	197
105	15	212
83	14	207
47	21	235
25	34	327
12	36	341

manganas padidina tikimybę, kad šie kirviai yra pagaminti Marvelėje iš vietinės geležies.

Tyrimais nustatoma kirvių gamybos technologija. Centrinę dalį ir įmovų bei paviršiaus sluoksnių elementinės sudėties skirtumai, taip pat suvirinimo siūlės, prasidedančios nuo įmovos ir einančios korpusų šonais ašmenų galo link, rodo, kad jie yra nukalti iš dviejų dalių. Gausiai įanglintos vidurinės kirvių dalys (ašmenys) yra apgaubtos

9 lentelė. Kirvio 1357-K apibendrinta elementinė sudėtis, %

Elementas	Kirvio 1357-K ašmenų (band. 1357-K/2)				Įmovos (band. 1357-K/3)		Suvirinimo siūlės	
	Išorinis sluoksnis		Centrinė dalis		Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos
	Vidurkis	Ribos	Vidurkis	Ribos				
Fe	99,75	99,69–99,79	99,71	99,64–99,75	99,78	99,75–99,82	99,60	99,55–99,62
Co	0,175	0,168–0,181	0,172	0,165–0,179	0,169	0,165–0,172	0,189	0,187–0,191
Cu	–	–	–	–	Pėds.	–	–	–
Ni	0,004	0–0,006	Pėds.	–	0,001	0–0,004	0,013	0,011–0,015
As	0,063	0,038–0,128	0,043	0,033–0,53	0,026	0,010–0,043	0,205	0,181–0,250
P	0,009	0,002–0,017	0,025	0,012–0,041	0,006	0,004–0,009	0,004	0,003–0,005
Mn	0,005	0–0,010	0,053	0,021–0,113	0,020	0,005–0,041	–	–
S	0,001	0–0,001	–	–	–	–	0,001	–
Σ	100,007	–	100,003	–	100,002	–	100,012	–



17 pav. Kirvio 1357-K ašmenų bandinio sandara: suvirinimo siūlės (šviesios), jungiančios centrinę ir išorinę kirvio dalis, matyti šlakų virtinė (tamsūs). Bandinys poliruotas ir išdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.

rūpestingai privirintomis išorinėmis dalimis, iš kurių suformuotos įmovos ir kirvių šonai. Kirvių ašmenys yra termiškai kietinti (grūdinti), tai padaro ašmenis reikiamo kietumo, o minkštesni išoriniai sluoksniai apsaugo juos nuo trapumo, bet palaiko stiprumą. Tai ypač svarbu ilgajam kirviui (1357-K).

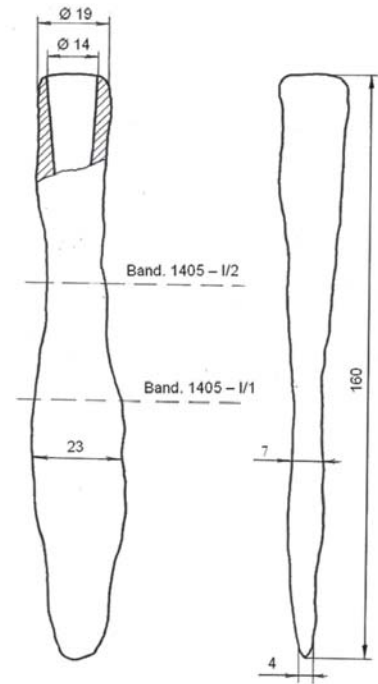
Kirvių sudėtis, jų struktūra, forma ir puiki gamyba rodo didelį juos gaminusių kalvių meistriškumą.

IETIGALIAI

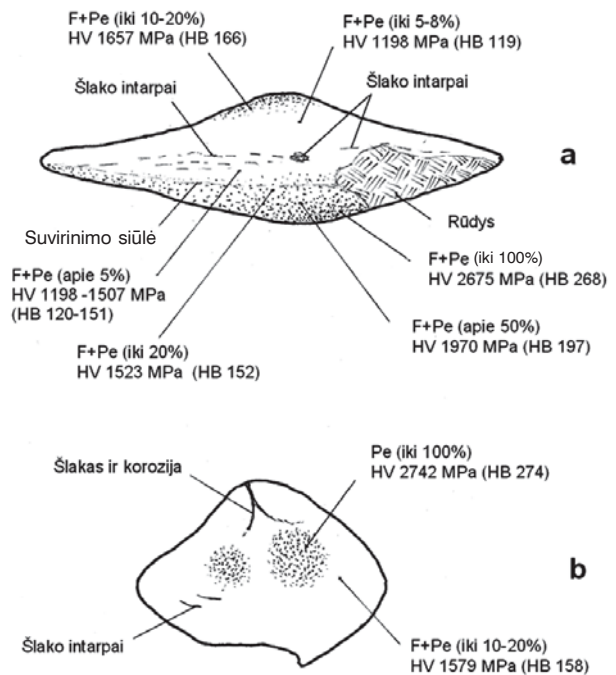
Ietigalis 1405-I. Ietigalio masė – 78 g, jis stipriai paveiktas korozijos. Tyrimams buvo paruošti du bandiniai (18 pav.): skerspjūvis per plunksną – 1405-I/1, prie įmovos – 1405-I/2.

Metalografinis ietigalio tyrimas parodė, kad plunksna (band. 1405-I) yra suformuota iš nevienodai įanglintos geležies. Anglies kiekis geležyje svyruoja maždaug nuo 0,01% iki 0,8%, todėl plunksnos mikrostuktūroje yra matoma labai įvairaus san-

tykio ferito ir perlito – nuo beveik gryno ferito iki šimtaprocentinio perlito (19 pav.). Dėl šios priežasties plunksnos kietumas skerspjūvyje svyruoja nuo HV_{200} 1198 MPa (HB120) iki HV_{200} 2675 MPa (HB268). Skersiniame plunksnos pjūvyje taip pat yra matoma kalviškojo suvirinimo siūlė, skirianti skirtingai įanglintus gele-



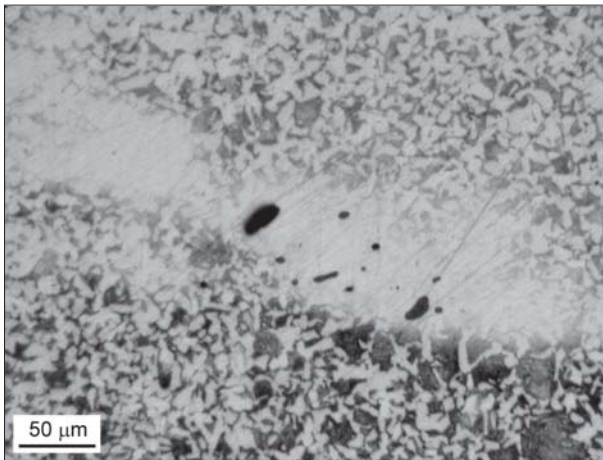
žies sluoksnius 18 pav. Ietigalio 1405-I bendras vaizdas.



19 pav. Ietigalio 1405-I mikrostruktūros ir mikrokietumo matavimų schema (padidinta apie 5 kartus): a – plunksnoje (bandinys 1405-I/1), b – tarp įmovos ir plunksnos (bandinys 1405-I/2).

10 lentelė. Apibendrinti ietigalio 1405-I elementinės sudėties analizių rezultatai, %

Elementas	Bandinys 1405-I/1		Bandinys 1405-I/2		Vidutinė reikšmė dirbiniui		Suvirinimo siūlė
	Vidurkis (13 matav.)	Ribos	Vidurkis (5 matav.)	Ribos	Vidurkis	Ribos	
Fe	99,40	98,97–99,65	99,35	98,98–99,51	99,386	98,97–99,65	98,29
Co	0,160	0,152–0,168	0,158	0,154–0,166	0,159	0,152–0,168	0,180
Cu	0,002	0–0,008	0,003	0–0,009	0,002	0–0,009	0,014
Ni	0,003	0–0,012	0,003	0–0,011	0,003	0–0,012	0,023
As	0,384	0,175–0,804	0,426	0,271–0,830	0,396	0,175–0,830	1,478
P	0,056	0,029–0,164	0,057	0,009–0,098	0,056	0,009–0,164	0,018
S	Pėds.	0–0,002	0,003	0–0,006	0,002	0–0,006	–
Σ	100,005		100,000		100,003		100,003



20 pav. Ietigalio 1405-I suvirinimo siūlė (šviesi) plunksnos mikrostruktūroje. Optinis mikroskopas, bandinys ėsdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.

(20 pav.). Geležies elementinė sudėtis abejuose siūlės pusėse yra beveik vienoda, neskaitant skirtingų anglies koncentracijų, todėl tikėtina, kad siūlė susidarė kalviui sąmoningai išplojant, sulenkiant ir suvirinant nevienodo anglingumo geležį, siekiant pagerinti plunksnos mechanines savybes. Beje, nevienodas geležies įanglinimas (maždaug nuo 0,05% C iki 0,8% C) nustatytas taip pat ir bandinyje 1405-I/2, išpjautame prie ietigalio įmovos. Tačiau šiame bandinyje įanglinta geležis yra matoma tik dviuose koncentruotuose ploteliuose ir jame nėra jokių suvirinimo siūlių (19:b pav.).

Ietigalio elementinės sudėties analizių rezultatai, pateikti 10 lentelėje, rodo, kad jo sudėtis yra

artima Marvelės geležies konkracijų. Todėl galima daryti pagrįstą išvadą, kad tiriamasis ietigalis yra pagamintas šioje vietovėje iš vietinės geležies. Be to, abiejuose ietigalio pjūviuose (band. 1405-I/1 ir 1405-I/2) geležis yra beveik vienodos sudėties (neskaitant įanglinimo). Tai rodytų, kad jis yra nukaltas iš vieno geležies ruošinio jį lankstant ir formuojant. Įdomu paminėti, kad suvirinimo siūlėje elementų As, Co, Cu, Ni koncentracija yra padidėjusi, o fosforo (P) – sumažėjusi (10 lentelė), bet tai yra įprastas kalviškojo suvirinimo siūlėms reiškinys.

Plunksnos paviršiniame sluoksnyje iš abiejų šonų yra matomas didesnis, palyginti su gilesniais sluoksniais, geležies įanglinimas. Padidinta anglies koncentracija paviršiniame sluoksnyje perša prielaidą, kad plunksna galėjo būti papildomai įanglinta (cementuota), siekiant padidinti jos kietumą. Tačiau dėl didelės antgalio korozijos neįmanoma nustatyti pirminių cementuoto sluoksnio parametrų.

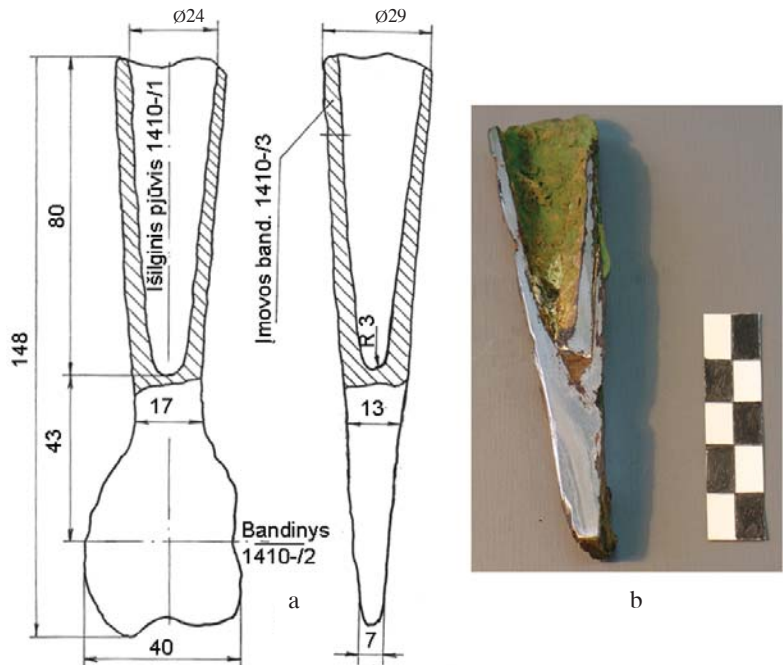
Ietigalis 1410-I. Ietigalio masė – 164 g, jis stipriai paveiktas korozijos, be to, didžioji jo plunksnos dalis nulaužta (21 pav.). Tyrimams buvo paruošti trys bandiniai: išilginis pjūvis – 1410-I/1, skerspūvis per plunksną – 1410-I/2, įmovos bandinys – 1410-I/3.

Išilginiame ietigalio pjūvyje gerai matoma įmovos sandara (21:b ir 22 pav.). Įmovinės dalies makro- ir mikrostruktūra rodo, kad ietigalio metalinė matrica čia yra sluoksnuota, turinti paly-

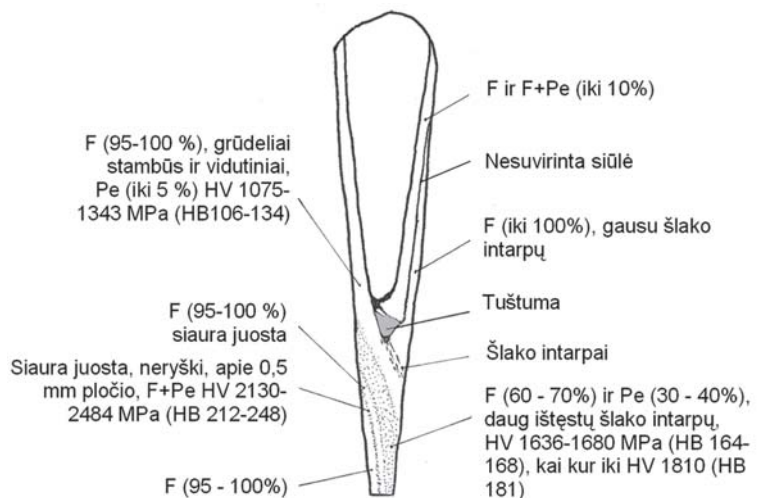
ginti didelį kiekį netolygiai pasiskirsčiusių įvairaus dydžio šlako intarpų. Suvirinimo siūlių tarp sluoksnių nepastebėta. Sluoksnių kryptis ir išsidėstymas atskleidžia įmovos formavimo būdą: ji tik susukta į kūginį vamzdį (tikriausiai naudojant specialų įtvarą) ir palikta nesuvirinta (22 pav.). Gražiai sukalta siūlė yra užsipildžiusi šlaku. Įdomu paminėti, kad J. Stankus, tyrinėjęs ietigalių gamybos technologiją Lietuvoje IX–XIII a., nurodo, kad jo tyrinėtų ietigalių įmovų skerspjūviuose buvo aiškiai matomos suvirinimo siūlės (Stankus, 1970, 127). Ietigalio geležis įanglinta mažai, todėl perlito kiekis bandinių mikrostruktūroje dažniausiai neviršija 10–15%, tačiau yra vietų, kur jis pasiekia net 30–40%. Ietigalio mikrokietumo matavimai rodo negrūdintos geležies kietumą: ferite – apie HV_{200} 1075MPa (HB106), o daugiau įanglintose vietose – net iki HV_{200} 2480MPa (HB 248).

Ietigalio plunksna yra nukalta iš mažai įanglintos geležies (daugiausia ferito), kurioje taip pat gana gausu šlako intarpų (23 pav.). Analogiška struktūra matoma ir ietigalio įmovoje (24 pav.), tik tai joje yra likę dar daugiau šlako intarpų.

Ietigalio 1410-I elementinės sudėties tyrimai rodo, kad metalo sudėtis čia kiek skiriasi nuo Marvelės geležies konkretijų. Daugiausia skiriasi arseno ir fosforo koncentracijos. Ietigalio geležyje arseno yra gerokai mažiau (vid. 0,004%), o fosforo – daugiau (vid. 0,382%). Tačiau Marvelės lydymo šlakų sudėtis rodo, kad čia buvo lydomos rūdos, turinčios ir palyginti daug fosforo. Viename šlako bandinyje (analizės Nr. 304) fosforo



21 pav. Ietigalio 1410-I bendras vaizdas: a – ietigalio matmenys, b – išilginis pjūvis per įmovą nuotrauka. Bandinys poliruotas ir ėsdintas HNO_3 tirpalu. M. Bertšiaus nuotr.



22 pav. Ietigalio 1410-I mikrostruktūros ir mikrokietumo matavimų išilginiame pjūvyje (band. 1410-I/1) schema.

pentoksido aptikta net 5,23%, o arseno vienoje iš konkretijų (band. Nr. 20070717/4) yra aptikta labai mažai (0,005–0,036%). Taigi tikėtina, kad šis ietigalis vis dėlto buvo pagamintas Marvelėje.

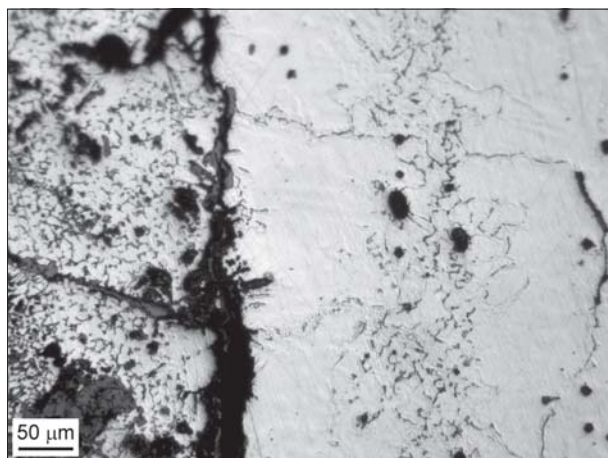
Elementinės sudėties tyrimo rezultatai ir mikronuotraukos rodo didelę fosforo segregaciją

11 lentelė. Ietigalio 1410-I elementinės sudėties analizių apibendrinti rezultatai, %

Elementas	Plunksnos bandinys 1410-I/2		Įmovos bandinys 1410-I/3		Vidutinė reikšmė bandiniui	
	Vidurkis (20 matavimų)	Ribos	Vidurkis (6 matavimai)	Ribos	Vidurkis	Ribos
Fe	99,46	99,05–99,81	99,44	99,22–99,67	99,455	99,05–99,81
Co	0,157	0,151–0,166	0,152	0,148–0,155	0,156	0,148–0,166
Cu	0,002	0–0,004	–		0,001	0–0,004
Ni	0,002	0–0,005	–		0,001	0–0,005
As	0,004	0–0,016	0,004	0–0,014	0,004	0–0,016
P	0,382	0,025–0,786	0,416	0,183–0,643	0,390	0,025–0,786
Mn	–		–		–	
Σ	100,003		100,012		100,005	



23 pav. Ietigalio plunksnos skerspjūvio (bandinys 1410-I/2) mikrostruktūra. Nuotraukoje matyti sluoksniuota struktūra ir šlako intarpai, taip pat mikrokietumo matavimo pėdsakas (tamsus kvadratis). Optinis mikroskopas, bandinys išdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.



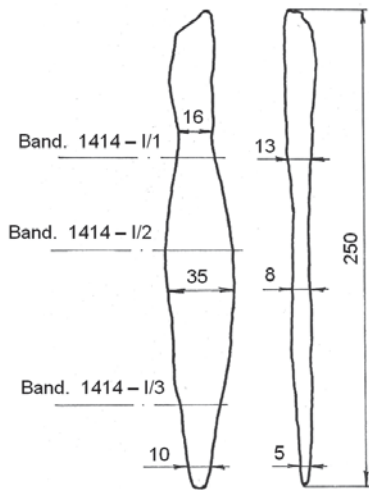
24 pav. Ietigalio įmovos (bandinys 1410-I/3) mikrostruktūra. Optinis mikroskopas, bandinys išdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.

geležyje, kuri turi didelę įtaką dirbinio struktūros nevienodumui ir sluoksniuotumui, kartu ir jo mechaninėms savybėms: stiprumui, kietumui, trapumui. Įdomu, kad ietigalio 1410-I plunksnos ir įmovos elementinė sudėtis yra labai artima (11 lentelė), be to, ietigalio pjūviuose nematyti kalviškojo suvirinimo siūlių, rodančių, kad jis būtų suvirintas iš atskirų dalių, todėl neabejotina, kad visas ietigalis buvo nukaltas iš vieno ruošinio.

Ietigalis 1414-I. Ietigalio masė – 169 g, jis stipriai paveiktas korozijos, tyrimų metu buvo atitrūkusį įmovos dalis (bendras jo ilgis siekė 30,5 cm). Įmovinė dalis labai surūdijusi, todėl neįmanoma net apytikriai nustatyti įmovos matmenų (25 pav.). Paruošti trys skerspjūvių bandiniai: pjūvis prie įmovos 1414-I/1, per plunksną 1414-I/2 ir plunksnos smaigalyje 1414-I/3.

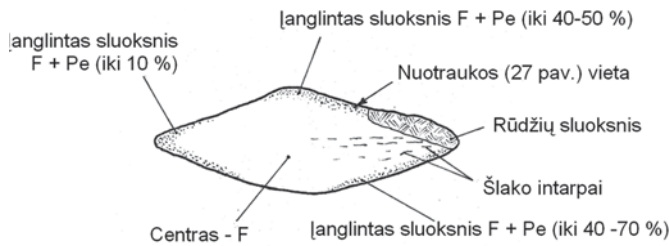
Bandinių 1414-I/1 ir 1414-I/2 mikrostruktūra rodo, kad ietigalis nukaltas iš neįanglintos geležies. Jo metalas yra gerai iškaltas, šlako tarpų geležyje likę palyginti mažai. Daugiausia tai smulkūs taškiniai intarpėliai. Taip pat yra šiek tiek nedidelių pailgų, išstėtų deformacijos kryptimi šlako intarpėlių. Metalinę ietigalio matricą sudaro daugiausia ferito grūdėliai, kurių vidutinis mikrokietumas svyruoja nuo HV_{200} 890 MPa (HB 87) iki HV_{200} 1516 MPa (HB 152).

Bandinio 1414-I/3 mikrostruktūros schema parodyta 26 pav. Įdomu, kad pagal bandinio išorinį kontūrą yra aiškiai matomas anglies kiekio geležyje padidėjimas, nes mikrostruktūrą šioje zonoje



25 pav. Ietigalio 1414-I bendras vaizdas.

sudaro feritas ir perlitas. Be to, perlito kiekis pakraščiuose yra didesnis, o einant gilyn į dirbinio centrą jis laipsniškai mažėja, kol visi išnyksta ir lieka tik feritas. Pakraščio sluoksnio mikrostruktūra



26 pav. Ietigalio plunksnos (band. 1414-I/3) mikrostruktūros schema.

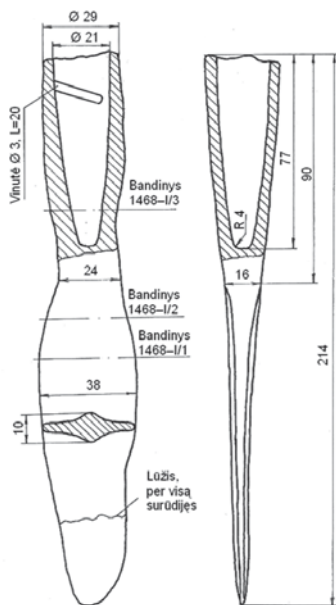
12 lentelė. Apibendrinti ietigalio 1414-I elementinės sudėties analizių rezultatai, %

Elementas	Bandinys 1414-I/3	
	Vidurkis (11 matavimų)	Ribos
Fe	99,49	99,25–9961
Co	0,253	0,240–0,279
Cu	Pėds.	0–0,003
Ni	0,136	0,101–0,190
As	0,029	0,007–0,077
P	0,100	0,017–0,267
Σ	100,007	

parodyta 27 pav. Įanglinto sluoksnio gylis siekia apie 1,3–1,5 mm. Dėl korozijos poveikio sluoksnio dalis yra suirusi, todėl pirminis jo storis lieka nežinomas. Įanglinto sluoksnelio mikrostruktūra, storis ir išsidėstymas (dirbinio paviršiuje) leidžia pagrįstai manyti, kad ieties antgalio plunksna, bent jos smailusis galas, buvo cementuota, t.y. įanglinta siekiant padidinti jos kietumą. Plunksnos



27 pav. Ietigalio plunksnos (band. 1414-I/3) įanglinto sluoksnio mikrostruktūra. Nuotraukos viršuje – bandinio pakraštys. Optinis mikroskopas, bandinys išdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.



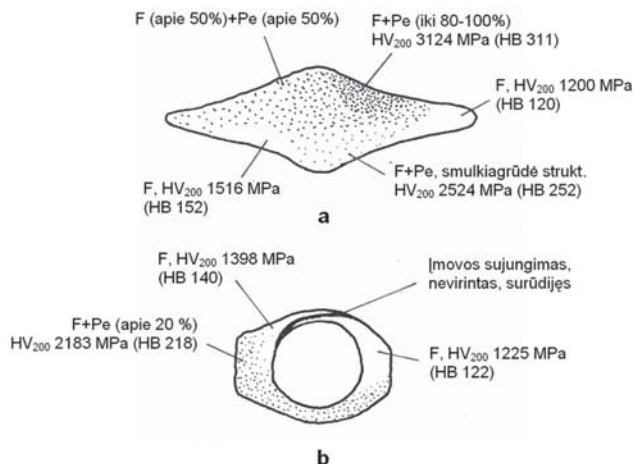
28 pav. Ietigalio 1468-I bendras vaizdas.

džiui, kobalto koncentracija šio ietigalio geležyje yra maždaug 35% didesnė už kobalto Marvelės konkretijose, o nikelio kiekis tiriamame ietigalyje net 20–30 kartų viršija šio elemento kiekį, esantį Marvelės bei kitose Lietuvoje aptiktose geležies konkretijose. Todėl neabejotina, kad šis antgališ į Marvelės vietovę yra patekęs iš svetur.

Ietigalio 1414-I mikrostruktūroje nepastebėta kalviškojo suvirinimo siūlių. Jų nerodo ir elementinės sudėties tyrimai. Matyt, ietigalis yra nukaltas iš vieno ištisinio neįanglintos geležies ruošinio.

kietumas pakraščio sluoksnyje siekia HV_{200} 1810–1921 MPa (HB 181–192).

Ietigalio sudėties analizių rezultatai rodo, kad jo metalo elementinė sudėtis labai skiriasi nuo Marvelės geležies konkretijų (1 lent.). Ji taip pat aiškiai skiriasi ir nuo kitų Lietuvos teritorijoje rastų bei ištyrinėtų geležies konkretijų (Navasaitis ir kt., spaudoje). Pavyzdžiui,



29 pav. Ietigalio 1468-I mikrostruktūros ir mikrokietumo matavimų schemas: a – plunksnos – bandinys 1468-I/1, b – įmovos – bandinys 1468-I/3.

Ietigalis 1468-I. Ietigalio masė – 227 g. Jo plunksna turi standumo briaunas. Ietigalis labai paveiktas korozijos ir storas rūdžių sluoksnis iškraipo jo formą. Išlikusi ietigalio tvirtinimo prie ieties vinutė visiškai surūdijusi ir tyrimams nebetiko. Iš mažiau surūdijusių ietigalio vietų paruošti bandiniai (28 pav.): du plunksnos skerspjūviai 1468-I/1 ir 1468-I/2, įmovos skerspjūvis 1468-I/3.

Visų trijų ietigalio 1468-I bandinių metalografiniai tyrimai parodė, kad jo metalas yra palyginti gausiai ir gana tolygiai (kaip kalviškosios geležies) įanglintas. Daugelyje vietų anglies kiekis geležyje siekia net 0,4–0,6%. Neįanglintų plotų (ferritinė matrica) yra palyginti nedaug (29 pav.). Dėl pakankamai didelio įanglinimo ietigalio kietumas yra santykinai didelis, siekia vidutiniškai

13 lentelė. Apibendrinti ietigalio 1468-I elementinės sudėties analizių rezultatai, %

Elementas	Bandinys 1468-I/1 (pjūvis per plunksną)		Bandinys 1468-I/3 (pjūvis per įmovą)		Vidutinė reikšmė dirbiniui	
	Vidurkis (12 matav.)	Ribos	Vidurkis (8 matav.)	Ribos	Vidurkis	Ribos
Fe	99,24	98,12–99,96	99,31	98,59–99,61	99,27	98,12–99,96
Co	0,181	0,175–0,190	0,190	0,175–0,216	0,185	0,175–0,216
Cu	0,002	0–0,006	0,004	0–0,009	0,003	0–0,009
Ni	0,022	0,012–0,034	0,031	0,014–0,044	0,026	0,012–0,044
As	0,119	0,049–0,421	0,181	0,076–0,379	0,144	0,049–0,421
P	0,172	0,015–0,641	0,281	0,090–0,802	0,216	0,015–0,802
Mn	–		–		–	
Σ	99,736		99,997		99,844	

apie HV_{200} (2183–2524) MPa (HB 218–252). Vietoje tirtose vietose mikrokietumo matavimas parodė net HV_{200} 3124 MPa (HB 311). Tai rodo, kad ietigalis galėjo būti grūdintas.

Ietigalio 1468-I struktūroje nematyti kalviškojo suvirinimo siūlių. Jų neatskleidė nei metalografiniai tyrimai, nei elementinės metalo sudėties analizė. Tikėtina, kad šis ietigalis yra nukaltas iš vieno tinkamai įanglinto geležies gabalo suformuojant plunksną, įmovą ir plunksnos standumo briaunas. Nukalus, matyt, dar buvo termiškai apdorotas.

Įmovinė ietigalio dalis perdėm surūdijusi, vis dėlto iš jos skerspjūvio (bandinys 1468-I/3) sandaros galima spręsti, kad įmova buvo tiksliai suformuota (kalant ant specialaus įtvaro) ir palikta nesuvirinta (29:b pav.).

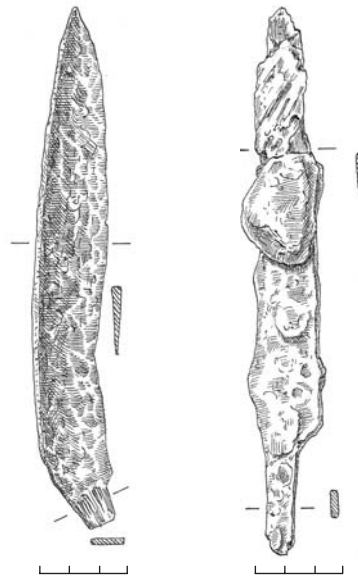
Ietigalio 1468-I elementinės sudėties matavimų apibendrinti rezultatai pateikti 13 lentelėje.

Elementinės sudėties tyrimai rodo didelę fosforo ir arseno segregaciją ietigalyje. Tai apskritai būdinga kalviškajai geležiai. Nedidelė fosforo ir arseno koncentracija padidina geležies kietumą, tačiau didesnis jų kiekis yra nepageidautinas, nes metalas darosi trapesnis. Šiame ietigalyje fosforo ir arseno vidutinės koncentracijos neperžengia pavojingų ribų.

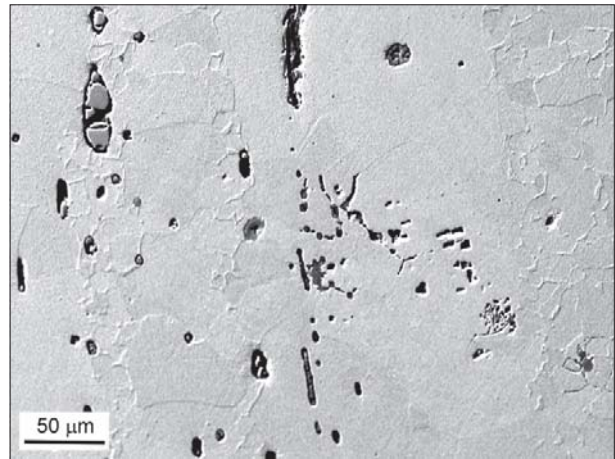
Ietigalio 1468-I elementinėje sudėtyje, palyginti su Marvelės geležies konkretijomis, aptikta žymiai daugiau nikelio (vidutiniškai iki 0,031% Ni bandinyje 1468-I/3) bei šiek tiek daugiau kobalto (vidutiniškai iki 0,19% Co tame pačiame bandinyje). Tai verčia manyti, kad šis ietigalis buvo atgabentas iš svetur.

PEILIAI

Tyrimams buvo atrinkti du peiliai: 1405-P ir 1468-P. Abu jie buvo panašios masės: peilis 1405-P svėrė 48 gramus, o 1468-P – 40 gramų. Abu peiliai buvo stipriai paveikti korozijos, išoriniai jų sluoksniai surūdiję ir iš dalies nubyreję. Metalų mikrostruktūros, kietumo ir cheminės sudėties tyrimams iš peilio 1405-P buvo padaryti du 1–



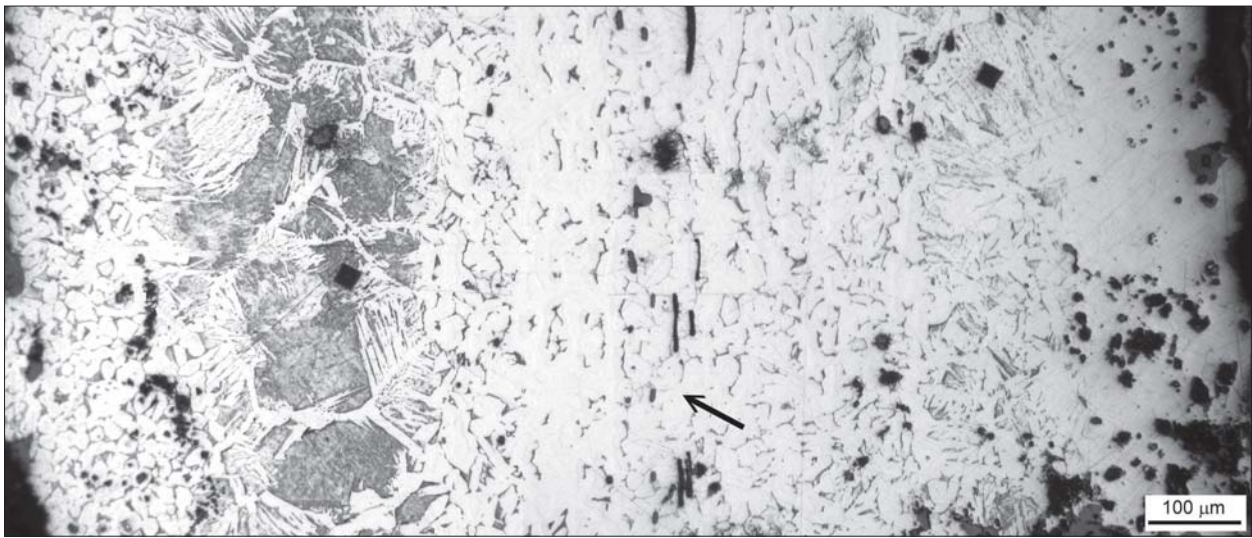
30 pav. Peilių 1405-P ir 1468-P bendras vaizdas.



31 pav. Peilio 1405-P mikrostruktūra: feritas ir šlako intarpai. SEM, bandinys išdintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*

1,5 mm storio bandiniai: iš ašmenų vidurio ir iš peilio įkotės (ties 30 pav. nurodytomis pjūvių žymėmis). Peilio 1468-P tyrimams iš ašmenų buvo padaryti du bandiniai.

Metalografiniai tyrimai parodė, kad vidurinė peilio 1405-P dalis yra nukalta iš neanglingos geležies. Mikrostruktūrą sudaro beveik vien feritinė matrica su šlako intarpais (31 pav.). Perlito yra palyginti mažai. Ferito grūdėliai daugiausia vidutinio dydžio. Šlako intarpų matyti palyginti daug.



32 pav. Peilio 1468-P mikrostruktūra: feritas (šviesus), perlitas (rainas) ir šlako intarpai (tamsūs). Taip pat matomi mikrokietumo matavimo įspaudai. Struktūroje nustatyta sunkiai pastebima suvirinimo siūlė (→), kurią parodo šlakų virtinė, taip pat ir elementinė jos sudėtis (15 lent.). Optinis mikroskopas, bandinys išdintintas HNO_3 tirpalu. *A. Selskienės nuotr.*

Dalis jų pailgi, ploni, ištįsę plastinės deformacijos kryptimi, o kita dalis – labai smulkūs, lygiašiai (beveik taškiniai) intarpėliai, išsibarstę ferito arba ferito ir perlito matricoje. Nereti ir stambesni šlako intarpai.

Peilio ašmenų (band. 1405-P/1) vidutinis mikrokietumas siekia HV_{200} 1559MPa (HB 156) ir yra šiek tiek didesnis už įkotelės (band. 1405-P/2) kietumą HV_{200} 1248MPa (HB 124). Tiek peilio ašmenys, tiek įkotelė yra pagaminti iš neanglingos geležies, todėl nelabai kieti. Ašmenys, palyginti su įkote, yra kiek kietesni, matyt, dėl plastinio geležies sukietinimo ašmenis šaltai kalant. Galimas dalykas, kad peilio ašmenų pjaunančiojoje briaunoje buvo daugiau anglies, ir ji buvo kietesnė, tačiau ji surūdijo ir nubyrėjo.

Peilio 1468-P struktūroje matomi keli skirtingo įanglinimo geležies sluoksnėliai, susidarę iš ferito, ferito ir perlito arba perlito (32 pav.). Taip formuojant peilio geležtę ašmenų kietumas buvo didesnis, bet išvengta jų trapumo. Peilio skerspjuvyje pastebėta kalviškojo suvirinimo siūlė, kuri galėjo atsirasti suvirinant dvi geležies juostas. Bet labiausiai tikėtina, kad ji susidarė suplojant, su-

lenkiant ir suvirinant tą pačią geležies juostą. Pastarąją mintį patvirtina labai panaši metalo sudėtis abiejose siūlės pusėse, tuo tarpu pačioje siūlėje yra nustatytas ryškus vario (iki 0,014%), nikelio (iki 0,025%), arseno (iki 1,16%), kobalto (iki 0,254%) padidėjimas, o tai būdinga kalviškosioms suvirinimo siūlėms. Be to, siūlėje yra matoma metalurginių šlakų virtinė.

Mikrokietumo matavimai parodė, kad peilio geležies feritinių sluoksnėlių vidutinis kietumas svyruoja nuo HV_{200} 1707 MPa (HB 170) iki HV_{200} 1878 MPa (HB 189), vietomis pasiekiami net HV_{200} 2170 MPa (HB 217). Tai žymiai didesnis už techniškai švaraus ferito kietumą (HB 80-100). Galima manyti, kad dvi priežastys lėmė tokį peilio ferito kietumo padidėjimą. Pirma, fosforo ir arseno legiruojanti įtaka, kurių šiame peilyje yra palyginti daug (apie 0,3% P ir 0,09% As). Antra, kietinantis šaltesios plastinės deformacijos poveikis, kai baigiant gaminti jau vėstantis peilis galėjo būti specialiai pakalamas, kad būtų kietesnis. Perlitinių sluoksnėlių kietumas svyruoja nuo HV_{200} 1873 MPa (HB 188) iki vidutiniškai HV_{200} 2362 MPa (HB 236), daugiausia iki HV_{200} 2646 MPa (HB 264). Tai yra įprastas

14 lentelė. Peilio 1405-P elementinės sudėties tyrimų rezultatai, %

Elementas	Bandinys 1405-P/1 (ašmenys)		Bandinys 1405-P/2 (įkotė)		Vidutinis dirbiniui	
	Vidurkis (6 matav.)	Ribos	Vidurkis (12 matav.)	Ribos	Vidurkis	Ribos
Fe	99,77	99,71–99,81	99,74	99,66–99,81	99,62	99,46–99,83
Co	0,162	0,156–0,166	0,163	0,157–0,168	0,162	0,156–0,168
Cu	0,002	0–0,004	Pėds.		0,002	0–0,004
Ni	Pėds.		Pėds.		Pėds.	
As	0,005	0–0,010	0,014	0–0,034	0,011	0–0,034
P	0,067	0,023–0,124	0,086	0,014–0,208	0,080	0,014–0,208
Mn	Pėds.		Pėds.		Pėds.	
S	0,003	0,002–0,005	–		0,003	0,002–0,005
Σ	100,01		100,003		99,88	

plokštelinio perlito kietumas. Kaip matome, šis peilis yra žymiai kietesnis už 1405-P.

Peilio 1405-P bandinių mikrostruktūroje buvo pasirinkta keletas vietų ir ištirta elementinė sudėtis. Šių tyrimų apibendrinti rezultatai pateikti 14 lentelėje.

Peilio 1405-P ašmenų ir įkotės elementinės sudėty yra labai artimos, beveik vienodos. Be to, peilio bandiniuose nepastebėta kalviškojo suvirinimo siūlių. Tai rodo, kad jis nukaltas iš vieno ruošinio. Tiesa, aptiktas vienas plonytis sluoksnelis (bandinys 1405-P/2), turintis kiek besiskiriančias nuo vidutinių elementų Cu, As ir P koncentracijas, tačiau greičiausiai jis yra susidaręs kalant peilio ruošinį. Peilio 1405-P elementinė sudėtis yra labai panaši į Marvelės geležies konkretijų, todėl nekyla abejonių, kad jis darytas vietinių meistrų, nukaltas iš Marvelėje išlydytos geležies.

Peilio 1468-P bandinių mikrostruktūroje taip

pat buvo pasirinkta po keletą vietų ir ištirta cheminė sudėtis. Kadangi peilis yra suvirintas iš atskirų juostų, cheminė sudėtis buvo tyrinėta abiejose geležtės pusėse, vidurinėje geležtės dalyje bei suvirinimo siūlėje. Tyrimų rezultatai pateikti 15 lentelėje.

Peilio 1468-P metalo elementinė sudėtis (15 lent.) yra artima Marvelės geležies konkretijų (1 lent.), išskiriant kobaltą. Kobalto koncentracija peilio metale yra šiek tiek didesnė (apie 13%) už vidutinę konkretijose ir vidutiniškai siekia apie 0,185%. Kitų tirtų elementų kiekis peilyje yra maždaug toks pat, kaip ir konkretijose. Nepaisant kiek didesnės kobalto koncentracijos, galima manyti, kad peilis buvo pagamintas Marvelėje dirbusių kalvių iš čia išlydytos geležies, tačiau taip pat tikėtina, kad jis galėjo čia patekti ir iš kitų vietovių, kuriose geležies gavybai buvo naudojama fosforinga balų rūda, turinti kobalto mineralų.

15 lentelė. Apibendrinti peilio 1468-P elementinės sudėties duomenys, %

Elementai	Kairysis kraštas		Dešinysis kraštas		Vidurinė dalis		Vidutiniškai dirbiniui		Suvirinimo siūlės	
	Vidurkis (2 mat.)	Ribos	Vidurkis (2 mat.)	Ribos	Vidurkis (8 mat.)	Ribos	Vidurkis (12 mat.)	Ribos	Vidurkis (3 mat.)	Ribos
Fe	99,37	99,35–99,38	99,47	99,41–99,53	99,44	99,09–99,68	99,43	99,09–99,68	98,25	97,76–98,52
Co	0,166	0,165–0,167	0,211	0,196–0,225	0,184	0,163–0,227	0,185	0,163–0,227	0,241	0,232–0,251
Cu	0,001	0–0,002	0,001	0–0,001	0,002	0–0,010	0,002	0–0,010	0,009	0–0,014
Ni	Nerasta		0,003	0,002–0,004	0,001	0–0,005	0,001	0–0,005	0,033	0,025–0,042
As	0,006	0,002–0,009	0,146	0,103–0,188	0,094	0–0,189	0,088	0–0,189	1,316	1,118–1,684
P	0,471	0,471	0,192	0,184–0,199	0,290	0,158–0,71	0,304	0,158–0,710	0,161	0,106–0,269
Mn	–		–		–		–		–	
Σ	100,014		100,023		100,011		100,01		100,01	

SAGTIS

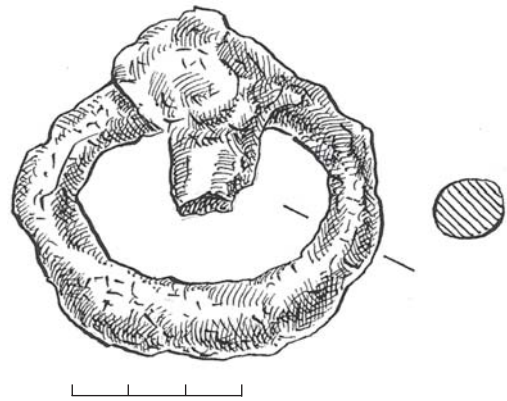
Sagties masė – 68 g, ji stipriai paveikta korozijos. Matmenys nenuvalius rūdžių: ilgis – 62 mm, plotis – 55 mm, aukštis – 33 mm, sagties žiedo skersmuo 9–15 mm. Metalografiniams, mikrokietumo ir elementinės sudėties tyrimams iš sagties žiedo išpjautas bandinys 1446-S/1 (ties 33 pav. nurodyta pjūvio žyme).

Sagties žiedo bandinio 1446-S/1 skerspjūvis nuvalius rūdis siekė apie 6–7 mm. Metalografiniai tyrimai parodė, kad šio palyginti mažo dirbinio struktūros įvairovė yra didelė. Tikėtina, kad kalant ruošinį žiedui, metalas buvo suplojamas ir lenkiamas, o sulenkti sluoksniai kalviškai suvirinami. Baigiant buvo suformuotas strypelis – žiedo ruošinys. Dėl to žiedo skerspjūvyje matome keletą suvirinimo siūlių, jungiančių įvairaus anglingumo geležį. Anglies kiekis svyruoja nuo 0 (techniška geležis) iki maždaug 0,7% C (mikrostruktūroje – perlitas su nežymiu kiekiu ferito). Dirbinys gerai iškaltas, nes struktūroje yra likę nedaug šlako intarpų. Perlito, perlito ir ferito plotelių matricą sudaro smulkūs, o ferito ploteliuose vyrauja stambūs grūdėliai. Mikrostruktūros pavyzdžių matome iliustracijose (34 pav.).

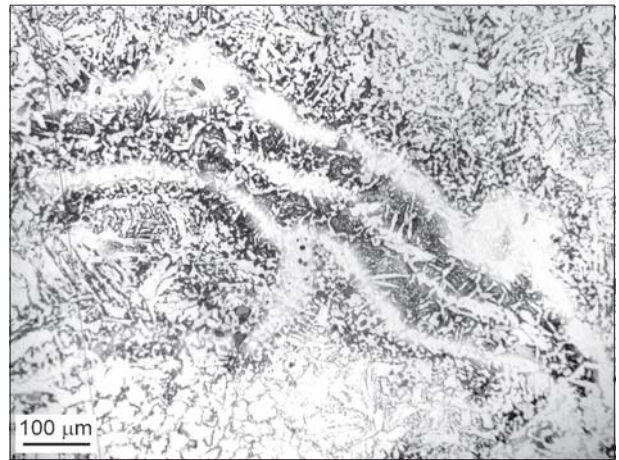
Mikrokietumas sagties žiedo skerspjūvyje siekia vidutiniškai nuo HV_{200} 1843 MPa (HB 184) iki HV_{200} 2447 MPa (HB 245). Tokiam dirbiniui kaip sagtis tai palyginti didelis kietumas.

Sagties metalo elementinė sudėtis buvo ištirta 24 vietose. Apibendrinti sagties 1446-S elementinės sudėties tyrimų rezultatai parodyti 16 lentelėje, kurioje atskirai pateikiama apibendrinta dirbinio metalinės matricos ir suvirinimo siūlės sudėtis.

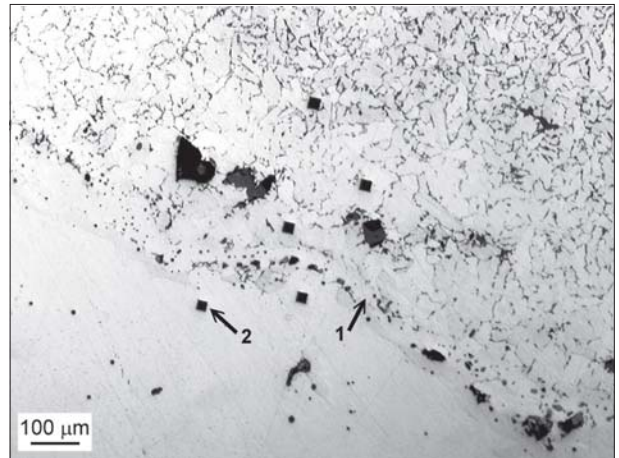
Sagties žiedo metale, be anglies (C), rasta palyginti daug fosforo (P). Fosforas geležyje pasiskirstęs labai netolygiai. Mažiausiai jo pastebėta kalviškojo suvirinimo siūlėse – apie 0,035% (ri-



33 pav. Sakties 1446-S bendras vaizdas ir bandinio išpjūvio vieta.



a



b

34 pav. Sakties metalo mikrostruktūra: a – perlitinė ir feritinė matrica, b – kalviškojo suvirinimo vieta. Rodyklėmis parodyta suvirinimo siūlė (1) ir mikrokietumo matavimo išpaušas (2). Optinis mikroskopas, bandinys išdintas HNO_3 tirpalu. A. Selskienės nuotr.

16 lentelė. Sagties 1446-S elementinės sudėties tyrimų apibendrinti rezultatai, %

Elementas	Dirbinio matricoje		Suvirinimo siūlėje	
	Vidurkis (16 matav.)	Ribos	Vidurkis (8 matav.)	Ribos
Fe	99,529	99,09–99,72	99,18	98,87–99,66
Co	0,175	0,167–0,189	0,219	0,191–0,259
Cu	0,003	0–0,008	0,011	0,005–0,018
Ni	0,005	0–0,023	0,095	0,027–0,202
As	0,041	0,007–0,084	0,409	0,086–0,654
P	0,250	0,019–0,674	0,035	0,018–0,089
Mn	–		–	
Σ	100,003		99,949	

bos nuo 0,018 iki 0,089%), o daugiausia – feritinėje matricoje (iki 0,674%). Fosforu legiruoto ferito kietumas padidėja, todėl mikrokietumas šiose feritinės matricos vietose siekia iki HV₂₀₀ 2447 MPa (HB 245). Sagties žiede yra nemažai ir kobalto, vidutiniškai apie 0,175%, tačiau šis elementas pasiskirstęs gana tolygiai – nuo 0,167 iki 0,189%. Lyginant su Marvelės geležies konkretizacijomis, sagties metale aptikta tik nežymiai daugiau kobalto. Todėl galima manyti, kad sagtis 1446-S yra vietinės gamybos, t.y. ji nukalta Marvelėje, nors gali būti patekusi ir iš kitur.

IŠVADOS

1. Marvelėje išlydytos geležies konkretizacijų elementinė sudėtis (Cu, Ni, Co, As, P, Mn, S) yra labai panaši į kitų Lietuvos teritorijoje atrastų konkretizacijų, tačiau galima išvelgti ir nedidelių skirtumų. Marvelės konkretizacijose yra kiek daugiau kobalto (vid. 0,164%, kitur jo yra vid. 0,092%), tačiau mažiau fosforo (vid. 0,078 ir 0,432%) bei vario (tik pėdsakai, o kitur vid. iki 0,026%) ir nikelio (vid. 0,003 ir 0,009%), arseno ir sieros yra beveik vienodai (atitinkamai po 0,12 ir 0,005%).

2. Marvelės geležies lydymo šlakai chemine sudėtimi panašūs į kitus Lietuvoje rastus ir ištirtus rudnelių šlakus, išskiriant tik mangano (Mn) kiekį. MnO koncentracija kai kuriuose Marvelės šla-

kuose viršija net 10%, tuo tarpu kituose šlakuose tesiekia 1–2%.

3. Kompleksiškai buvo ištirta dešimt geležinių dirbinių iš Marvelės III–V a. datuojamų griautinių kapų (trys įmaviniai kirviai, keturi įmaviniai ietigaliai, du peiliai ir sagtis). Daugumos tirtų dirbinių elementinė sudėtis yra artima Marvelės geležies konkretizacijų, taip pat ji panaši ir tarpusavyje. Tad labai tikėtina, kad jie pagaminti vietinių meistrų Marvelės senovinėje gyvenvietėje. Tačiau ietigalio iš 1414 kapo (1414-I) ir ietigalio iš 1468 kapo (1468-I) metalo sudėtis aiškiai skiriasi nuo Marvelės geležies konkretizacijų ir kitų dirbinių sudėties. Tai rodo, kad šie dirbiniai yra patekę iš svetur.

4. Tyrimų metu atskleista įmovinių kirvių sandara, kuri Lietuvoje buvo nežinoma ir netyrinėta. Nustatyta šių kirvių gamybos technologija. Visi kirviai turėjo centrinę įanglintą dalį ir ją gaubiantį privirintą mažesnio anglingumo sluoksnį, iš kurio taip pat buvo suformuota įmova. Kirvių ašmenys buvo grūdinti.

5. Ištirta ir keturių įmovinių ietigalių bei dviejų peilių (tiesia ir lenkta įkote) sandara ir gamybos technologija. Nustatyta, kad kiekvienas iš tirtų ietigalių buvo gaminamas iš vieno ruošinio, iš kurio buvo formuojama ir plunksna, ir įmova. Ietigalių geležies įanglinimas labai įvairus. Anglies kiekis atskirose struktūros vietose svyruoja nuo 0,01 iki 0,8%, t.y. nuo techniškos geležies

iki eutektoidinio plieno. Dėl šios priežasties ietigalių kietumas taip pat yra įvairus. Marvelėje pagamintų ietigalių (1405-I ir 1410-I) kietumas siekia apie HV_{200} 1810-2675MPa (HB 181-268). Tai smulkaus perlito struktūros negrūdinto plieno kietumas.

6. Tirtieji peiliai buvo labai paveikti korozijos. Išoriniai jų sluoksniai buvo nurūdiję, todėl tyrimams buvo galima panaudoti tiktai vidurines peilių dalis. Nustatyta, kad peilis 1405-P buvo pagamintas iš neanglingos geležies, jo kietumas buvo vos HV_{200} 1559MPa (HB 156). Peilis 1468-P buvo nukaltas iš dalinai įanglintos feritinės ir perlitinės struktūros bei šiek tiek legiruotos fosforu ir arsenu geležies. Dėl to šio peilio kietumas siekė iki HV_{200} 2362-2646MPa (HB 236-264). Kiekvienas šių peilių (bent jų vidurinės dalys) buvo nukaltas iš vieno ruošinio.

7. Tyrimai atskleidė, kad Marvelėje III–V a. vyko geležies gavyba ir čia pat ji buvo apdirbama. Dirbo labai sumanūs meistrai, puikiai įvaldę kalvystės techniką ir sugebėję gaminti aukštos kokybės to meto ginklus bei įrankius.

ŠALTINIŲ IR LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Anteins A.**, 1976 – Melnais metāls Latvijā. Rīga, 1976.
- Bertašius M.**, 2007š – Marvelės kapinynas, 2006 metų tyrinėjimų ataskaita. KTU, Filosofijos ir kultūrologijos katedros archyvas.
- Bertašius M.**, 2008š – Marvelės kapinynas, 2007 metų tyrinėjimų ataskaita. KTU, Filosofijos ir kultūrologijos katedros archyvas.
- Bertašius M.**, 2009 – Marvelė. Ein Bestattungspatz mit Mittellitauischer Pferdegräber. Marvelės žirgų kapinynas, II Band. Kaunas, 2009.
- Biborski M., Kaczanowski P., Kędzierski Z., Stepiński J.**, 2002 – Badania nad technologią mieszczy z młodszego okresu przedrzymskiego z obszaru kultury przeworskiej // *Varia Barbarica. Monumenta Archaeologica Barbarica, Series Gemina*. Warszawa–Lublin, 2002. T. I, p. 81–104.
- Navasaitis J., Selskienė A.**, 2007 – Iron smelting techniques in the Virbaliūnai ancient settlement // *Archaeologia Baltica*. Klaipėda, 2007. Vol. 8, p. 387–394.
- Navasaitis J., Selskienė A., Selskis A.**, 1999 – Lietuvos rudnelių šlako sudėtis ir savybės // Lietuvos archeologija. Vilnius, 1999. T.18, p.121–133.
- Navasaitis J., Selskienė A., Žaldarys G.**, 2010 – The Study of Trace Elements in Bloomery Iron // *Material Science*. Kaunas, 2010, 16(2), p. 113–118.
- Peets J.**, 2003 – On Forging Technologies of Estonian Iron Age and Medieval Axes // *Prehistoric and Medieval Direct Iron Smelting in Scandinavia and Europe. Aspects of Technology and Society* (sud. L.Ch. Nørbach). Acta Jutlandica LXXVI:2, Humanities Series 75. Aarhus university press, 2003, p. 111–117, 258–271.
- Piaskowski J.**, 1983 (1987) – Metaloznawcze badania przedmiotów żelaznych z cmentarzyska w Warszawie–Wilanowie // *Wiadomości archeologiczne*. Warszawa, 1983 (1987). T. XLVIII, zeszyt 1, p. 101–110.
- Stankus J.**, 1970 – Kalavijų ir ietigalių gamybos technologija Lietuvoje IX–XIII amžiais // *LTSR MA darbai, A serija*. Vilnius, 1970. T. 2 (33), p. 113–130.
- Stankus J.**, 1978 – Juodoji metalurgija // Lietuvos materialinė kultūra IX–XIII amžiuje. Vilnius, 1978. T. 1, p. 73–88.
- Tautavičius A.**, 1996 – Vidurinis geležies amžius Lietuvoje (V–IX a.). Vilnius, 1996.
- Казакявичюс В.**, 1988 – Оружие балтских племен II–VIII веков на территории Литвы. Вильнюс, 1988.

A METALLOGRAPHIC, MECHANICAL PROPERTIES, AND ELEMENTAL ANALYSIS OF IRON ARTEFACTS FROM MARVELĖ CEMETERY

Mindaugas Bertašius, Jonas Navasaitis, Aušra Selskienė, Gintautas Žaldarys

Summary

The region of Central Lithuania is known for a group of archaeological sites concentrated close to the river Nemunas. One of these, Marvelė (in Kaunas), is the largest archaeologically investigated Lithuanian prehistoric burial ground. This cemetery has been investigated since 1991 and contains burials dating to the 2nd–12th centuries. It has provided an abundance of different types of burials and grave goods and also suggests some plausible interpretations for social events. The paper analyses material from the archaeological investigations in 2006 and presents the results of a metallographic, mechanical properties and chemical analysis of iron artefacts, metallurgical slag, iron droplets and clinker excavated in the Marvelė cemetery. The elemental composition of iron droplets from Marvelė (found in smelting slag) shows their similarity to that of droplets from other Lithuanian archaeological sites. However some small differences may be indicated, e.g., droplets from Marvelė contain more cobalt (c. 0.164%, others contain av. 0.092% Co), but less phosphorus (c. 0.078%, when others – av. 0.432% P). The composition of the examined slag is similar to other Lithuanian archaeological slag, although the manganese oxide level is rather high (up to 10%) in the Marvelė slag.

The manufacturing technologies were studied using a number of socket axes (3 examples of one type), spearheads (4 examples of various types), knives (2 examples of different types) and buckle, all from 3rd–5th-century inhumations.

Metallographic analysis samples were taken

from different parts of the iron artefacts: the cutting edges and longitudinal sections of the axes (3 examples) and spearheads (4 examples). This technique only allows one to presume what the forging sequence and the peculiarities of the metal were in the different parts of the artefacts. The material's hardness (Rockwell and microhardness) was determined for all the axes, spearheads, and knives.

The axes were forged from two separate pieces of iron. The core and cutting edge were made of a higher carburised material (up to 0.8% C), which was covered by a layer of a less carburized material, from which the socket was also forged. The material is steel with a ferrite and pearlite structure and a heterogeneous carbon content (HB 183–318, 187–363, 192–341, the highest HB being found on the cutting edge). The cutting edges were tempered.

Meanwhile the spearheads and knives were forged from a single piece of iron. The hardnesses that were determined are associated with different metal structures and different production technologies.

Through the metallographic and elemental analysis, it was determined that the metal was produced in Marvelė). The iron ore mining process and the production of iron tools were ascertained to have existed in the immediate vicinity during the 3rd–5th centuries. The iron weapons and tools suggest that the majority of all of the examined artefacts are of local production with the exception of two spearheads that were possibly

imported (burials 1414, 1468). The highly trained craftsmen who worked at this location were very proficient smiths and managed to produce the tools and weapons of high quality.

LIST OF TABLES

Table 1. The elemental composition of Marvelė iron droplets no. 20070717/2 (polished surface no. 150) and no. 20070717/4 (polished surfaces no. 152, 153), wt. %.

Table 2. The chemical composition of Marvelė metallurgical slag, wt. %.

Table 3. The chemical composition of clinker no. 20070717/8 (analysis no. 303), wt. %.

Table 4. The results of the hardness measurements of axe 1405-K.

Table 5. The elemental composition of axe 1405-K, wt. %.

Table 6. The hardness measurements of axe 1414-K.

Table 7. The elemental composition of axe 1414-K, wt. %.

Table 8. The hardness of axe 1357-K in the longitudinal section.

Table 9. The generalised elemental composition of axe 1357-K, wt. %.

Table 10. The generalised results of the elemental analysis of spearhead 1405-I, wt. %.

Table 11. The generalised results of the elemental analysis of spearhead 1410-I, wt. %.

Table 12. The generalised results of the elemental analysis of spearhead 1414-I, wt. %.

Table 13. The generalised results of the elemental analysis of spearhead 1468-I, wt. %.

Table 14. The results of the elemental analysis of knife 1405-P, wt. %.

Table 15. The generalised data of the elemental composition of knife 1468-P, wt. %.

Table 16. The generalised results of the elemental analysis of buckle 1446-S, wt. %.

LIST OF ILLUSTRATIONS

Fig. 1. A 1950's map of Marvelė and Veršvai cemeteries in the Nemunas valley. The Kaunas city wastewater treatment plant has been built on part of Marvelė cemetery.

Fig. 2. Smelting slag with iron droplets (sample no. 20070717/4, polished, not etched). *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 3. Microstructure of an iron droplet (sample no. 20070717/4; polished surface no. 153): ferrite grains (light) and smelting slag (grey). Scanning electron microscope, samples etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 4. Microstructure of an iron droplet (sample no. 20070717/2; polished surface no. 150): ferrite grains (light), pearlite (light grey), and slag (dark). Light microscope, samples etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 5. Microstructure of an iron droplet (sample no. 20070717/4; polished surface no. 152): reduced iron grains (light) mixed with smelting slag. Light microscope, samples etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 6. Tap slag from Marvelė. Sample no. 20081210/2. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 7. General view and section of axe 1405-K: a – view from the wide side; b – longitudinal section 1405-K/1 (unhatched), arrangement of the large slag inclusions shown in the section; c – view of the longitudinal section; surface polished and etched with HNO₃ solution. Part (darker) of the carburised (up to 0.8%) blade was enhanced. *Photo by M. Bertašius.*

Fig. 8. Diagram of the microstructure of axe 1405-K and a graph of the blade's hardness: a – the microstructure and hardness measurement locations, b – a graph of the blade's hardness.

Fig. 9. Diagram of blade sample 1405-K/2 (microstructure shown in figure 10), with right and left seam pointed out.

Fig. 10. The blade microstructure of axe 1405-K: a – the axe edge: ferrite (light) with pearlite (grey), b – a forge weld (light with dark slag inclusions), c – central part of the blade (sorbite). Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 11. Metallurgical slag inclusions in the blade of axe 1405-K. Light microscope, sample not etched. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 12. General view and section of axe 1414-K: a – view from the wide side, b – longitudinal section 1414-K/1 (unhatched), the arrangement of the large slag inclusions is shown, c – a photo of the axe's longitudinal section. Section surface polished and etched with HNO₃ solution. The carburised (up to 0.8%) part (dark) of the blade is visible. *Photo by M. Bertušius.*

Fig. 13. Diagram of the microstructure of axe 1414-K and a graph of the blade's hardness: a – the microstructure diagram and hardness measurement locations, b – a graph of the blade's hardness.

Fig. 14. Microstructure of the cross section of the axe socket (sample 1414-K/3): 1 – socket interior (pearlite and ferrite), 2 – welding seam, 3 – rust, 4 – socket exterior (pearlite and ferrite). Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 15. General view and section of axe 1357-K: a – axe dimensions, b – photo of the axe's longitudinal section. Section surface polished and etched with HNO₃ solution. *Photo by M. Bertušius.*

Fig. 16. Microstructure diagram and hardness graph of axe 1357-K: a – the microstructure diagram and hardness measurement locations, b – a hardness graph of the blade.

Fig. 17. Structure of a blade sample from axe 1357-K: welding seams (light) joining the central and exterior parts of the axe; slag strands (dark) are visible. Sample polished and etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 18. General view of spearhead 1405-I.

Fig. 19. Diagram of the microstructure and micro-hardness measurements of spearhead 1405-I (enlarged about 5 times): a – on the blade (sample 1405-I/1), b – between the socket and the blade (sample 1405-I/2).

Fig. 20. A welding seam (light) in the blade microstructure of spearhead 1405-I. Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 21. General view of spearhead 1410-I: a – spearhead dimensions; b – photo of the longitudinal section through the socket. Sample polished and etched with HNO₃ solution. *Photo by M. Bertušius.*

Fig. 22. Diagram of the microstructure and micro-hardness measurements in the longitudinal section (sample no. 1410-I/1) of spearhead 1410-I.

Fig. 23. Microstructure of a cross section (sample 1410-I/2) of the spearhead's blade. The layered structure and slag inclusions as well as the impression of a micro-hardness measurement (dark square) are visible in the photo. Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 24. Microstructure of the spearhead's socket (sample 1410-I/3). Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 25. General view of spearhead 1414-I.

Fig. 26. Diagram of the microstructure of the spearhead's blade (sample no. 1414-I/3).

Fig. 27. Microstructure of the carburised layer of the spearhead's blade (sample no. 1414-I/3). The edge of the sample at the top of the photo. Light microscope, sample etched with HNO₃ solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 28. General view of spearhead 1468-I.

Fig. 29. Diagram of the microstructure and micro-hardness measurements of spearhead 1468-I: a – in the blade (sample 1468-I/1), b – in the socket (sample 1468-I/3).

Fig. 30. General view of knives 1405-P and 1468-P.

Fig. 31. Microstructure of knife 1405-P: ferrite and slag inclusions. Scanning electron microscope, sample etched with HNO_3 solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 32. Microstructure of knife 1468-P: ferrite (light), pearlite (mottled), and slag inclusions (dark). The impressions of a micro-hardness measurement are also visible. A difficult-to-see welding seam (\leftarrow), which is shown by a string of slag inclusions as well

as its elemental composition (see Table 15), was determined in the structure. Light microscope, sample etched with HNO_3 solution. *Photo by A. Selskienė.*

Fig. 33. General view of buckle 1446-S and the sampling location.

Fig. 34. Microstructure of the buckle's metal: a – pearlite – ferrite matrix, b – a forge weld. The forge weld (1) and micro-hardness measurement impression (2) are shown by arrows. Light microscope, sample etched with HNO_3 solution. *Photo by A. Selskienė.*

Mindaugas Bertašius
KTU, Filosofijos ir kultūrologijos katedra
Gedimino g. 43, LT-44240 Kaunas
el. paštas: mbertas@takas.lt

Jonas Navasaitis
KTU, Gamybos technologijų katedra
el. paštas: Kęstučio g. 27, LT-44312 Kaunas

Aušra Selskienė
Fizinių ir technologijos mokslų centro
Chemijos institutas
A.Goštauto g. 9, LT-01108 Vilnius
el. paštas: ausra@chi.lt

Gintautas Žaldarys
KTU, Gamybos technologijų katedra
Kęstučio g. 27, LT-44312 Kaunas
el. paštas: ginzald@ktu.lt

Gauta 2009 12 02