

Radwan, Mieczysław / Pleiner, Radomir

Polsko-czechosłowackie doświadczenia wytopu żelaza w dymarkach z okresu rzymskiego

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 7/3, 307-320

1962

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



RADOMIR PLEINER
MIECZYŚLAW RADWAN

**POLSKO-CZECHOSŁOWACKIE DOŚWIADCZENIA WYTOPU
ŻELAZA W DYMARKACH Z OKRESU RZYMSKIEGO ***

Badania technologiczne procesów najstarszego hutnictwa żelaza przy zastosowaniu nowoczesnych metod technicznych pozwalają bliżej poznać dzieje jednego z przełomowych ongiś odkryć ludzkich — metalurgii. Starannie prowadzone terenowe badania archeologiczne dostarczają szczątków urządzeń produkcyjnych; ich dokumentacja umożliwia mniej lub bardziej prawdopodobną rekonstrukcję obiektów; studia porównawcze i typologiczne informują o stosowaniu różnych typów urządzeń w poszczególnych okresach historycznych i w poszczególnych krajach; nowoczesne chemiczne, petrograficzne, paleobotaniczne i inne analizy i pomiary dają niezwykle cenny materiał dla stwierdzenia właściwości urządzeń (analiza materiałów budowlanych i polepy) oraz surowców, jakie zostały użyte (ruda, węgiel); wreszcie dla poznania procesu produkcyjnego wykorzystuje się obok elementów konstrukcyjnych pieców przede wszystkim rezultaty uzyskane przez badanie wytworów i produktów odpadowych w postaci żużli metalurgicznych. Wydawałoby się więc, że mamy wystarczająco konkretne wiadomości umożliwiające rekonstrukcję procesów produkcyjnych u Celtów, Germanów, w wysoko rozwiniętych cywilizacjach śródziemnomorskich czy wreszcie u Słowian — i to w sposób nie budzący wątpliwości. A* przecież właśnie przy procesie technologicznym wypada często sprawdzić, czy to lub inne zjawisko pojmujemy poprawnie, czy mamy prawo posługiwać się jego interpretacją we wnioskach historycznych? Najczęściej sięga się wówczas do analogii etnograficznych — afrykańskich lub orientalnych, które istotnie dają dobre porównania dla problemów cząstkowych. Podsta-

* Inna wersja tego artykułu, napisanego przez dra R. Pleinera z Instytutu Archeologicznego Czechosłowackiej Akademii Nauk (Praga) i doc. M. Radwana (Kraków), ukazuje się jednocześnie po czesku w „Archeologické Rozhledy“.

wowa trudność polega jednak na tym, że współczesne urządzenia produkcyjne u ludów mało rozwiniętych — aczkolwiek są niekiedy bardzo podobne do przedhistorycznych znalezisk europejskich i czasem dają możliwość zasadniczej informacji — nie są jednak identyczne ze starymi obiektami, a sposób ich budowy oraz przebieg w nich produkcji podlegały najprzeróżniejszym wpływom cywilizacyjnym.

Nic więc dziwnego, że w dziejach archeologii stosunkowo wcześniej pojawił się pomysł odtworzenia konstrukcji starych europejskich pieców do wytapiania żelaza i przeprowadzenia w nich próbnym wytopów dla potwierdzenia wypowiedzianych przypuszczeń czy teorii. Tak powstała idea eksperymentu w archeologii. Nie mogąc tego zagadnienia szerzej omawiać, odsyłamy zainteresowanych do specjalnego studium¹, w którym bardziej szczegółowo zajęto się problematyką przydatności i możliwości wykorzystywania takich doświadczeń. W dziedzinie badań nad najstarszą technologią doświadczenia praktyczne mają wielkie zastosowanie pod warunkiem jednak, że ich wyniki oceniane będą ostrożnie i rzeczowo. Doświadczenie oparte na określonej interpretacji źródeł archeologicznych (niekiedy bardzo ułamkowych), przeprowadzone z wynikiem pozornie pomysłnym, nie musi oznaczać, że rzeczywistość była ongiś istotnie taka, jak ją sobie dziś wyobrażamy. I odwrotnie, kiedy doświadczenie się nie uda z powodu wyraźnego braku zręczności w pracy, zręczności dziedziczonej ongiś przez całe pokolenia, i to pomimo że dzisiaj jesteśmy wyposażeni w wiadomości teoretyczne — nie jest to jeszcze powodem dla odrzucenia wyników wszechstronnej analizy archeologicznej. Podstawowe znaczenie praktycznego doświadczenia tkwi w tym, że nieodzownie stawia nasz sposób myślenia i nasze kombinacje logiczne na realnym gruncie, i w rezultacie prowadzi do większej ścisłości metod pracy archeologicznej. Odpowiada więc ono tendencjom archeologii i historii w ogóle.

DOTYCHCZASOWE DOŚWIADCZENIA NAD PRYMITYWNYM HUTNICTWEM ŻELAZA

Już w 1877 r. próbował hrabia Wurmbrandt wytapiać żelazo w prostym ognisku o średnicy 150 cm według śladów odsłoniętych w Hüttenberg (Austria). Użył on węgla drzewnego i rudy prażonej bez topnika, stosując słaby dmuch. W ciągu 26 godzin wytopił około 6 kg kowalnego żelaza zdatnego do użytku. Niestety to uwieńczone powodzeniem doświadczenie pozostało bez właściwej dokumentacji². W roku 1956 opu-

¹ R. Pleiner, *Experiment v archeologii*, „Památky Archeologické“, Praha 1961, t. III, s. 616—622.

² G. Wurmbrandt, *Beiträge zur Frage über Gewinnung des Eisens und Bearbeitung von Bronzen*, „Correspondenzblatt“ München 1877, nr 10, s. 152.

blikowano w Belgii doświadczenia Sadzota przeprowadzone w różnych typach pieców i w ogniku redukcyjnym. Bez dmuchu udało się mu uzyskać jedynie małe kawałki żelaza, a i to tylko wówczas, gdy średnica piecyka nie przekraczała 30 cm. Przy sztucznym dmuchu i przy użyciu topnika uzyskał natomiast Sadzot łupkę ważącą około 5 kg³.

Dobrze przygotowane doświadczenie z otwartą dyszą wytopową przeprowadzili niedawno w Anglii Wynne i Tylecote⁴. Laboratoryjne urządzenie miało rozmiary przedhistorycznych znalezisk (średnica 27 cm, głębokość 18 cm, dysze o średnicy $\frac{1}{4}$ " do $\frac{1}{2}$ "). Mierzono przy tym ilość włączanego dmuchu, a rudę wyprażono. Najlepsze rezultaty badacze angielscy osiągnęli, układając namiar zawczasu, przy tym przed dyszą węgiel, a dalej — rudę. Uzyskali oni w ten sposób żelazną łupkę (uzysk ok. 20%, temperatura w ognisku około 1100°), żelazo skupiało się jednak przed dyszą, co powodowało wielkie straty przez jego utlenianie i przejście do żużła. Żużła zawczasu nie wypuszczano. Przy zastosowaniu dwóch dysz żelaza metalicznego nie otrzymano. Nakrycie otworu wyspowego, tj. zamiana ogniska na piec, wpłynęło bardzo dodatnio na proces.

Znamienne były doświadczenia z szybowym piecem typu lateńskiego w zachodnich Niemczech (typ Minnerbach, wysokość 172 cm, średnica dolnej części pieca 90 cm, otworu wyspowego — 40 cm). J. W. Gilles⁵ przeprowadził ogółem dwa doświadczenia. Przy obu stwierdzono, że piec szybowy pracuje dobrze już przy naturalnym dmuchu i otrzymano grudki metalu zatopione w żużlu. Po rozkruszeniu żużla na separatorze magnetycznym wydzielono metal zredukowany, który następnie stopiono. Wytop trwał 30 godzin, zużyto 209 kg węgla i 162 kg rudy skałkowanej. Uzyskano łupkę o 17,4 kg żelaza (uzysk 11,5%). Na poziomie dyszy temperatura wynosiła 1280—1420°, podczas gdy w gardzieli jedynie 250°. Pierwszy żużel spuszczone po 10 godzinach od uruchomienia.

W roku 1958 J. W. Gilles przeprowadził jeszcze inne doświadczenia,

³ J. Sadzot, *Les debuts de la fabrication du fer*, „Industrie, revue de la Fédération des industries belges“, t. X, 1956 r., s. 564.

⁴ E. J. Wynne, R. F. Tylecote, *An experimental investigation into primitive iron-smelting technique*, „Journal of Iron and Steel Institute“, London 1958, t. 190, s. 338—348. W związku z tym należy przypomnieć, że w tym samym czasie pierwsze doświadczenia przeprowadził z podobną aparaturą M. Radwan. Opowiada on te doświadczenia w artykule *Wzloty i upadki polskiego hutnictwa żelaznego*, „Przegląd Naukowo-Techniczny Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie“, nr 4, seria H, zes. 1, Kraków 1959, s. 14—15.

⁵ J. W. Gilles, *Versuchschmelze in einem vorgeschichtlichen Rennofen*. Unser Werk „Werkzeitung der Hüttenwerke AG Siegerland“, nr 12/1957; oraz „Stahl und Eisen“, t. 78, 1958 r., s. 1690—1695.

tym razem w piecach niskich o dmuchu sztucznym⁶. Na ogół doświadczenia były pomyślne, przyniosły wiele danych dotyczących temperatury, składu gazów redukcyjnych i doprowadziły do uzyskania kowalnego żelaza.

W dniach 7—14 września 1960 r. na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie przeprowadzone były doświadczalne wytopy żelaza w dymarkach dla ustalenia okoliczności powstawania łupki surowej w procesie dymarkowym⁷. Doświadczenia te przeprowadzano w ramach współpracy między Akademiami Nauk Polską i Czechosłowacką pod kierownictwem autorów niniejszego artykułu⁸.

METODA PRZEPROWADZANIA DOŚWIADCZEŃ

Zadecydowano, aby rozpocząć prace z tymi typami dymarek, które były czynne na terenie Europy w okresie wpływów rzymskich poza granicami imperium. Współczesne bowiem badania archeologiczne stwierdziły na terenie Polski (Góry Świętokrzyskie) istnienie znacznego ośrodka hutniczego z wieloma szczątkami pieców hutniczych z tego okresu⁹, jednocześnie zaś również w Czechach odnaleziono dostateczną liczbę dymarek z tegoż okresu, i to dobrze zachowanych, praktycznie biorąc aż do części wysypowej — ze wszystkimi konstrukcyjnymi szczegółami, jak dysza, otwór do wyciągania łupki itp.¹⁰

⁶ J. W. Gilles, *Rennversuch in Gebläseöfen und Ausschmieden der Luppen*, „Stahl und Eisen“, t. 80, 1960 r., s. 943—948.

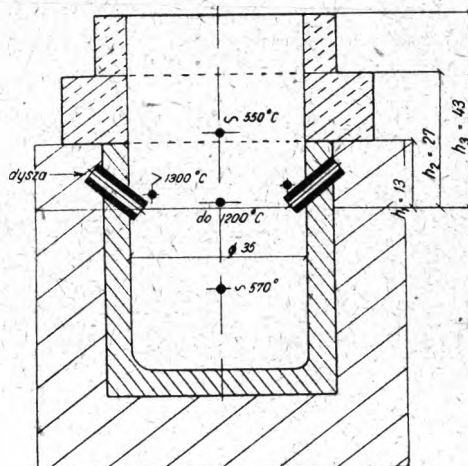
⁷ Doświadczalna seria została przeprowadzona w ramach współpracy między Polską Akademią Nauk (Zakład Historii Nauki i Techniki) i Czechosłowacką Akademią Nauk (Archeologický Ústav) przy współudziale Katedry Historii Techniki i Nauk Technicznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz Muzeum Archeologicznego w Krakowie. Por. wzmianki o badaniach w „Kwartalniku Historii Nauki i Techniki“: w nrze 1/1961. Z prac Zespołu Historii Polskiej Techniki Hutniczej i Odlewniczej; w nrze 3/1961 Konferencja sprawozdawcza Zespołu Historii Polskiej Techniki Hutniczej i Odlewniczej.

⁸ Na tym miejscu składamy podziękowanie tym wszystkim, którzy nam pomagali, a mianowicie: prof. S. Holewińskiemu, doc. W. Rózańskiemu, mgr inż. I. Słomskiej, mgrów K. Bieleninowi, mgrów inż. T. Stopce, mgrów inż. R. Woźniackiemu, mgrów A. Saładziakowi, drowi inż. S. Knapikowi.

⁹ Por. z licznej już bibliografii: M. Radwan, K. Bielenin: *Iron Smelting in the Święty Krzyż Mountains at the Beginning of Our Era*, „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej“, nr 1—2/1958, Supl. „Ergon“, vol. I, s. 277—287; *Badania nad starożytnym hutnictwem żelaza w rejonie Gór Świętokrzyskich w latach 1956 i 1957*, „Materiały Archeologiczne“, t. I, 1959 r.; Tymczasowe sprawozdanie z badań terenowych nad dawnym hutnictwem, prowadzonych latem 1956 r., „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki“, nr 1/1957, s. 203—216.

¹⁰ R. Pleiner: *Základy slovenského zalezárského hutnictví v českých zemích*, Praha 1958, s. 131—190; *Význam typologie zalezárských pecí v době římské ve světle nových nálezů z Cech*, „Památky Archeologické“, t. LI, 1960 r., s. 184—220.

Doświadczenia prowadzono równolegle w dymarkach typu świętokrzyskiego o średnicy 35 cm (ryc. 1), które były rekonstruowane na pod-

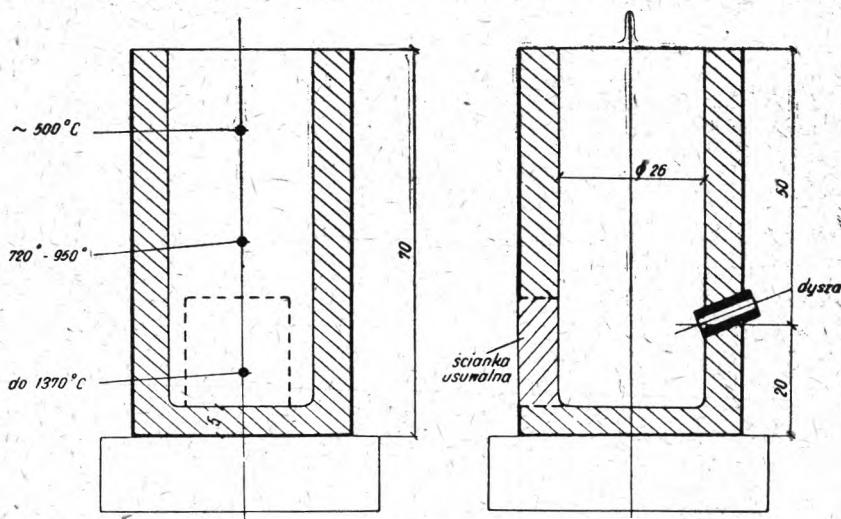


Ryc. 1. Doświadczalna dymarka typu świętokrzyskiego (wymiaru w cm)

Опытный сыродутный горн свентокши-ского типа (размеры в см)

An experimental kiln of Santa Cross type (dimensions in centimetres)

stawie znalezisk w Górach Świętokrzyskich (dalej używamy roboczego terminu „dymarka typu świętokrzyskiego“), oraz w dymarce szybowej o średnicy 26 cm i pełnej wysokości 70 cm (ryc. 2 i 4) typu Lodénice.



Ryc. 2. Doświadczalna dymarka typu czeskiego (wymiaru w cm)

Опытный сыродутный горн чешского типа (размеры в см)

An experimental kiln of Bohemian type (dimensions in centimetres)

(Czechosłowacja). W obydwóch piecykach zastosowano szamotową wyprawę pospolitej jakości. W piecyku typu świętokrzyskiego przeprowadzono trzy doświadczenia, zmieniając wysokość nadbudowanej części

górnjej z 13 cm na 27 cm i 43 cm (licząc od wylotu dyszy), w piecyku zaś typu *Loděnice* — dwa wytopy bez zmiany konstrukcji.

Do doświadczeń wzięto hematyt z kopalni w Rudkach o konsystencji śmietany, rudy tego typu używano bowiem w rejonie świętokrzyskim dla wytopu żelaza w okresie wpływów rzymskich. Rudę przesuszono do stanu wilgotności naturalnej (10% H_2O). Analiza sitowa przesuszonej rudy wykazała proporcje frakcji:

0 — 1 mm	1 — 4 mm	powyżej 4 mm
ok. 26 %	ok. 46 %	ok. 26 %

Początkowo prowadzono wytopy z rudą sortowaną, przekonano się jednak, że nie miało to znaczenia w przypadku hematytu z Rudek. Ruda sortowana o ziarnistości 1—4 mm i ruda niesortowana o ziarnistości 0—30 mm wykazała w analizie (w %):

	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe całk.	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P	S	Części lotne
Ruda sortowana	0,94	61,29	43,59	22,18	0,28	0,30	0,21	4,18	0,02	1,69	1,38
Ruda nie- sortowana	0,94	71,26	50,56	15,50	0,28	0,27	0,21	3,61	0,02	1,24	1,25

Niestety, skład rudy nie odpowiada typowemu. Złoże bowiem się wyczerpuje i ruda pochodząca z partii brzeżnej wykazywała nadmierną zawartość siarki.

Próby prowadzono na bukowym węglu retortowym. Węgiel ten skałkowano do wielkości maksimum 25 mm, przy czym w pierwszych doświadczeniach odrzucono miał o ziarnistości poniżej 4 mm. Odpad jednak z tego tytułu był tak mały, że w dalszych wytopach zastosowano węgiel nieprzesiewany.

Dla pomiarów dmuchu sporządzono reometr i przecechowano go przez porównanie z gazomierzem precyzyjnym. Analizę gazów spalinyowych przeprowadzono ilościowo metodą absorpcji objętościowej za pomocą aparatu Orseta.

Dla dokonania pomiarów temperatury skonstruowano specjalne termopary (platyna-rod 10-platyna oraz chromel-alumel) w ceramicznych osłonach żaroodpornych o małych średnicach. Okazało się, że pomiary w ogniskach piecowych o małych średnicach połączone są z takimi trudnościami, jak atmosfera redukująca, żuźle kwaśne, temperatura ziemna, wahająca się. Wielką rolę grało umieszczenie otworów pomiarowych dla termoelementów. Stwierdzono przy tym, że nie zawsze zostały one odpowiednio umieszczone; dotyczy to zwłaszcza piecyków

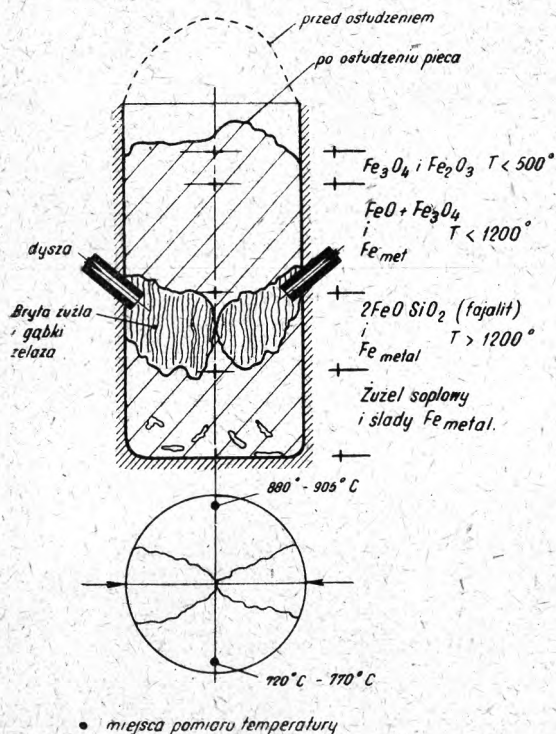
typu świętokrzyskiego, w których w rezultacie temperatury nie mogły być mierzone w najbardziej krytycznych miejscach, co jednak ujawniło się dopiero w praktyce.

DOŚWIADCZENIA Z DYMARKĄ TYPU ŚWIĘTOKRZYSKIEGO

W konstrukcji dymarki świętokrzyskiej, częściowo zagłębionej w ziemi, dolna część stanowiła zbiornik żużla. Żużel ten przy odsłonięciu piecowisk w terenie występuje w postaci kłoca. Górna część pieca, która daje się odtworzyć na podstawie fragmentów ścianek, stanowiła właściwe ognisko, w którym zachodził proces metalurgiczny redukcji rudy żelaznej do żelaza metalicznego i tworzenia się ciekłego żużla, który spływał w dół, do zbiornika. Górna część dymarki z reguły obudowana była ściankami; wysokość ich jest trudna do ustalenia na podstawie odsłoniętych szczątków pieców, ponieważ — jak to wynika z interpretacji odsłanianych piecowisk — ścianki te były burzone dla wyjęcia właściwej łupki. Z tego właśnie względu zmieniano w doświadczeniach wysokość ścianek. Ta wysokość ścianek miała pewien wpływ na przebieg doświadczenia, jednak nie w takim stopniu, który by decydował o jego wynikach. Jest jednak niewątpliwe, że konstrukcja szybowa dawała większą efektywność procesu metalurgicznego, można było bowiem stwierdzić, że przy ściance o wysokości 43 cm przebieg wytopu odbywał się równomierniej, spokojniej. Prawdopodobnie pewne znaczenie miała grubość namiaru nad dyszą. We wszystkich doświadczeniach żużel spodni, spod poziomu dyszy, w postaci tzw. sopli, miał identyczne własności.

W doświadczeniu nr 1 zastosowano 1,5 kg węgla drzewnego na 1 kg rudy. Nie wpłynęło to w widoczny sposób na przebieg wytopu. Wszystkie następne wytopy prowadzono więc przy stosunku węgla do rudy 1 : 1. Stosunek ten nie wynikał z jakichkolwiek przeliczeń metalurgicznych — te w danym przypadku dawały liczby znacznie zaniżone — ale z licznych wskazań w literaturze i z cudzych doświadczeń.

Ze wszystkich trzech doświadczeń wynikało, że w bezpośredniej bliskości dysz tworzyło się „ognisko spalania“. Wyraźnie to wystąpiło wtedy, kiedy na drugi dzień po przeprowadzeniu wytopu i ostudzeniu pozostałości usunięte zostały resztki niespalonego węgla oraz spieczonej i na wpół zredukowanej rudy. Bryły utworzone — jak się później okazało — przez płynny i zakrzepły żużel wraz z gąbką żelaza metalicznego przyjęły postać o kształtach wydłużonych po osi dyszy i owalnych w przekrojach poprzecznych. Na rycinie 3 pokazana jest sytuacja, jaką udało się zobrazować przy rozbiórce zawartości pieca. A więc z górnej warstwy można było obok niespalonego węgla i podprażonej rudy wy-



Ryc. 4. Przebieg redukcji rudy w dymarce świętokrzyskiej, jaki można było stwierdzić przy rozbiórce zawartości

процесс восстановления руды в свентокшиском сыродутном горне, установленный наблюдениями во время его разборки

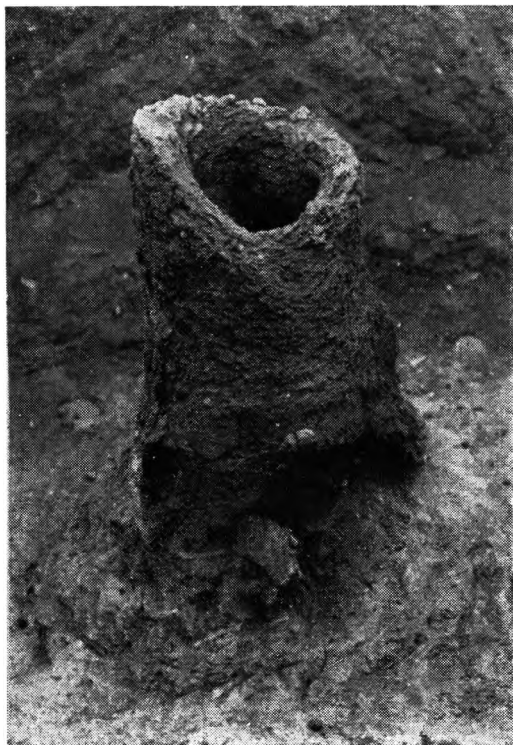
The course of ore reduction in a Santa Cross kiln, as could be ascertained when its content has been analysed

łowiec kryształki magnetytu. Poniżej, bliżej już brył żuźlowych, wyłowiono pozorne „żuźle“ o znacznej zawartości metalicznego żelaza (ryc. 5). Poniżej brył żuźlowych, przedstawionych na rycinie 6, w grubej warstwie niespalonego węgla, zbierano żuźle (tzw. sople) ze śladami Fe metalicznego.

Zawartość żelaza metalicznego w żuźlu wynosiła:

	Znad dyszy	Spod dyszy (sople)
	%	
Z doświadczenia nr 1	13,38	1,18
Z doświadczenia nr 3	23,52	0,96

Po przecięciu bryły z doświadczenia nr 3 piłą i po wygładzeniu powierzchni można było doskonale obserwować tworzenie się gąbki metalu. Główna masa żelaza metalicznego ześrodkowała się w dole bryły, prawie na osi dyszy (ryc. 7), tworząc zbitą masę, w górze bryły natomiast widoczne były blaszki metalu zawierające kawałki niespalonego węgla.



Ryc. 3. Odsłonięta dymarka w Lo-
dēnicach, okręg Beroun, Czechy.
Według wymiarów tej dymarki
skonstruowano doświadczalną

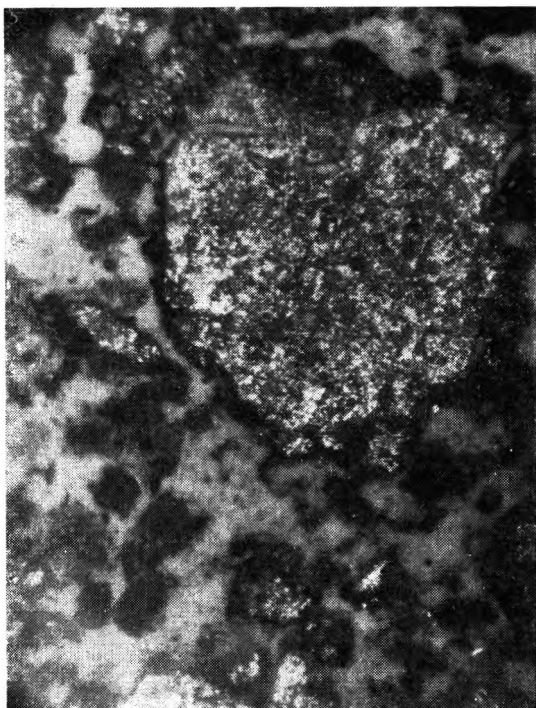
Открытый сыродутный горн в Ло-
деницах, Беровунского округа, в
Чехословакии. По образцу этого
горна был построен эксперимен-
тальный горн натуральной вели-
чины

An uncovered kiln in Loděnice,
district Beroun, Bohemia. Dimen-
sions of this kiln served to the
construction of an experimental
unit.

Ryc. 5. W pozornym żuźlu znajdo-
wały się bryłki zredukowanej rudy.
Na tle tlenków i skały płonnej
białe plamki oznaczają Fe_{metal}
(powiększenie 50 ×)

В мнимом шлаке находились ком-
ки восстановленной руды. На
фоне окислов и пустой породы
видны белые пятна, обозначаю-
щие металлического Fe. (Увеличе-
но в 50 раз)

Lumps of reduced ore have been
found in the apparent slag. White
spots on the oxides and on sterile
rock mean metallic Fe (Magnified
50 ×).



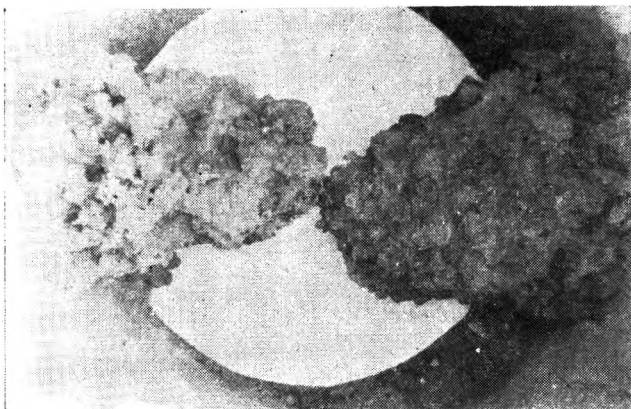


Рис. 6. Widok z góry na dwie bryły żużła przy dyszach po opróżnieniu dymarki
(tło — podłożony papier)

Вид сверху на две глыбы шлака возле сопел после опорожнения горна. (Фон — подостланная бумага)

A view from above on two lumps of slag at the injectors after the kiln has been emptied. (Background — underlaid paper).

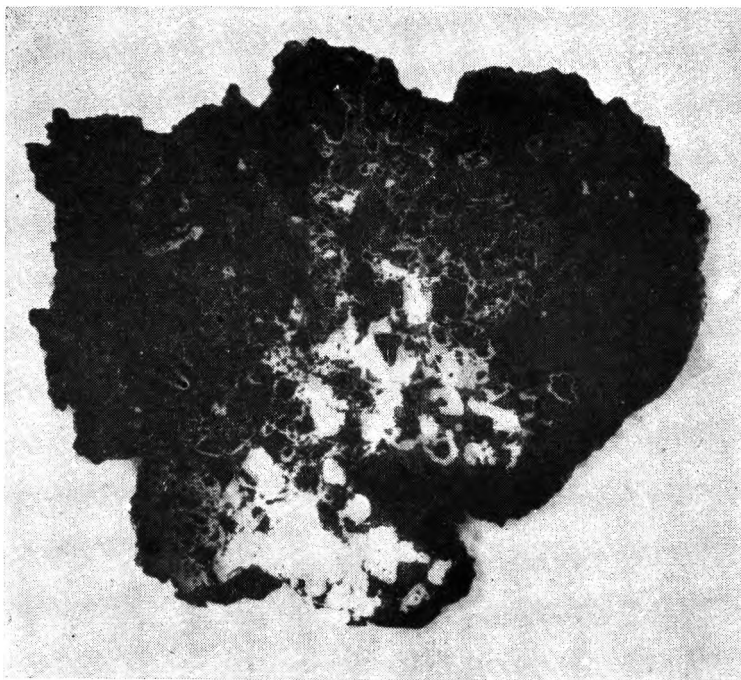


Рис. 7. Przekrój pionowy bryły żużła z rys. 6. Na ciemnym tle masy żużlowej
wystąpiła gąbka Fe_{metal}

Вертикальный разрез глыбы шлака, показанного на рис. 6. На темном фоне
шлаковой массы соявилась губчатая масса металлического Fe

A vertical cross-section of the lump of slag from fig. 6. Against the background
of the slagmass we see a sponge of metallic Fe.



Przeprowadzone badania temperatury topliwości żużli, pobranych z kilku miejsc z przekroju brył, wykazywały liczby wysokie: 1220—1240°. Można więc przypuszczać, że wewnątrz „ogniska spalania“ temperatury były wyższe. Zostało to również sprawdzone doraźnymi pomiarami.

Z doświadczenia nr 1 można było zebrać prawie wszystkie żużelki i zważyć je. Wynikało z tego, że dla utworzenia 1 kg żużla trzeba było zużyć około 2 kg rudy. Wskaźnik ten otrzymywaliśmy i przy innych doświadczeniach.

DOŚWIADCZENIA Z DYMARKĄ TYPU CZESKIEGO (LODENICE)

Dymarki tego typu, opisane przez R. Pleinera¹¹, należące do pieców szybowych pracujących na sztucznym dmuchu. Ciekły żużel zasadniczo tu wypuszczano, a łupkę wyjmowano przez wylamanie części ścianki. Piec taki służyć może do kilkakrotnego wytopu. W naszych doświadczeniach nie zmienialiśmy pierwotnie założonej konstrukcji.

Przebieg wytopu niewiele się różnił od przebiegu w dymarkach typu świętokrzyskiego z tą tylko zmianą, że do wygrzanego i napełnionego mniej więcej do połowy wysokości żarzącym się węglem pieca dosypywano kilka porcji rudy na przemian z węglem w stosunku 1 : 1. Różnice występowały w wyniku innego położenia dyszy w stosunku do całości: dysza była bowiem w dolnej części dymarki. W rezultacie ciekły żużel, tworzący się podczas procesu, podnosił się do góry, co miało pewien wpływ na powstającą łupkę (ryc. 8). Pierwotny zamiar, aby przy otwarciu otworu spustowego odciągnąć ciekły żużel na zewnątrz, nie powiódł się (ryc. 9), ponieważ nie został poprawnie obliczony dokładny moment wypustu i żużel bardzo szybko zastygł. To techniczne niepowodzenie ma dla archeologa i historyka techniki doniosłe znaczenie, pokazuje bowiem jasno, jak ogromną wagę miała zakorzeniona, przekazywana z pokolenia na pokolenie, można nawet powiedzieć, że strzeżona przez rytuał¹², rutyna dawnych hutników, którzy technologię produkcji mogli poznać tylko empirycznie — na podstawie z trudem zdobytych doświadczeń. Ostatecznie więc i z pieca typu Loděnice, który był pierwotnie przygotowany do wypustu żużla, trzeba było wyciągnąć bryłę żużla z gąbką po wystudzeniu pieca. W ten sposób doświadczalny piec zbliżył się do pieca typu szybowego częściowo zagłębionego, z któ-

¹¹ Tamże, s. 170—175, rys. 44, tabl. XI—XII.

¹² Odnosnie tego istnieją liczne świadectwa etnograficzne: por. na przykład R. J. Forbes, *Metalurgy in Antiquity*, Leiden 1960, s. 64—72; R. Gardi, *Der schwarze Hepästus*, Bern 1954; L. Holý, *Získávání a zpracování železa u východnoafriických Bantu*, „Ceskoslovenská etnografie“, t. V, 1957 r., s. 273—288 i 348—367.

rego nie wypuszczano żużla. Rodzaj ten był w Czechach genetycznie starszy od pieca typu Loděnice i poświadczony jest wieloma znaleziskami ze starszego i średniego okresu rzymskiego¹³. R. Pleiner przypuszcza, że do podobnego typu — jednak w specyficznym zmienionym wyglądzie — należały i piece w Górach Świętokrzyskich¹⁴. Pochodzeniem swym należy ten rodzaj pieca do późnolateńskiego hutnictwa wschodnich Celtów. Zagadnienie to można będzie jednak rozwiązać dopiero po definitywnym opracowaniu kompletnego materiału z wykopalisk archeologicznych z terenu Gór Świętokrzyskich.

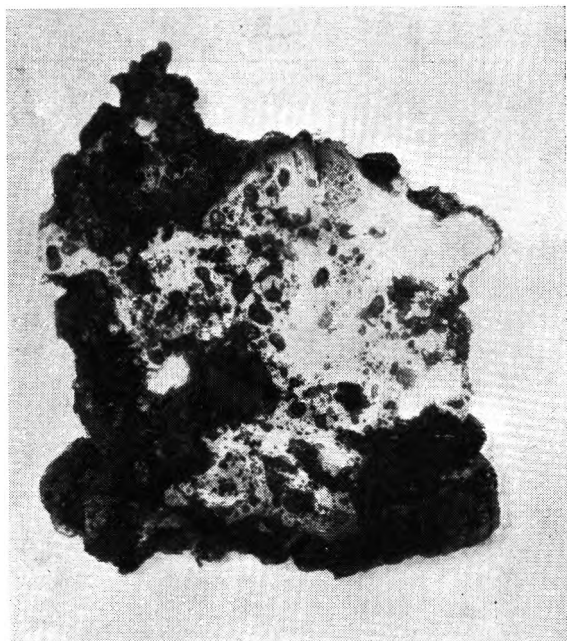
Należy podkreślić, że — jakkolwiek wydaje się to paradoksalne — wyredukowany metal był w zasadzie usytuowany w górnej części bryły w postaci gąbki żelaznej, podczas gdy specyficznym lżejszy żużel przeciekał porami na dół poprzez masę gąbki i osadzał się w dolnej części bryły. Zjawisko to, wywołane osadzaniem się żelaznej gąbki na ściankach pieca, zostało zaobserwowane także i przez angielskich badaczy¹⁵. Dotychczas przy interpretacji archeologicznych znalezisk pieców zawsze twierdzono, że zredukowane grudki przeciekały przez lżejszy żużel i łączyły się na dnie pieca. W rzeczywistości chodzi jednak o proces znacznie bardziej złożony.

Podstawowy przebieg metalurgicznego procesu redukcji był w dymarce czeskiej identyczny jak w dymarce świętokrzyskiej. Tak samo można było stwierdzić istnienie „ogniska spalania“ w nieco skażonej jednak postaci, wywołanej tym, że żużel nie mógł ściekać w dół. Podobnie nad dyszą, a ściślej biorąc, nad tworzącą się bryłą można było uchwycić magnetyt i zredukowane grudki żelaza. Pomiaru topliwości żużla wskazywały na nieco wyższą temperaturę w pobliżu dyszy niż to miało miejsce w kotłince świętokrzyskiej: 1240—1280°, przy czym pomiarem uchwyciono temperaturę 1370°. Pobierane w czasie wytopu próbki gazów na poziomie bliskim dysz osiągały w kotłince czeskiej 22—25% zawartości CO (w biegu ustabilizowanym) przy nieznacznej

¹³ Chodzi tu przede wszystkim o czeski typ Podbaba XI, por. R. Pleiner, *Základy...*, s. 159—160 i *Význam typologie...*, s. 190—200.

¹⁴ R. Pleiner, *Problémy rekonstrukci pravekých pecních stoveb*, „Filipov sborník — Acta Universitatis Carolinae“, Praha 1959, t. III, s. 227.

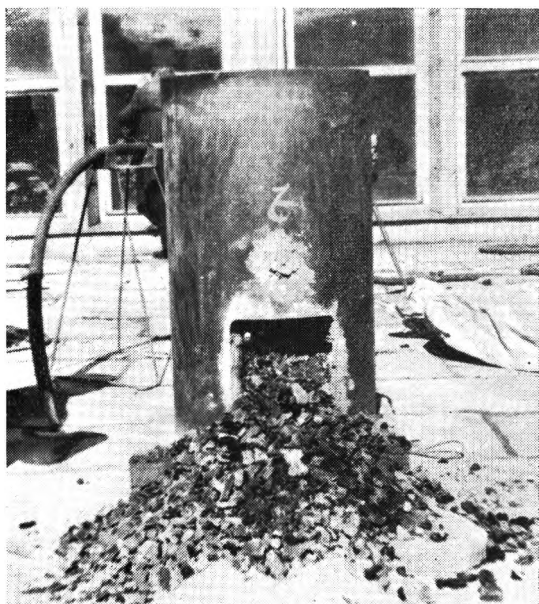
¹⁵ E. J. Wynne, R. F. Tylecote, artykuł cytowany w przyp. 4, s. 347. Odnośnie procesu tworzenia się łupek por.: B. Neumann, H. Klemm, *Der Gefügeaufbau der Eisenoxyd-Silikaten der Rennfeuer- und Stückofenschlacken und die Vorgänge bei der Ausscheidung des metallischen Eisens aus solchen Schlacken*, „Archiv für Metallkunde“, t. III, 1949 r., s. 7—11; B. Neumann, *Die ältesten Verfahren der Erzeugung des technischen Eisens*, Berlin 1954, s. 41—47; S. Holewiński, M. Różański, M. Radwan, *Z badań nad dymarką świętokrzyską*, „Archiwum Hutnictwa“, nr 3/1960, s. 271—280; J. Piaskowski, *Sprawozdania z badań rudy, żużla i fragmentów łupek...*, „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej“, nr 4/1960, s. 573—581.



Ryc. 8. Przekrój pionowy bryły żużla z dymarki czeskiej

Вертикальный разрез куска шлака из сыродутного горна на чешского типа

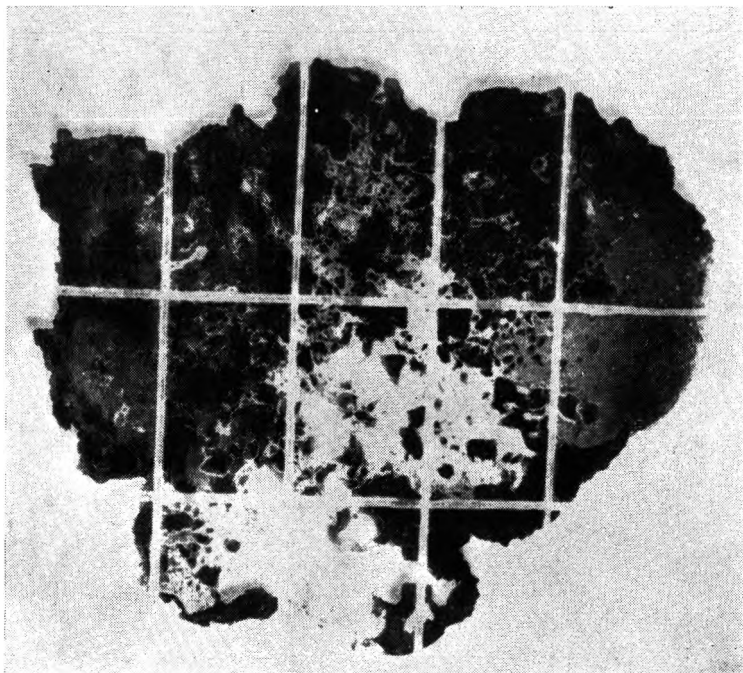
A vertical cross-section of the lump of slag taken from a Bohemian kiln.



Ryc. 9. Próba odciągnięcia płynnego żużla z dymarki czeskiej

Попытка извлечения жидкого шлака из чешского горна

A trial to draw away liquid slag from a Bohemian kiln.



Ryc. 10. Bryłę żużła przecinano i badano strukturę w każdym kawałku oddzielnie

Глыба шлака разрезывалась на куски и структура каждого куска исследовалась
отдельно

A lump of slag has been cut through and the structure of each piece separately
has been investigated.



(5—8%) zawartości CO₂ i śladach tlenu. W kotłince świętokrzyskiej wielkości te wynosiły: CO — 29—33%, CO₂ — 1,4—5,2%.

BADANIA METALOZNAWCZE

Wyciągnięte bryły (łupki surowe) przecinano na piłach wzdłuż osi dysz i osi pieców. Jedną połówkę przeznaczano na badania, drugą pozostawiano jako świadka. Jak to wynikało z analizy rud, należało się spodziewać wpływu siarki na cechy materiału pobranego do badań. W istocie odciski Baumana wykazały miejsca zasiarczone na całej powierzchni przekroju.

Do badań mikroskopowych bryły pocięto na szereg odcinków (ryc. 10), powierzchnie czołowe wypolerowano i trawiono w 2% roztworze HNO₃ w alkoholu (tzw. nital).

Doc. W. Różański, pod którego kierownictwem przeprowadzano badania metalograficzne, tak reasumuje wyniki: mimo zastosowania różnej konstrukcji dymarek (wymiały, wysokość umieszczenia dysz, kierunek dmuchu itp.) produkt, jaki uzyskano w końcowym stadium wytopu, jest prawie identyczny dla wszystkich odmian piecyków — w okolicach dysz formowały się łupki złożone z masy żuźlowej i czystego metalicznego żelaza o strukturze ferrytycznej. Jedynie w łupkach z piecyków czeskich są widoczne ślady nawęglania i naazotowania, przy czym zjawisko to występuje w nieznacznych obszarach metalu i to tylko blisko wylotu dysz. Również i inne cechy charakteryzujące mikrostrukturę otrzymanego żelaza, jak mikrotwardość i wielkość ziarna, zamykają się w tych samych granicach dla wszystkich wytopów. Ze względu na duże zasiarczenie rudy w zredukowanym żelazie znajduje się wiele siarczków, które niekiedy występują nawet pod postacią eutektyk.

OBSERWACJE OGÓLNE

1. W przypadku stosowania hematytu o własnościach fizycznych podobnych do przyjętego do doświadczeń bardziej skrupulatne sortowanie nie miało znaczenia.

2. Kawalkowanie węgla miało widoczne i istotne znaczenie.

3. Zwiększenie ilości dmuchu przyspieszało proces, jednak przypuszcza się, że istnieje tu pewne optimum zależne od wielkości pieca.

4. Temperatura na wszystkich poziomach pomiarów wzrastała w miarę biegu procesu; zauważono nierównomierny rozkład temperatur w przekroju pieców: w piecyku świętokrzyskim w poziomie dysz tem-

peratura była znacznie powyżej 1300° przy dyszach, w środku pieca dochodziła do 1200°, podczas gdy przy ściankach — zaledwie do 900°. Inaczej przebiegał rozkład temperatur w piecyku czeskim typu Loděnice, co jest zresztą zrozumiałe, ponieważ była tam tylko jedna dysza, dawał się więc zauważyć bieg „brzeżny“.

5. W obydwu przypadkach zauważono ożuzłowanie się dysz, trzeba było często je przeczyszczać.

6. Redukcja tlenków żelaza następowała w obydwu przypadkach, jak można z prawdopodobieństwem przyjąć, wcześniej niż tworzenie się żuźla. Właściwy żużel tworzył się w pobliżu dysz w temperaturze powyżej 1200°. W piecyku świętokrzyskim zauważono w dole pieca sople żuźla typu dymarkowego, całkowicie wykształcone, z minimalną zawartością żelaza metalicznego.

7. Żelazo w piecykach bez otworu spustowego tworzyło się w masie żuźla w postaci przestrzennej gąbki drogą zlepiania się większych i mniejszych ziarn wcześniej zredukowanego żelaza. Tworzący się jednocześnie ciekły żużel spływał w dół, zastygając zrazu w postaci oddzielnych sopli, a w końcu zbitej masy. Podobne zjawisko, choć nie tak wyraźnie, wystąpiło w piecyku czeskim typu Lodenice.

8. Nie oznaczono tym razem wskaźnika uzysku żelaza metalicznego z rud. Na podstawie doświadczeń poprzedzających obecne ustalono, że uzysk nie przekracza 17—18%, licząc na łupkę surową.

ПОЛЬСКО-ЧЕХОСЛОВАЦКИЕ ОПЫТЫ ПО ВЫПЛАВКЕ ЖЕЛЕЗА В СЫРОДУТНЫХ ГОРНАХ РИМСКОГО ПЕРИОДА

Исследование технологических процессов черной металлургии древних времен с помощью современных методов дает возможность полнее изучить вопросы истории металлургии. Археологические раскопки дают материалы, требующие дальнейшей разработки, тщательных химических, металлографических, петрографических и других анализов. Аналогия с теми способами производства, которые еще сохранились до наших дней в некоторых странах, позволяет получить дальнейшие дополнительные сведения. Однако, только с помощью эксперимента можно выяснить и решить до конца все сомнения и неясности.

В настоящее время в археологии очень часто и весьма успешно применяется экспериментальный метод исследований. Первые опыты с выплавкой железа по древнему способу, отмеченные в литературе, были произведены Вурмбрандтом в 1877 году. Затем почти одновременно в 1958 г. Уайн и Тайлкот в Англии и Гиллес в ФРГ опубликовали результаты своих экспериментальных выплавок. Уайн и Тайлкот пользовались горном лабораторного типа, Гиллес же производил выплавку в сыродутном горне римского типа натуральной величины.

Произведенные авторами статья в сентябре 1960 г. в Горно-металлургической академии в Кракове опытные выплавки имели своей целью воспроизвести процесс образования железа в сыродутном горне. Было проведено пять

опытных выплавок: три из них в сыродутном горне свентокшиского, т.е. земляного типа, а две остальные — в чешском сыродутном горне надземного типа.

Опытные горны были сделаны точно по образцу аналогичных сыродутных горнов времен римского влияния (III—IV в.н.э.).

Для проведения опытов были применены измельченная гематитовая руда и древесный уголь из букового дерева в соотношении 1 : 1. Во время выплавки измерялась температура различных частей печи, количество и давление дутья, производился также анализ составляющих газов. Шихта руды в каждой из выплавок колебалась в пределах 20—25 кг.

После окончания выплавки горнам позволяли остывать в течение одних или двух суток, после чего они подвергались разборке, во время которой все обстоятельства записывались. Наблюдениями установлены четыре зоны процесса, которые отличались между собой (рис. 4). В первой зоне, считая сверху, происходило восстановление Fe_2O_3 до Fe_3O_4 , а во второй зоне наблюдалось восстановление Fe_3O_4 до FeO и Fe металлическое. В третьей зоне при температуре свыше 1200° образовался собственно шлак основанный на фаялите и в конечном счете появилось железо в виде губчатой массы. Контрольными измерениями плавкости шлака из этой зоны была определена температура в 1260° . В четвертой зоне, которая была отчетливо заметна в сыродутном горне свентокшиского типа, был обнаружен шлак, в котором содержание Fe металлического не превышало 1%. Металлографическими исследованиями, произведенными кафедрой металлографии в Горно-металлургической академии в Кракове, во всех случаях была установлена ферритовая структура со следами исчезающего перлита.

POLISH-CZECHOSLOVAKIAN EXPERIMENTS WITH IRON SMELTING IN KILNS FROM THE ROMAN PERIOD

An analysis of technological processes of the most ancient iron metallurgy performed with modern methods permits us to get fully acquainted with problems confronting the history of metalurgy. Archeological excavations conducted with great care are delivering raw materials, which require to be treated properly by analyses: chemical, metalographical, petrographical a.s.f. A similarity with methods that are even to-day applied in some countries bring us further explanations. But an answer to all doubts and uncertainties is given only by experiment.

At present archeology is very often applying the method of experimentation and with good results too. The first experiments with iron smelting from ore after an ancient pattern that was described in literature was made by Wurmbrandt in 1877. Almost simultaneously in 1958 Wynne and Tylecote in England and Gilles in GFR have published the results of their trial smeltings. Wynne and Tylecote made their trials in an oven of a laboratory type, while Gilles made his experiment on a real scale in a kiln of Latin type.

Experiments made by the authors of the present paper in September 1960 at the Mining and Metallurgical Academy in Cracow had in view a reproduction of the process how slate iron is formed in a kiln. In all five trial smeltings were made. Three of them were made with an underground kiln of Santa Cross type, and two of them with a Bohemian kiln of on the ground type. Both types of kilns had all the characteristic traits of kilns from Roman times (III—IV century a.D.).

Experiments were made with a mixture of fine hematite ore and beech charcoal in proportion 1:1. While the melting was in progress the temperature of the various parts of the furnace was measured, the number and the pressure of blast and of the compound of gases have been analysed. Each melting charge consisted of an ore portion of 20—25 kg.

The experiment being concluded the furnace has been left for 24—48 hours for cooling and then it has been pulled down to pieces and all circumstances were noted. Four different sections of the whole process were observed. They all differed widely from each other. (fig. 4). In the first section from top a reduction of Fe_2O_3 to Fe_3O_4 was taking place; in the second section Fe_3O_4 was reduced to FeO and metallic Fe . In section three at a temperature above 1200°C the proper slag was being formed with fayalite at its base and a final iron sponge was formed. The control measurements of slag meltingpoint in this section have shown a temperature of 1260°C . In section fourth, which was observed with great precision in Santa Cross kilns, slag has been seen whose content of metallic Fe was under 1%. Metallographic research undertaken at the Mining and Metallurgical Academy in Cracow have proved the presence of a ferritic structure with traces of declining perlite in all cases.