

# IRON SMELTING TECHNIQUES IN THE VIRBALIŪNAI ANCIENT SETTLEMENT

JONAS NAVASAITIS AND AUŠRA SELSKIENĖ

## Abstract

The rescue excavations of the Virbaliūnai ancient settlement have unearthed an iron production site of the middle of the first millennium AD. Nine slag-pit type furnace bottoms with the slaggy mass *in situ*, pieces of iron-smelting slag, potsherds and other finds have been excavated here. An attempt at a metallurgical interpretation of both the furnace structure and the iron smelting process at the site is discussed in this paper. The results of a metallographic examination of crude iron clot as well as the data from chemical analyses of the smelting slags are also presented here.

Key words: slag-pit furnace, iron smelting, crude iron, smelting slag, composition, microstructure.

## Introduction

Iron-making activity in Lithuania is demonstrated by evidence visible in archaeological investigations in various places in the country. Archaeological excavations have till now discovered the remains of about 60 iron-smelting furnaces in Lithuania. The great majority of finds date from the second to the sixth centuries AD, a period of relatively rapid growth in iron production by the Baltic tribes. Fifteen of them, including the furnaces found in the Virbaliūnai ancient settlement, are recognized to be slag-pit type bloomeries. The main characteristics of the slag-pit furnace remains, together with the finder's names, are listed in Table 1.

The slag-pit furnace was a more modern iron-smelting device, compared with the bowl-type furnace (an open hearth) that had been in use earlier on. An improvement

in the iron-smelting process was of great importance in providing a society with pig iron and consequently with iron weapons, tools and domestic implements. The provenance of the slag-pit furnace, however, is still obscure. According to Radomir Pleiner, the exactly dated slag-pit bloomeries from Central Europe belong to La Tène Period Culture, but their geographical distribution, reaching territories not inhabited by Celts, speaks for their Pre-Celtic origin (Pleiner 1994).

Archaeological investigations have revealed that the important iron-making districts in Poland also appeared in the La Tène Period (Bielenin 1978). The famous iron production centres were located in the Holy Cross Mountains. Some groupings of slag-pit furnaces have been discovered. However, the immediate Celtic influence in such a distant northern position, in the Teutonic ethnic milieu, is questionable, notes Pleiner

Table 1. Slag-pit furnaces found in Lithuania

	Archaeological site	Date, AD	Number of furnaces revealed	Internal diameter at the slag-pit top, in cm	Scholar and year of site investigation
1.	Aukštadvaris hill-fort, Trakai district	2 <sup>nd</sup> -4 <sup>th</sup> c.	2	18-24	V.Daugudis 1960 (Daugudis 1960, p.9.)
2.	Kerelian hill-fort, Kupiškis district	2 <sup>nd</sup> -3 <sup>rd</sup> c.	1	ca. 35	E.Grigalavičienė, 1984 (Grigalavičienė 1985, p.33ff.; 1986)
3.	Kernavė, Pajauta valley, Širvintos district	3 <sup>rd</sup> -4 <sup>th</sup> c.	1	28-34	A.Luchtanas 1984 (Luchtan 1987)
4.	Kernavė, Semeniškės settlement, Širvintos district	2 <sup>nd</sup> -3 <sup>rd</sup> c.	1	ca. 32	V.Ušinskas and G.Karnatka 1990 (Ušinskas & Karnatka 1991)
5.	Lazdininkai (Kalnalaukis) settlement, Kretinga district	Before the 3 <sup>rd</sup> c.	1	ca. 45	D.Butkus and J.Kanarskas, 2001 (Butkus 2001, p.16, Fig. 31)
6.	Virbaliūnai ancient settlement, Kaunas district	4 <sup>th</sup> -5 <sup>th</sup> c.	5 1 1 1 1 oval	30-35 ca. 55 ca. 46 38-40 26-45	A.Žalnierius and D.Balčiūnas 2005 (Žalnierius 2006)

(1994). The slag-pit furnaces were spreading more to the north, and at the beginning of the first millennium AD reached the Baltic tribes. The slag-pit furnaces found in Lithuania are very similar to those in the countries of Central Europe in the La Tène Period: the Holy Cross Mountains in Poland, Podbořany in north Bohemia, and others (Navasaitis 2003). La Tène slag-pit furnaces were rather small: the remaining slag blocks were of some 20 kilograms in weight (Pleiner 1994).

This paper presents a metallurgical interpretation of the iron-smelting furnaces of the slag-pit type excavated in the Virbaliūnai ancient settlement. The composition of iron-smelting slag and the characteristics of the small pig iron pieces found in the slag are also discussed here.

### Structure and operation of the furnace

Iron-smelting techniques in the ancient Virbaliūnai settlement are evident by the remains of several smelting furnaces, metallurgical slag and structural materials visible in the excavated site. Excavations have revealed nine well-preserved slag-pit type furnace bottoms with the slaggy mass *in situ* (Fig. 1a). An exhaustive description and pictures of the findings are presented by Algirdas Žalnierius' and Dainius Balčiūnas' article in this volume. The furnaces are rather small about 30 to 40 centimetres in internal diameter with sand-clay walls up to 20 centimetres thick at ground level. Only two of them reach from 45 to 55 centimetres in internal diameter, with the wall thickness being up to 30 cen-

timetres. Wall thickness has a great influence on the smelting process. Fairly thick walls prevent the heat from escaping from a furnace, and help to maintain the reducing conditions necessary for the extraction of iron from the ore. In addition, the furnace walls have to possess good refractory qualities and they must be strong enough to avoid damage during the smelting process.

The analyses of the material used for the furnace walls have revealed that the walls were made of a mixture prepared of silica sand and a certain proportion of clay (Table 2). Clay acts as a binding agent around the silica grains, and sustains the good strength of a mix. The composition of both the furnace walls and the smelting slag was determined by optical emission spectroscopy, using a DC plasma emission spectroscope, Beckman SpectraSpan VI. Three furnace wall samples were analysed: a grey wall (sample No 14/15A), a black wall (sample No 14/15B) and a baked red wall (sample No 14/15C). The chemical composition of the furnace walls is shown in Table 3. It is interesting to note the presence of pebbles and charcoal dust in a structural blend. The high proportion of silica sand and the small amount of clay (about 9%) in the mix, with admixtures of pebbles and charcoal dust, indicate a deliberately prepared structural material demonstrating high refractory qualities.

There are no indications of the full height of the furnaces. The site was adversely affected by agricultural activities in recent centuries, and the furnace shafts were badly damaged. However, the excavated fragments of the shafts suggest that they were probably from 70 to 100 centimetres tall (Fig. 1b).

Table 2. Analyses of structural material used for the furnace walls, wt %

Characteristics	Granularity									Clay	Total
	5	2.5	1.0	0.63	0.4	0.2	0.1	0.05	The rest		
Sieve mesh, mm	5	2.5	1.0	0.63	0.4	0.2	0.1	0.05	The rest		
Grain size, mm	≥ 5	2.5-5.0	1.0-2.5	0.63-1.0	0.4-0.63	0.2-0.4	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05	≤ 0.022	
Content, wt %	5.5	11.0	14.3	16.5	18.0	19.3	3.9	1.5	0.8	9.0	99.8

Table 3. Chemical composition of the furnace walls, wt %

Furnace wall	Sample No.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	BaO	Total	Charcoal dust*
Grey	14/15 A	6.12	74.27	10.98	1.06	0.45	0.11	1.48	3.88	0.61	0.56	0.18	99.69	0.42
Black	14/15 B	6.09	71.57	12.12	1.30	1.02	0.15	1.76	4.25	0.55	0.56	0.08	99.45	0.88
Baked red	14/15 C	5.68	71.84	11.93	1.37	1.25	0.21	1.32	3.91	0.65	0.56	0.08	98.80	n.d.

\* Above 100%

n.d. – not detected

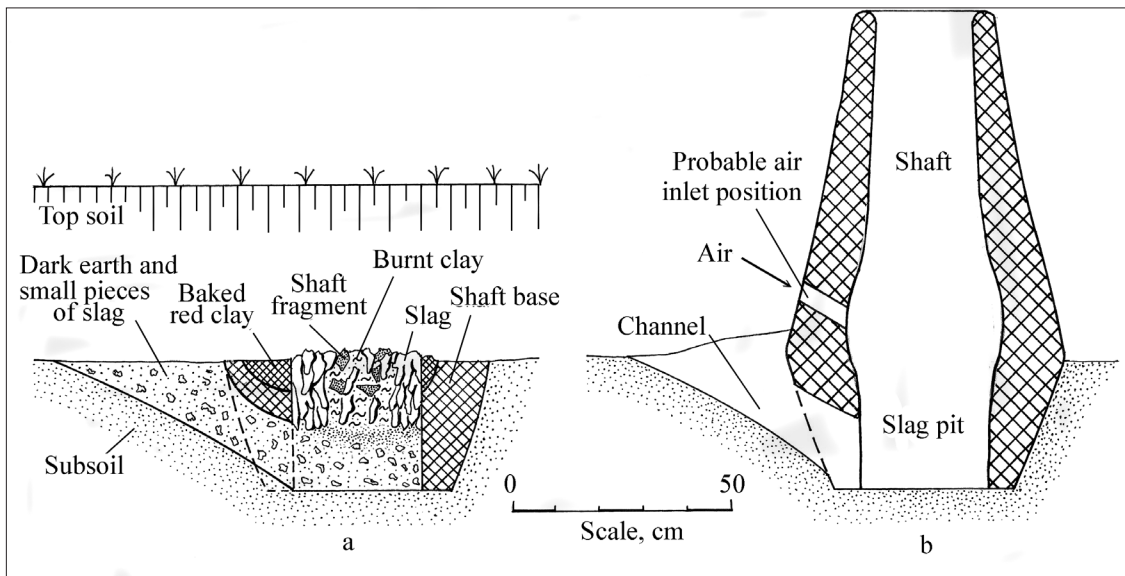


Fig. 1a-b. Reconstruction of the slag-pit furnace: a remains of furnace No 7, in Virbaliūnai settlement and its section; b probable reconstruction of the furnace (after Navasaitis).

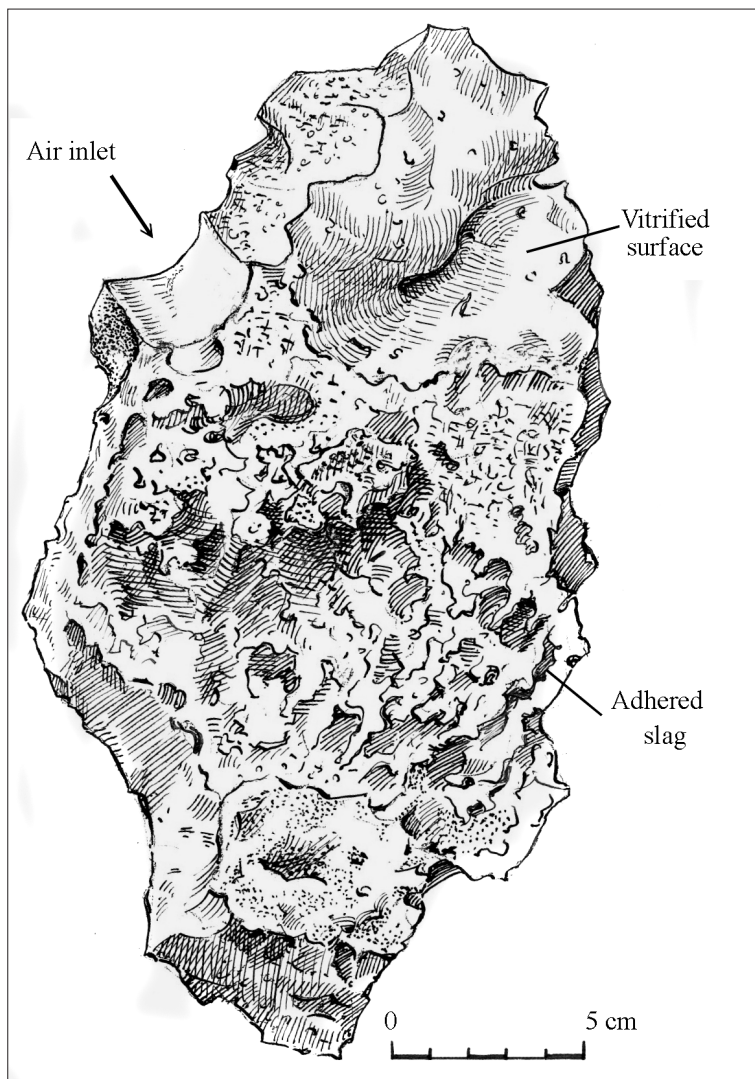


Fig. 2. Air inlet in the furnace wall (drawing by V.Trečiokienė).

The surviving furnace remains reach about 20 to 35 centimetres' depth. The layer of heavy burnt red clay up to five centimetres thick on the internal surface of a shaft indicates the location of a combustion zone. In other words, it shows the area of the hearth in a furnace (see the pictures in the paper by A. Žalnierius and D. Balčiūnas in this volume). Unfortunately, no upper part of the hearth has survived; merely its lower parts are evident.

During the smelting process air was blown through air inlets of about four centimetres in diameter placed several centimetres above ground level. Half an air inlet aperture has been found in one fragment of a furnace wall (Fig. 2). This fragment, with both adhered iron-smelting slag and the trace of an air inlet, was found at the top of the slag pit of furnace No 49. Unfortunately, the shaft of the furnace was destroyed and the air inlet had lost its initial position in the furnace. Analogous air inlets were documented by K. Bielenin (1993), P. Crew (2001), A. Espelund (1989) and others. No trace of any tuyère has been found in the site, however, the air inlet indicates that the furnaces appear to have been operated with bellows.

Each furnace was equipped with an inclined channel leading to a slag

pit (Fig. 1a). The channel might have served as an air duct during the furnace drying and preheating processes, or, possibly, for other technological purposes. In all probability, the furnaces from Virbaliūnai represent the type known as “Kotlinka Świętokrzyska 1”. These furnaces were also equipped with a channel leading to a slag pit and were popular in the Holy Cross Mountains in Poland in the Romano-Barbarian Period (Bielenin, Woyda 1978). All the channels were found filled up with dark earth containing small pieces of slag. Most probably, the channels were filled prior to the ore smelting. The same earth was also found in the furnace bottoms, ie in the slag pits. Furthermore, some tap slag pieces found in the slag pits contained the remains of undecayed wood and bark (Fig. 3). In all probability, they indicate that prior to the smelting process the slag pits were filled with brushwood or the like, and the slag was allowed to drain into the space existing between the pieces of wood.

The amount of *in situ* slag in each slag pit was from 12 to 16 kilograms. Some slag pieces were scattered on the ground around the furnaces. A small amount of slag, undoubtedly, indicates an iron-smelting furnace of low capacity. Nevertheless, the calculations show that some 18 to 20 kilograms of bog ore could be smelted in those furnaces, producing some 1.5 to two kilograms of iron. A smelting run could take from six to eight hours, or even longer. Such an iron bloom represented either three or four socketed axes, or four to six spearheads, or 40 to 60 medium knives. It was a great treasure at that time.

### Smelting slag and smelted iron

During the smelting process, iron is produced together with slag, which is atmosphere resistant and stays unchanged for a very long time. The slag contains non-reduced oxides, such as FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and many others. It also contains flux materials and fuel ashes. The composition of the smelting slag depends on the process used for the extraction of iron from the ore. Hence, slag analyses can provide us with important information on iron-making techniques, raw materials and the technological parameters of the smelting process.

The results of the analyses of the slag samples are given in Table 4. The composition of the tap-slag samples

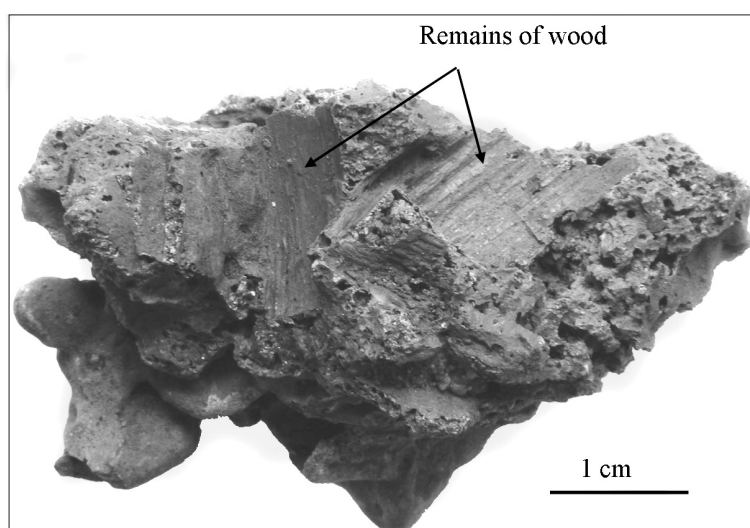


Fig. 3. Smelting slag containing remains of wood (photograph by Selskienė)

prove them to be typical iron-smelting slag formed in a direct iron-making process. As expected, the main phase in these slags is fayalite formed of iron and silicon oxides (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). The overall quantities of combined iron in the examined tap-slag samples (14/5A, 14/9A and 14/19A) vary from 41.6% to 51.4%. The Virbaliūnai bloomery slag, according to its iron content, bears a resemblance to the other slag-pit furnace slag (iron content varies from 40.5% to 61.1%) found in Lithuania (Navasaitis 2003). The bloomery slag from many other countries shows analogous results (Paynter 2006; Piaskowski 1992; Morton and Wingrove 1969). A rather high phosphorus content in slag (4.62% to 6.89%) indicates that ore rich in phosphorus was smelted in the Virbaliūnai furnaces.

The light porous slag (sample No 14/19C) demonstrates an extremely high silicon oxide content (about 78%), but it has a low quantity of iron oxide (about 4.4%). It is supposed that this piece of slag was formed from the furnace wall, or the lining material.

Analyses of the small iron clots found in smelting slag present some data on the quality of the iron produced. X-ray energy dispersive (EDX) and wave dispersive (WDX) spectral analyses were used to determine the chemical composition of iron clots. Polished samples were examined using a scanning electron microscope EVO 50 XVP (Carl Zeiss SMT AG) with WDX and EDX spectrometers (Oxford instruments). For metallographic analyses, a light Olympus BH2 microscope was also used. The chemical composition of sample No 14/7 is shown in Table 5. The metallographic analysis revealed rather high carburisation of iron (Fig. 4). In different areas of the clot, the carbon content varies from about 0.2% to 0.7% C. The prevailing phase of a microstructure in a certain area of the clot (Fig. 4a)

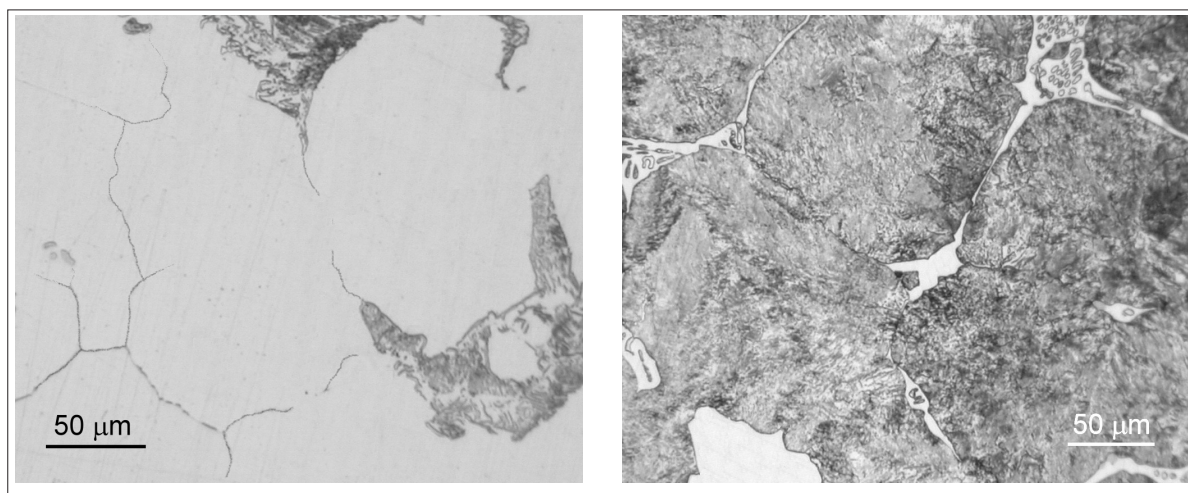


Fig. 4. Metallographic analyses of iron clot No 14/7: a ferrite grains (light) with some pearlite (grey), etched 3% Nital; b pearlite grains (grey), ferrite grains (white) and phosphide eutectic (variegated), etched 3% Nital (photographs by Selskienė)

is ferrite (white) with some pearlite grains (variegated grey), while the prevailing phase in another area of the sample is pearlite (grey) with some ferrite grains (white) in a pearlite matrix (Fig. 4b). The microstructure demonstrates that sample material to be hypoeutectoid steel. Hence, it could be hardened by means of quenching. Therefore, undoubtedly, this steel was suitable for tool and weapon production. It should be noted that the Polish scientist Jerzy Piaskowski has proposed that the Baltic tribes developed considerably iron production in the first to the fifth centuries AD. They mas-

tered the carburization of part of the produced blooms up to 0.8% C (Piaskowski 2002). Were the Virbaliūnai furnaces an installation of this kind? “Making the axes, they forged the bloom in such a way that the cutting edge was formed of the carburised part of the bloom. The axes were quenched and tempered” (Piaskowski 2002). Analyses of the element concentration revealed a high amount of phosphorus (0.9% P on average) in the clot. The high phosphorus content resulted in the phosphide eutectic observed in the pearlite matrix of the specimen (Fig. 4b). It should be noted that the high

Table 4. The chemical composition of selected smelting slag samples from Virbaliūnai, wt %

Sample	Sample No	Fe <sub>tot</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	BaO	Total
Tap-slag	14/5 A	41.6	53.53	31.81	3.30	3.78	4.62	1.70	0.77	1.60	0.30	0.38	0.02	101.8
Tap-slag	14/9A	51.4	66.18	20.23	2.13	4.24	5.61	0.69	0.70	1.24	0.14	0.00	0.22	101.4
Tap-slag	14/19A	45.0	57.88	24.58	2.76	6.13	6.89	0.96	0.75	1.64	0.22	0.08	0.32	102.2
Light porous slag	14/19C	3.45	4.44	77.93	9.32	1.06	0.30	0.09	1.13	3.93	0.71	0.51	0.08	99.5

Table 5. The chemical composition of iron clot No 14/7 found in smelting slag, wt %

Phase	C*	P	As	S	Co	Mn	Si	Fe
Ferrite	0.005	0.6-1.3	0.23	0.02	0.12	b.d.	b.d.	the rest
Pearlite	0.8	0.55	0.20	0.01	0.13	b.d.	b.d.	the rest
Average	0.3	0.9	0.22	0.02	0.12	b.d.	b.d.	the rest

\* calculated from microstructure

b.d. – below detection limit

phosphorus content in the sample tends towards an increasing steel brittleness, thus hampering the possibilities of its application. However, there is no data on how the microstructure of iron clots correspond to the whole smelted iron lump.

### Acknowledgements

The authors are very grateful to the archaeologists Algirdas Žalnierius and Dainius Balčiūnas for their invitation to participate in the investigations of this interesting object. Verutė Trečiokienė kindly helped in preparing some illustrations for this paper.

Translated by Jonas Navasaitis

### References

#### Manuscripts

- BUTKUS, D., 2001. Lazdininkų (Kalnalaukio) senovės gyvenvietės ir kapinyno (Darbėnų sen., Kretingos raj.) 2000 m. archeologinių tyrinėjimų ataskaita. *Kretinga. In: Lithuanian Institute of History*, LII F.1, b. 3667.
- CREW, P., 2001. Innovation in Furnace Design and Technology – the Refractory Materials from Laxton. Poster presented to conference “*The introduction of Iron in Eurasia*”, October 2001. Uppsala.
- DAUGUDIS, V. 1960. Aukštadvario piliakalnio (Trakų r.) tyrinėjimų 1960 m. ataskaita. Grafinė medžiaga. *In: Lithuanian Institute of History*, LII AS, Nr.1069, pl.9.
- GRIGALAVIČIENE, E. 1985. Kerelių, Kupiškio raj., piliakalnio 1984 m. kasinėjimų ataskaita. *In: Lithuanian Institute of History*, LII F.1, b.1164.
- UŠINSKAS, V., KARNATKA G. 1991. Kernavės archeologijos ir istorijos rezervatinio muziejaus teritorijos ir jo apylinkių žvalgomieji tyrimai. Ataskaita. *In: Lithuanian Institute of History*, LII F.1, b. 1805.
- ŽALNIERIUS A., 2006. Virbaliūnų senovės gyvenvietės (Kauno raj.) 2005 m. archeologinių tyrinėjimų ataskaita. T.1 (Ataskaita, radinių piešiniai, tyrinėjimų foto fiksacija). Kaunas. *In: Lithuanian Institute of History*, LII F.1, b. 4575.

#### Literature

- BIELENIN, K., 1994. Der Rennofen vom Typ Burgerland in der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung in Mitteleuropa. *In: M.MANGIN, ed. La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, colloque de Besançon*, 10-13 Novembre 1993. Paris, 255-267.
- BIELENIN, K., WOYDA, S., 1978. Zwei Eisenverhüttungszentren des Altertums im Weichselbogen (1 Jh. v.u.Z. – 4 Jh.u.Z.). *In: Eisen + Archäologie. Eisenbergbau und -verhüttung vor 2000 Jahre in der VR Polen*. Deutsches Bergbau-Museum Bochum, 25-55.
- ESPELUND, A., 1989. The Operation of Bloomery Furnaces from AD 0-500 in Mid-Norway. *In: R.PLEINER, ed. Archaeometallurgy of iron. International Symposium Liblice*,

- 5-9 October 1987. Prague: Archaeolog. Inst. CSAV, 169-189.
- GRIGALAVIČIENE, E. 1986. Kerelių piliakalnio tyrinėjimai. *In: Archeologiniai tyrinėjimai Lietuvoje 1984 ir 1985 metais*. Vilnius, 24-27.
- LUCHTAN, A.B. 1987. Selishche v Kernave na beregu r. Neris. *Istorija*, 28, 3-21.
- MORTON, G.R. AND WINGROVE, J., 1969. Constitution of Bloomery Slags: Part I: Roman. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 207,1556-1564.
- NAVASAITIS, J., 2003. Traces of Slag-pit Furnaces in Lithuania. *In: Archaeometallurgy in Europe*. Proceedings of the international Conference 24-26 September 2003, Milan: Vol. 1. Milan: Associazione Italiana di Metallurgia, 517-523.
- PAYNTER, S., 2006. Regional Variations in Bloomery Smelting Slag of The Iron Age and Romano-British Periods. *Archaeometry*, 48, 2, 271-292.
- PIASKOWSKI, J., 1992. Hutnictwo i odlewnictwo. *In: B. ORŁOWSKI, ed. Z Dziejow techniki w dawnej Polsce*, Warszawa: IHNOiT, 17-135.
- PIASKOWSKI, J., 2002. The Development of the Iron and Steel Technology on the Territory of Poland in Ancient and Mediaeval Times. *In: H.-J. BRAUN, A. HERLEA, eds. Proceedings of the XXth International Congress of History of Science*, Liege, 20-26 July 1997. Vol. XV. Materials: Research, Development and Applications. Turnhout: Brepols, 195-210.
- PLEINER, R., 1994. Early Bloomeries in Central Europe. *In: M. MANGIN, ed. La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen: archéologie et archéométrie*, Actes du Colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993. Annales littéraires de l'Université de Besançon, 536, 181-188.

Received: 10 December 2006; Revised: 22 May 2007

## GELEŽIES LYDYO TECHNOLOGIJA VIRBALIŪNŲ SENOVĖS GYVENVIETĖJE

**Jonas Navasaitis, Aušra Selskienė**

### Santrauka

Straipsnyje pateikiami Virbaliūnų senovės gyvenvietės archeologinių geležies lydymo radinių: rudnelių sienelių, lydymo šlako ir išlydytos geležies gabalėlių tyrimo duomenys. Remiantis šiais duomenimis pamėginta atkurti naudotų rudnelių konstrukciją bei paaiškinti geležies lydymo technologiją. Išsamus radinių archeologinis vertinimas su gausiomis iliustracijomis yra pateiktas šiame leidinyje A. Žalnieriaus, J. Navasaičio ir D. Balčiūno straipsnyje „Geležies lydymo vieta Virbaliūnų senovės gyvenvietėje“.

Lietuvoje iki šiol yra rasta apie 60-ties rudnelių liekanų (1: a–b pav.). Daugelis jų siekia II–VI a. Penkiolika rudnelių, tarp jų ir rastosios Virbaliūnų senovės gyvenvietėje, priklauso tipui rudnelių, po žaizdru turėjusių

šlako duobę, į kurią sutekėdavo lydymo metu susidaręs šlakas. Lietuvos teritorijoje rastų šio tipo rudnelių pagrindinės charakteristikos yra nurodytos 1 lentelėje.

Rudnelių, turinčių šlako duobę po žaizdu, kilmė, deja, nėra aiški. Radomiras Pleineris nurodo, kad tiksliai datuotų šių rudnelių, siekiančių La Tène kultūros periodą, yra rasta Vidurio Europoje. Tačiau manoma, kad jos buvo žinomos dar iki keltų. La Tène periodu šio tipo rudnelės pasirodė ir dabartinės Lenkijos teritorijoje. Jų liekanų rasta to meto geležies gavybos centruose Šventojo Kryžiaus kalnuose. Plisdamos į šiaurę šios rudnelės pasiekė ir baltų kraštus.

Virbaliūnų senovės gyvenvietėje buvo rastos palyginti neblogai išsilaikiusios 9-ių rudnelių apačios. Tai rudnelių šlako duobės su jose likusiu in situ lydymo šlaku (1 a pav.). Daugumos rudnelių vidinis skersmuo siekė apie 30–40 cm, o šachtų sienelių storiai ties buvusiu žemės paviršiumi – iki 20 cm. Dvi rudnelės buvo kiek didesnės, turėjusios nuo 45 iki 55 cm vidinį skersmenį ir iki 30 cm storio šachtų sienelės. Rudnelių sienelės buvo plūktos iš smėlio ir molio mišinio. Granulimetrinė jo sudėtis pateikta 2 lentelėje, o 3 lentelėje nurodyta sienelių mišinio cheminė sudėtis. Kad mišinys būtų pakankamai atsparus kaitrai, molio kiekis jame siekia vos 9%. Be molio, į mišinį taip pat pridėta šiek tiek smulkaus žvirgždo bei maltų (?) medžio anglių. Šie priedai didina mišinio atsparumą kaitrai ir stiprumą. Įdomu, kad senovės metalurgai žinojo, kokiomis priemonėmis siekti rudnelių sienelių stiprumo ir atsparumo kaitrai.

Apie rudnelių aukštį galima spręsti tik iš negausių šachtos fragmentų bei analogijos su kitomis šio tipo rudnelėmis. Tikėtina, kad jos buvo apie 70–100 cm aukščio (1 b pav.). Išlikęs šlako duobių gylis siekė nuo 20 iki 35 cm. Viršutinėje duobių dalyje buvo aiškiai matomas perdegusio raudono molio sluoksnis, rodantis rudnelės žaizdro zoną, kurioje lydymo metu vyko intensyvus medžio anglių degimas. Beje, išliko tiksliai apatinė žaizdro dalis, nes visų rudnelių viršutinės dalys buvo apgadintos vėlesniais laikais dirbant žemę. Tačiau 49-oje rudnelėje išliko sienelės fragmentas su 4 cm skersmens apskritos angos dalimi (2 pav.). Neabejotinai per šią angą į rudnelę dumplėmis buvo pučiamas oras, reikalingas medžio anglims degti. Nors šis sienelės fragmentas buvo išjudintas iš tikrosios savo padėties, tačiau tikėtina, kad anga buvusi įrengta keliolikos centimetrų aukštyje virš tuometinio žemės lygio ir buvo pasvirusi apie 30° į vidinę rudnelės pusę (1 b pav.).

Kiekvienoje rudnelėje buvo įrengtas kanalas, vedantis nuo buvusio žemės paviršiaus gilyn į rudnelės šlako duobę (1 a ir b pav.). Tikėtina, kad šiuo kanalu patekdavo oras, reikalingas kurui duobėje degti rudnelę

džiovinant ar kaitinant prieš lydymą. Be to, šis kanalas galėjo turėti ir kitą, dar neišaiškintą technologinę paskirtį. Reikia pažymėti, kad Virbaliūnų rudnelės yra panašios į Šventojo Kryžiaus kalnuose (Lenkijoje) rastas rudnelės, taip pat turėjusias į šlako duobę vedantį kanalą. Ten tokia rudnelė buvo pavadinta „Kotlinka Świętokrzyska 1“. Spėjama, kad rudnei išdžiūvus ir įkaitus, žarijos šlako duobės dugne ir kanalas būdavo užpilami žeme, o į duobę dar būdavo prikraunama žabų ar kitokios medienos, kad lydoma rūda ir medžio anglis laikytųsi virš duobės. Tuo tarpu skystas šlakas laisvai galėjo sutekėti į tarpus tarp žabų. Mediena duobėje dėl oro stokos nesudegdavo, tiksliai apanglėdavo. Šią prielaidą patvirtina nesudegusios ir nesudūlėjusios medienos liekanos, aptiktos keliuose šlako gabaluose (3 pav.).

Rudnelėje lydymo proceso metu redukuojasi rūda ir išsiskiria geležis. Kartu iš bergždžiųjų rūdos uolienu, kuro pelenų, flisų ir apsilydžiusių rudnelės sienelių susidaro daug patvaraus šlako. Be to, rudnelių šlake lieka neredukuotų geležies junginių. Taigi šlako sudėtis gali daug pasakyti apie geležies lydymo technologiją, naudotą rūdą, kurą ir flisus. Virbaliūnų rudnelių šlako tyrimai parodė, kad tai yra tiesioginei geležies gavybai būdingas šlakas (4 lentelė). Kaip ir tikėtasi, pagrindinę šlako fazę sudaro fajalitas, t. y. geležies ir silicio oksidų junginys ( $Fe_2SiO_4$ ). Aptiktas geležies kiekis tekiojo šlako bandiniuose svyruoja tarp 41,6% ir 51,4%. Pagal šlake likusį geležies kiekį šie bandiniai yra labai panašūs į kitus Lietuvoje rastų rudnelių šlakus. Pavyzdžiui, tekiuosiuose rudnelių šlakuose, paimtuose iš šlakduobių, rastas geležies kiekis kinta ribose nuo 40,5% iki 61,1%.

Palyginti didelis fosforo oksido kiekis šlake (4,62–6,89%) rodo, kad Virbaliūnų metalurgai geležį lydė iš fosforingos rūdos. Lengvas purus šlakas greičiausiai susidarė iš apsilydžiusios rudnelės sienelės, nes jame vyrauja silicio oksidas (apie 78%), taip pat yra aliuminio oksido (9,32%), kalio oksido (3,93%) ir šiek tiek geležies (3,45%).

Mažas šlako kiekis rudnelių duobėse (apie 12–16 kg) rodo, kad jų našumas buvo nedidelis. Tiesa, reikia taip pat įvertinti ir nuardyto viršutinės duobių dalies šlako, pasklidusio aplink rudnelės, masę. Skaičiavimai rodo, kad Virbaliūnų rudnelėse per maždaug 6–8 val. trukmės lydymą galėjo būti sunaudojama apie 18–20 kg balų rūdos ir gaunama apie 1,5–2,0 kg geležies, iš kurios buvo galima nukalti 3–4 įmovinius kirvius arba 4–6 ietigalius, arba 40–60 vidutinio dydžio peilių.

Rudnelėse išlydytos geležies kokybę bent apytikriai galima vertinti analizuojant smulkius geležies gabalėlius, rastus lydymo šlakuose. Gabalėlio Nr. 14/7 cheminė sudėtis pateikta 5 lentelėje. Metalografiniai

tyrimai parodė palyginti didelį, tačiau netolygų geležies išianglinimą (maždaug nuo 0,2 iki 0,7% C). Mažai įanglintose bandinio dalyse vyrauja feritas (4 a pav.), o gausiai įanglintose vietose matome vyraujančią perlitą (4 b pav.). Bandinio sudėtis ir mikrostruktūra rodo, kad tai yra priešeutektoidinis plienas, tinkamas įrankiams, ginklams ir kitiems dirbiniams gaminti. Tačiau jame esantis nemažas fosforo kiekis (vidutiniškai 0,9%) didina plieno trapumą ir riboja jo naudojimo galimybes.