

Pradziejowa (od eneolitu po wczesne średniowiecze) metalurgia w świetle badań archeologicznych i geochemicznych w zlewniach górnej Brynicy, Stoły i Potoku Granicznego

Leszek Chróst

Stowarzyszenie Miłośników Ziemi Tarnogórskiej

Wprowadzenie

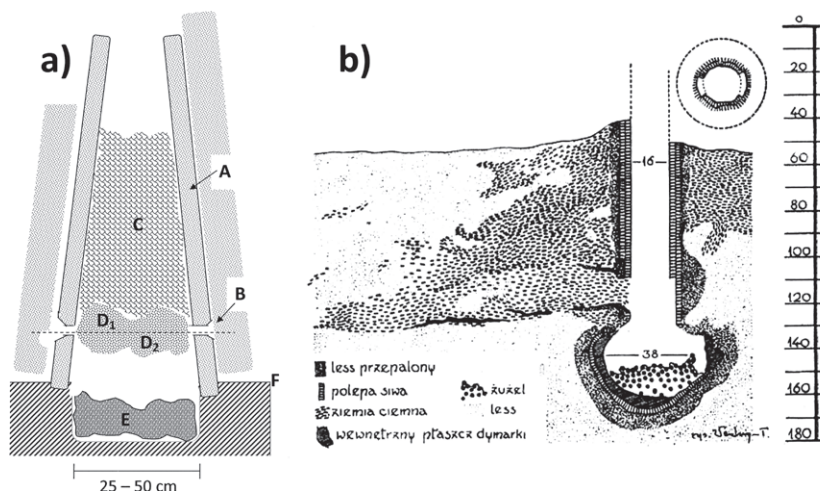
Analizując wyniki badań nad otrzymywaniem żelaza w piecach dymarskich typu świętokrzyskiego, przedstawione w dziele zbiorowym pod redakcją Szymona Orzechowskiego i Ireneusza Suligi¹, oraz opisy konstrukcji pieców dymarskich zaprezentowane w artykule Tadeusza Reymana², stwierdzono różnice polegające na podziemnym lub naziemnym usytuowaniu komory paleniska w omawianych konstrukcjach pieców oraz w jednorazowym (piece naziemne) lub wielokrotnym (piece podziemne) użyciu omawianych konstrukcji (ryc. 1).

W monografii *50 lat badań...* przedstawiono próby pozyskania żelaza w starożytnych piecach o paleniskach usytuowanych na powierzchni terenu. W bogatej literaturze dotyczącej tego typu pieców, zwanych kotlinkowymi, badacze zakładają przemianę rudy żelaza, wprowadzanej do pieców naprzemiennie z węglem drzewnym, w żelazo metaliczne, które odkłada się w naziemnej części pieca, a dokładniej w dolnej partii szymbu-komina (w okolicy otworów dmuchowych). Piec taki zbudowany był

■ 1 *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*, red. S. Orzechowski, I. Suliga, Kielce 2006.

2 T. Reyman, *Na śladach rudnic – igołomska „fabrica ferri” z okresu rzymskiego*, „Z Otchłani Wieków” 1952, t. 21, z. 4, s. 119–128.

z gliny i posadowiony nad zagłębioną w ziemi kotlinką, a następnie suszony i wygrzewany (ryc. 1a). Tym sposobem metodą eksperymentalną uzyskiwano żelazo w postaci stopu przemieszanego z żużlem, tzw. łupkę, która wymagała przekuwania, aby oczyścić ją ze szlaki.

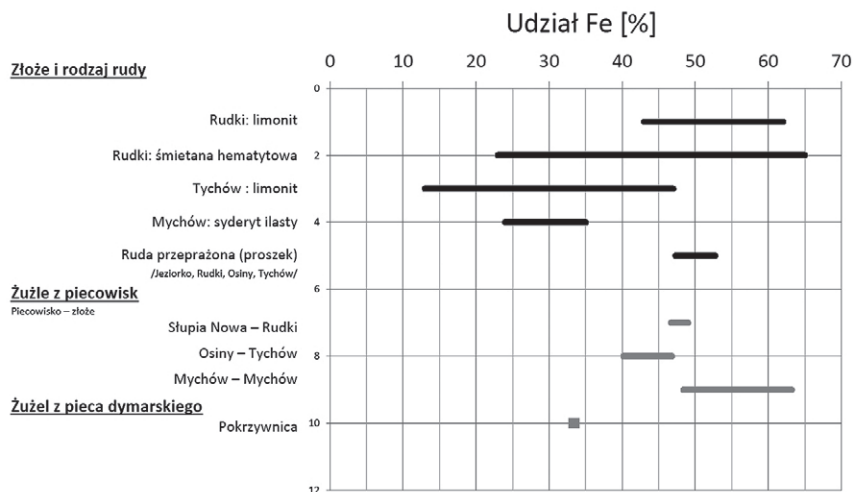


Ryc. 1. Dwa typy pieców dymarskich o różnym usytuowaniu palenisk względem powierzchni terenu: a) piec typu świętokrzyskiego (piec kotlinkowy): A – szczyt pieca, B – otwory dmuchowe, C – węgiel drzewny i ruda, D₁ – strefa redukcji, D₂ – gąbczasta łupka żelaza, E – żużel w tzw. kotlinku, F – poziom terenu; b) piec typu małopolskiego opisany przez T. Reymana

Źródło: R. Pleiner, *Piece typu zagłębionego na terenie Europy w okresie wpływów rzymskich*, [w:] 50 lat badań nad starożytnym..., s. 138 (ryc. 3 – piec nr 5 wg K. Bielenin, *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*, Warszawa – Kraków 1974), ze zmianami wprowadzonymi na podstawie późniejszych danych z literatury przedmiotu (ryc. a); T. Reyman, *Na śladach rudnic – igolomska „fabrica ferri” z okresu rzymskiego*, „Z Otkłani Wieków” 1952, z. 4, s. 120 (ryc. b)

Autor niniejszego opracowania uważa, iż zbliżona zawartość żelaza w rudach i w żużlach dymarkowych podważa argument za jednorazowym wykorzystaniem tego typu dymarki w produkcji żelaza, gdyż wynika z tego znikoma efektywność uzyskiwania metalu. Zakresy zawartości żelaza w rudach i w uzyskanych z nich żużlach poprodukcyjnych pokrywają się w dużym stopniu (ryc. 2). Założenie, że płynny żużel spływa do kotlinki pod dymarką dopiero po pewnym czasie, w niektórych przypadkach

całkowicie ją wypełniając, również u autorów eksperymentalnego wytopu budzi wątpliwości³.



Ryc. 2. Zakresy zawartości żelaza w rudach i żużlach z pieców dymarskich typu świętokrzyskiego

Oprac. L. Chróst⁴

Drugi typ pieców dymarskich sytuowanych poniżej powierzchni terenu przedstawiono we wspomnianym już artykule T. Reymana⁵ (ryc. 1b). Zostały one odkryte podczas wykopalisk w miejscowości Igołomia (pow. miechowski).

Obsypanie gruntem dymarki typu kotlinkowego zbliża procesy zachodzące w piecach dymarskich obydwu typów, jednocześnie umożliwiając pozyskiwanie żelaza metodą postulowaną w niniejszym opracowaniu.

■ 3 I. Suliga, *Dotychczasowe próby rekonstrukcji starożytnego procesu metalurgicznego w kotlinkowych piecach dymarskich z regionu świętokrzyskiego*, [w:] 50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim, red. S. Orzechowski, I. Suliga, Kielce 2006, s. 163–174; autor wskazuje na braki w wyjaśnieniu tworzenia się kłoca żużla w kotlinie dymarki podczas jednorazowego wykorzystania pieca.

4 Opracowanie L. Chrosta na podstawie wyników badań opublikowanych w: M. Radwan *Starożytne hutnictwo świętokrzyskie – metody badań i wyniki*, „Zeszyty Naukowe AGH” 1966, nr 131, Rozprawy, z. 57, s. 13–15, tabele 1–3 (całkowite zawartości Fe w rudach, żużlach z piecowisk i w rudach przeprażonych) oraz S. Orzechowski, I. Suliga, J. Trąbska, B. Trybalska, *Piece dymarskie z Pokrzywnicy, stan. 1, gm. Pawłów, woj. świętokrzyskie w świetle badań archeologicznych, metalurgicznych i mineralogicznych*, „Materiały Archeologiczne” 2016, XLI, s. 25, 28 (w kłocu żużla średnia zawartość Fe₂O₃ wynosi 62,22%, co odpowiada zawartości Fe równej 33,5%).

5 T. Reyman, *Na śladach rudnic – igołomska „fabrica ferri”...*

Polega ona na przemianie rud tlenkowych i węglanowych niektórych metali w metale w temperaturach znacznie niższych od temperatur ich topnienia, w wyniku oddziaływania gazów (wodoru, tlenku węgla) w układzie zamkniętym (bez dostępu powietrza). Ślady dodatkowego obsypywania gruntem pieców typu kotlinkowego z oczywistych przyczyn nie mogły się zachować na powierzchni w dłuższym przedziale czasu, szczególnie w terenie górzystym.

Istnieją przesłanki za tym, że w Cesarstwie Rzymskim wykorzystywano metale otrzymywane w Polsce południowej⁶. Prymitywny sposób uzyskiwania żelaza przez przekuwanie tzw. łupki – mieszaniny żelaza z żużłem – odbiega od spodziewanych, bardziej zaawansowanych technologii stosowanych w Cesarstwie Rzymskim. Błędne, zdaniem autora, jest wzorowanie się w eksperymentach na metodach wykorzystywanych przez prymitywne (pod kątem możliwości technologicznych) plemiona z różnych części świata. Bardziej rozwinięte pod względem technicznym cywilizacje miały możliwość odpowiedniego wyboru miejsca pozyskiwania metali, przystosowanego zarówno do warunków siedliskowych, jak i w zakresie efektywności zastosowanych metod. Prymitywna konstrukcja pieców mogła wynikać z możliwości korzystania na przeważających obszarach z rud żelaza silnie zanieczyszczonych skałą płonną, na przykład z rud darniowych. Prawdopodobnie wynikiem tego była również niska efektywność uzysku metalu, wyprowadzana z porównania wyników oznaczeń żelaza w rudzie i żużłach dymarkowych⁷.

Nie negując zupełnie efektywnego uzyskiwania żelaza w dymarce typu świętokrzyskiego w formie łupki wymagającej przekucia, autor uważa, że była to metoda stosowana dla wytwarzania gorszej jakości stopu na obszarach pozbawionych rud niezanieczyszczonych skałą płonną i/lub na gruntach kamienistych utrudniających podziemne sytuowanie palenisk. W rejonach możliwie łatwego pozyskiwania hematytu jej stosowanie byłoby marnowaniem surowca.

■ 6 P.S. Wells, *Ludy poza granicami Cesarstwa Rzymskiego*, [w:] *Europa rzymska*, red. E. Bispham, Warszawa 2010, s. 357 (osada w Jakuszowicach zamieszkała od I do V w. n.e., prawdopodobnie faktoria rzymska, zlokalizowana w równej odległości około 60 km od obszarów kruszconych Gór Świętokrzyskich i Tarnowskich Gór – obszarów zasobnych w hematyt i galenę srebronośną).

7 M. Radwan, *Starożytne hutnictwo świętokrzyskie – metody badań i wyniki...*, s. 13–15, tabele 1–3 (całkowite zawartości Fe w rudach, żużłach z piecowisk i w rudach przeprażonych); S. Orzechowski, I. Suliga, J. Trąbska, B. Trybalska, *Piece dymarskie z Pokrzywnicy...*, s. 25, 28 (w kłocu żużła średnia zawartość Fe_2O_3 wynosi 62,22%, co odpowiada zawartości Fe równej 33,5%).

Należy jednak rozważyć możliwość wykorzystania dymarek typu świętokrzyskiego do produkcji żelaza dobrej jakości w dwuetapowym procesie, w którym – poza żużłem stanowiącym odpad pozostawiany w gruncie – otrzymywano również półprodukt – tzw. żużel redukcyjny. Szymon Orzechowski w artykule z 2006 roku⁸ informuje:

Obok zespołów nr II i III [w miejscowości Skały, gm. Nowa Słupia – L.C.] zarejestrowano rodzaj nieregularnej hałdy żużla o wymiarach 3 m x 2,5 m i grubości około 40 cm, złożonej wyłącznie z dużych i średnich ułamków kłoców o strukturze litej. Brak frakcji o strukturze soplowej i porowatej może sugerować intencjonalny dobór takiego materiału. Żużel o strukturze litej tworzył się w górnych partiach kłoców i pochodził zapewne z piecowisk nr II i III [...] Poza stwierdzeniem zaistniałego faktu trudno jednoznacznie wyjaśnić to rzadkie zjawisko.

Na rysunku przedstawiającym przekrój omawianej nietypowej hałdy żużla zgromadzony materiał nazwany jest żużłem redukcyjnym.

Przesłanki za innym sposobem wytwarzania żelaza w prehistorii

W latach 2007–2017 zostały przeprowadzone przez Stowarzyszenie Miłośników Ziemi Tarnogórskiej i Pracownię Badań, Pomiarów i Ekspertyz Ekologicznych „EKOPOMIAR” badania nad migracją w torfowiskach szuwarowych zanieczyszczeń antropogenicznych, w tym metali ciężkich. Doprowadziły do odkrycia obszaru, na którym działalność ludności wywołująca emisję metali ciężkich, węgla drzewnych i sadzy do naturalnego środowiska okazała się wielokrotnie starsza niż dotychczas sądzono. Teren ten został odkryty w ramach prac dofinansowanych przez Urząd Marszałkowski Województwa Śląskiego i Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków w Katowicach. Wykorzystano metody badań opracowane do rozdzielania zasięgów oddziaływania emitorów różnego rodzaju zanieczyszczeń na środowisko, oparte na określaniu zaniku w torfowiskach charakterystycznych zanieczyszczeń w miarę wzrostu odległości od źródeł ich emisji. Dla obszaru zlewni górnej Brynicy (powyżej zbiornika Kozłowa Góra) określono

■ 8 S. Orzechowski, *Wyniki najnowszych badań na stanowiskach osadniczych i produkcyjnych Świętokrzyskiego Centrum Hutniczego*, [w:] *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*, red. S. Orzechowski, I. Suliga, Kielce 2006, s. 36–40.

rejon, na których mogą występować zabytki archeologiczne związane z wydobywaniem na tym terenie użytecznych kopalin – złota, srebra, elektum, miedzi, mosiądzu, bizmutu i tlenkowych rud miedzi (malachitu i kuprytu) oraz żelaza (czerwona ochra hematytowa). Wydzielono je tam ze starych warstw przebadanych rdzeni trzech torfowisk wytworzonych na Brynicy i jednym z jej dopływów. Kopaliny pochodzą prawdopodobnie z wychodni skał triasowych i jurajskich. Mogły w naturalny sposób, w wyniku erozji, być zmywane do rzeki w czasie tworzenia się torfowisk, w których były osadzone. Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań wskazują jednak na ich współwystępowanie, od 8000 lat, z zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego (nadmiarem węgla drzewnych – o dwa rzędy wielkości większym od stanu typowego dla tych tworów natury) i dużym zanieczyszczeniem ochrą czerwoną (hematytem), pochodzącą prawdopodobnie z płukania urobku w ciekach wodnych tego obszaru. Dalsze badania archeologiczne, mające na celu odnalezienie źródeł zanieczyszczeń osadzanych w torfowiskach, prowadzone pod kierunkiem dr. Eugeniusza Foltyna, doprowadziły do odkrycia w rejonie Żygliny-Żyglinka (gm. Miasteczko Śląskie) śladów osadnictwa mezolitycznego oraz bezpośrednio sąsiadujących z nimi stanowisk wczesnośredniowiecznych i XVI-wiecznych związanych z hutnictwem ołowiu.

Szczegółowe rezultaty prac archeologicznych z lat 2017–2018 są aktualnie opracowywane, natomiast wyniki przeprowadzonych do 2016 roku badań przedstawiono na kilkunastu planszach wystawy pt. „Odczytano z torfowisk – początki i sposoby pozyskiwania metali na terenie tarnogórskiego obszaru kruszonośnego”. Prezentowano ją między innymi na Jubileuszowym XX Śląskim Sympozjum Archeologicznym we Wrocławiu – w ramach propagowania możliwości zastosowanej metody badań w archeologii – jako uzupełnienie graficzne wygłoszonego tam referatu na temat badań. W 2017 roku wydano również 64-stronicowy katalog wystawy, w którym przedstawiono rezultaty dziesięcioletnich prac prowadzonych w zlewni górnej Brynicy⁹.

■ 9 *Odczytano z torfowisk. Początki i sposoby pozyskiwania metali na terenie tarnogórskiego obszaru kruszonośnego. Katalog wystawy*, red. M. Rosenbaum, Tarnowskie Góry 2017. Poza eksponowanymi na wystawie materiałami, załączono opis przeprowadzonych w poszczególnych latach badań Stowarzyszenia Miłośników Ziemi Tarnogórskiej oraz zainteresowanych tematem innych instytucji naukowych, w tym Instytutu Archeologii i Etnologii PAN w Warszawie, Instytutu Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrzu, Politechniki Śląskiej i Uniwersytetu Śląskiego. Katalog zawiera również wykaz opublikowanych do 2017 r. wyników badań z dziedziny geochemii, mineralogii i archeologii tego terenu.

Wyniki przeprowadzonych dotychczas badań archeologicznych sugerują także inną możliwość pozyskiwania żelaza oraz metali kolorowych w prehistorii. W rejonie Żyglinka archeolodzy Edelgarda i Eugeniusz Foltynowie odkopali tzw. jamę wygrzewczą o ścianach wyłożonych piaskowcem pstrym i gliną, wypełnioną tlenkowymi rudami ołowiu oraz resztkami węgla drzewnych¹⁰. Obiekt znajdował się w całości pod powierzchnią gruntu.

Sprawdzając zgodność danych przedstawianych na planszach planowanej wystawy z oficjalną wiedzą archeologiczną, uzyskano od Marii Dobrzańskiej z Oddziału Krakowskiego Instytutu Archeologii i Etnologii PAN informację o odkrytym w Małopolsce typie dymarek z czasów rzymskich, które charakteryzowały się unikalną budową i śladami wielokrotnego użycia oraz były zagłębione w gruncie. Prof. Tadeusz Reyman w udostępnionym przez M. Dobrzańską artykule opisuje za Hieronimem Łabęckim między innymi sposób uzyskiwania żelaza przez Tatarów w Azji¹¹, odpowiadający metodzie sugerowanej przez Stowarzyszenie Miłośników Ziemi Tarnogórskiej.

Autor niniejszego opracowania otrzymał od prof. Szymona Orzechowskiego podczas festynu archeologicznego „Dymarki Świętokrzyskie”, odbywającego się w Nowej Słupi (pow. kielecki), bryłkę żużla odpowiadającą opisowi żużla redukcyjnego, który po rozkruszeniu w procesie pirolizy praktycznie w całości zredukował się do metalicznego żelaza (fot. 1). Stąd sugestia o wytwarzaniu półproduktu, z którego w sposób efektywny otrzymywano metal na przykład metodą opisaną poniżej.

Stwierdzono występowanie w torfowiskach zlewni górnej Brynicy węgla drzewnych pokrytych hematytom¹² i niewielkich bryłek pylastego hematytu (ten na badanym terenie występuje w warstwach torfu tworzących się w czasach rzymskich). W jednym z torfowisk w Żyglinku znaleziono większe bryły piasku spojonego hematytom (do 36% wagowych hematytu). Występowały w warstwach torfowiska sąsiadującego z terenem wykopalisk w Żyglinku (tworzących się w przedziale czasu od I do IX wieku n.e.) i nie zawierały ołowiu, a torf z tej warstwy charakteryzował się podwyższoną

10 Archiwum Śląskiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków, E. Foltyn, E. Foltyn, Sprawozdanie i dokumentacja z badań sondażowo-rozpoznawczych na stanowisku Żyglinek 2 (3), gm. Miasteczko Śląskie (28 wrzesień – 17 październik 2017) [mps].

11 T. Reyman, *Na śladach rudnic – igołomska „fabrica ferri”...*, s. 127: „i rudę utartą w ilości takiej jaka się da wziąć na koniec noża wysypuje i ciągle dodaje węgli, dopóki w ogóle ilość 2-ch lub 3-ch funtów rudy stopioną nie zostanie; potem rozwała się piecyk i wytopione żelazo na dnie się znajduje; niekiedy piece te w ziemi są lepienie”.

12 *Odczytano z torfowisk...*, s. 22, 42 (fotografie hematytu na węglu drzewnym).

podatnością magnetyczną. Podobne bryłki piasku spojonego hematytom, wydobyte z warstw torfu wytworzonego później, skażone są ołowiem.

Przekonujący wywód dotyczący stosowania hematytu jako surowca do pozyskiwania żelaza dymarkowego przedstawił w Internecie Marcin Marciniewski¹³ z Kielc.

Z torfowiska pod Żyglinem wykopano fragment wydrążonego pnia sosny o cechach sugerujących wykorzystanie go jako komina do wytwarzania tzw. ciągu kominowego¹⁴, zwiększającego istotnie temperaturę w paleniskach, stwierdzono też duże¹⁵ zanieczyszczenie węglami drzewnymi warstw torfu wytworzonego w ostatnich 6000–7000 lat w torfowiskach badanej zlewni.

Występowanie okruszków metali i ich rud (w tym tlenkowych i siarczkowych) w starych warstwach torfowisk¹⁶ również świadczy o dawnym pozyskiwaniu kopalin użytecznych na badanym obszarze.

Metoda wnioskowania

Włodzimierz Szczepaniak w monografii dotyczącej frakcjonowania metali w procesach termicznego przetwarzania biomasy i stałych odpadów komunalnych¹⁷ uzasadnia wydanie dzieła „potrzebą uporządkowania [...] złożonego i wielowątkowego obrazu przemian, jakim ulegają odpady podczas procesów termicznych, a zwłaszcza zawarte w nich metale ciężkie”:

Odpady mogą być poddane procesom termicznym podzielonym na trzy główne typy:

- a) procesy pirolizy rozumiane jako ogrzewanie bez doprowadzania gazów reakcyjnych,
- b) procesy zgazowania/spalania powietrzem – rozumiane jako ogrzewanie z doprowadzeniem powietrza, przy czym pojęcie zgazowania

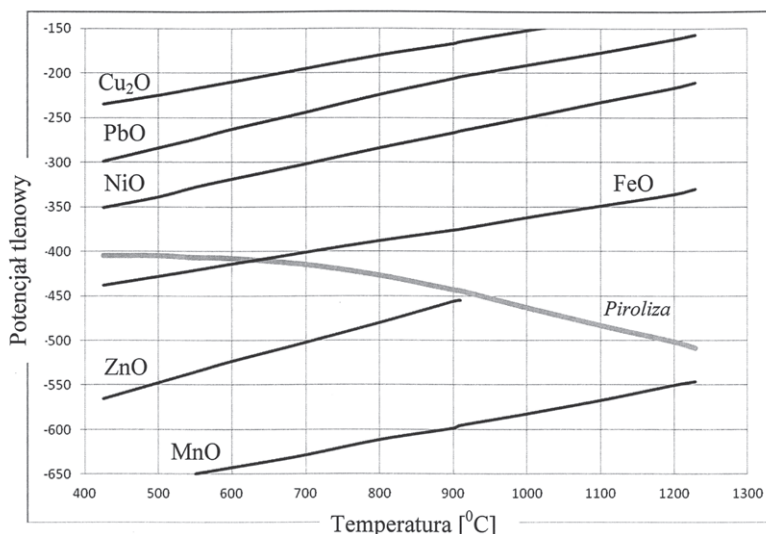
■ 13 M. Marciniewski, *Ruda*, [a:] www.hutnia.pl/pl/s,51,ruda.html, dostęp: 19.11.2017 (w przeciwieństwie do lansowanego tam typu dymarki – tzw. *hutni*).

14 *Odczytano z torfowisk...*, s. 22 (fotografie obiektu wykonane w trakcie prowadzonych wykopalisk).

15 W torfowiskach w rejonie Żygliny zanieczyszczenie węglem drzewnym przekracza o dwa rzędy wielkości stan spotykany w innych torfowiskach na obszarze kraju. Od tego zanieczyszczenia prawdopodobnie pochodzi nazwa miejscowości Żyglin.

16 *Odczytano z torfowisk...*, s. 12–13, 42 (tam fotografie zanieczyszczeń mineralnych pozyskanych z torfowisk).

17 W. Szczepaniak, *Frakcjonowanie metali w procesach termicznego przetwarzania biomasy i stałych odpadów komunalnych*, Wrocław 2005.



Ryc. 3. Potencjał tlenowy, $RT \ln(p_{O_2})$, równowagi tlenek metalu/metal oraz modelowego układu pirolizy drewna z drzew iglastych. W zakresach temperatur powyżej linii pirolizy poszczególne tlenki metali redukowane są do metalu, w temperaturach poniżej tej linii metale przechodzą w formę tlenków

Źródło: W. Szczepaniak, *Frakcjonowanie metali w procesach termicznego przetwarzania biomasy i stałych odpadów komunalnych*, Wrocław 2005, s. 31, rys. 7

odnosi się do tej części procesu, w której węgiel z fazy stałej przeprowadzany jest do fazy gazowej w reakcjach utleniania, a pojęcie spalania do następnego etapu, jakim jest utlenianie produktów zgazowania,

- c) procesy zgazowania parą wodną – rozumiane jako przeprowadzenie (szczególnie w wyższych temperaturach) węgla z fazy stałej do gazowej bez udziału tlenu (z wykorzystaniem pary wodnej).

W rozważaniach [W. Szczepaniaka – L.C.] ograniczono się do zakresu temperatur od 700°K (427°C) do 1500°K (1227°C) i ciśnienia standardowego 1 bara.

Skupiono się głównie na najbardziej powszechnym typie odpadów, reprezentowanym przede wszystkim przez odpady komunalne i zanieczyszczone metalami ciężkimi odpady organiczne (biomasy), takie jak drewno lub osady ściekowe¹⁸.

Autor wprowadził i zdefiniował tam pojęcie potencjału tlenowego układu. Bazując na wykresie przedstawiającym temperatury, w których zachodzi

redukcja rud tlenkowych poszczególnych metali do metalu podczas pirolizy materii organicznej – drewna drzew iglastych¹⁹, stwierdzono możliwość przypadkowego uzyskiwania metali przez praprzodków metodą najprostszą z możliwych, w procesie wytwarzania dziegiu z torfu zanieczyszczonego rudami tych metali (ryc. 3).

Opis proponowanej metody pozyskiwania metali w prehistorii

Podstawą metody pradawnego uzysku metali, w tym żelaza, jest przyjęcie dwuetapowości procesu. W pierwszym etapie sproszkowana ruda tlenkowa lub węglanowa zmieszana z węglem drzewnym lub inną materią organiczną (próchno, torf) ulega w temperaturze powyżej 800°C, teoretycznie już od około 700°C (tlenek żelaza FeO – ryc. 3), redukcji do metalicznego żelaza. Redukcja miedzi i ołowiu zachodzi w znacznie niższej temperaturze (Cu₂O, PbO – ryc. 3). Proces przebiega przy niedoborze tlenu w dymarce podobnej do przedstawionej na rysunku zamieszczonym w artykule T. Reymana. Z wykresu można odczytać, w jakiej temperaturze w procesie pirolizy materii organicznej, w tym przypadku pirolizy węgla drzewnego lub torfu, dodana ruda tlenkowa lub węglanowa ulegnie redukcji do metalu. Tlenki niklu, ołowiu i miedzi, których linie na wykresie leżą w całości powyżej tej oznaczonej jako piroliza, ulegną przemianom do metalu już w temperaturze około 420°C i wyższej, tlenek żelaza redukcji do metalu powyżej temperatury około 640°C. Tlenki cynku i manganu w przedstawionym na wykresie zakresie temperatur nie ulegną redukcji do metalu. Cynk ze względu na przejście w stan pary przed osiągnięciem temperatury wyznaczonej przebiegiem linii pirolizy nie przyjmie stanu stałego. W zakresie temperatur, w których krzywe biegną poniżej niej, metale przechodzą w postać tlenków.

Zasadą metody jest niedopuszczenie do stapienia się wsadu w komorze dymarki, lecz utrzymywanie go w postaci luźnej – jako mieszaniny resztek węgla drzewnych, popiołu drzewnego i zredukowanych do metalu ziaren. Przekraczanie temperatury topnienia żuźla lub metalu powoduje narastanie kłosa na dnie dymarki – materiału straconego w dalszym procesie uzyskiwania metali, w opisywanym przypadku żelaza. Wielokrotne

■ 19 Ibidem, s. 31, rys. 7.

użycie pieca²⁰ wywołuje narastanie kłosa wypełniającego dymarkę (po zostaje on w gruncie jako odpad), czyniąc ją bezużyteczną. Po redukcji 1–1,5 kg sproszkowanej rudy żelaza do metalu zaprzestaje się dosypywania paliwa i odcina dostęp powietrza do komory dymarki w celu zapobiegania procesowi odwrotnemu – zachodzącej poniżej krzywej pirolizy przemianie metalu w jego tlenek (ryc. 3).

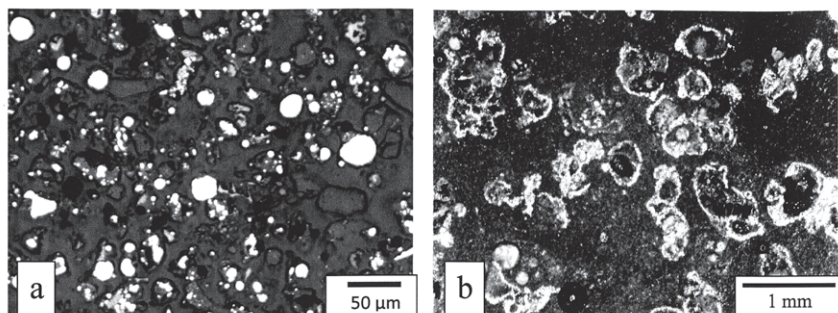
Weryfikacja metody

Wstępne badania laboratoryjne proponowanej metody wykonano, wykorzystując mały piec kuchenny podłączony do około 9-metrowego przewodu kominowego w jednopiętrowym budynku mieszkalnym. Palenisko jednorazowo wypełniono węglem drzewnym. Materiał zredukowano w tyglach porcelanowych z pokrywką wypełnionych sproszkowanym węglem drzewnym, próchnem drzew liściastych i wysuszonym torfem. W dwóch przypadkach na cztery testowane warianty otrzymano pozytywny efekt – całkowitą redukcję ziaren rudy do metalu po rozdrobnieniu ich do wielkości 25 μm (fot. 1a). Redukowano cztery sproszkowane rodzaje rud żelaza: magnetyt, hematyt, getyt i otrzymany od prof. S. Orzechowskiego na „Dymarkach Świętokrzyskich” dymarkowy żużel redukcyjny o litej strukturze. Grubsze ziarna rudy pokrywały się warstwą metalu tylko do głębokości około 30 μm (fot. 1b). W wyniku stopienia się szkliva zastosowanych naczyń porcelanowych zalane zostały wryte w szklwie oznaczenia, co nie pozwoliło na jednoznaczne określenie, w których próbkach rud lub żużła nastąpiła całkowita przemiana w metal. Pęknięcie górnej pokrywy pieca, w wyniku schładzania jej naczyń z zimną wodą, nie pozwoliło na kontynuowanie eksperymentów w opisanych warunkach.

Sproszkowana ruda miedzi (malachit) w warunkach eksperymentu redukowała się do metalu, zachowując poniżej temperatury topnienia miedzi kształt ziaren rudy (fot. 2a). Powyżej temperatury topnienia metal

■ 20 S. Orzechowski, *Igołomska fabrica ferri – historia zapomnianego odkrycia*, [w:] *Honoratissimum assensus genus est armis laudare: studia dedykowane Profesorowi Piotrowi Kaczanowskiemu z okazji siedemdziesiątej rocznicy urodzin*, red. R. Małyda-Legutko, J. Rodzińska-Nowak, Kraków 2014, s. 297–298: „należał on [piec] do grupy pieców wbudowanych w ścianę zagłębioną w podłoże pracowni hutniczej [...]. Używano ich [tych pieców] kilkakrotnie, usuwając »na zimno« powstały w trakcie procesu żużel, po skończeniu każdego procesu wytopu. Czynność tę wykonywano korzystając z otworu łupkowego umieszczonego tuż nad kotlinką, który po wydobyciu żelaza i wyczyszczeniu kotlinki zamurowywano. Obiekty tego typu funkcjonowały do chwili ich technicznego zużycia, po czym przesuwając ścianę pracowni budowano kolejne”.

przybierał formę kulistą (fot. 2b). Sproszkowany malachit wymieszany ze sproszkowanym sfalerytem (rudą cynku) w warunkach eksperymentu dał metal o zróżnicowanym składzie – od czystego cynku do czystej miedzi, przez stop o zróżnicowanej proporcji obydwu metali (fot. 3).

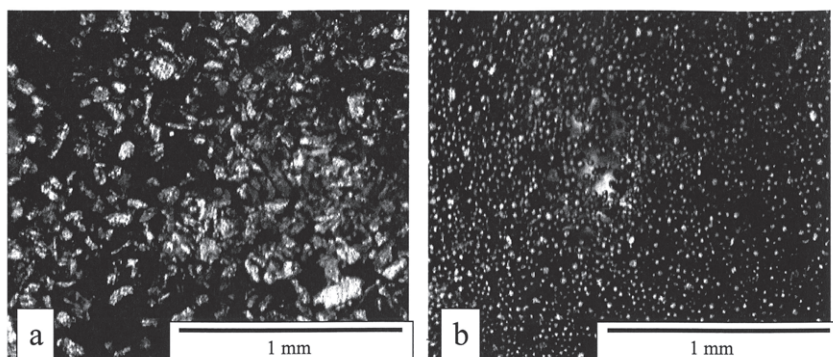


a - frakcja <25 µm,

b - frakcja < 1 mm

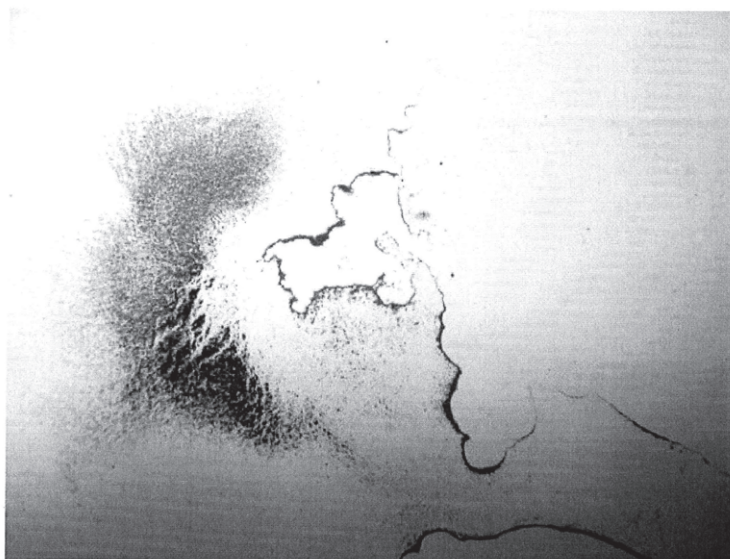
Fot. 1. Żelazo uzyskane z prehistorycznego żuźla dymarkowego podczas pirolizy torfu. Błyszczące żelazo (ferryt) widoczne na fotografiach zgładów – ziarnach metalu zatopionych w preparacie utwardzonym żywicą epoksydową. Redukcja tzw. żuźla dymarkowego do metalicznego żelaza metodą pirolizy materii organicznej zaszła w całej objętości ziaren o średnicy poniżej 0,025 mm (jasne pola na fot. 1a). Na ziarnach o większej średnicy redukcja do metalu zaszła tylko do określonej głębokości ziaren (jasne otoczki metalu na poszczególnych ziarnach żuźla dymarkowego fot. 1b)

Fot. M. Stawarz (fot 1a), L. Chróst (fot. 1b)



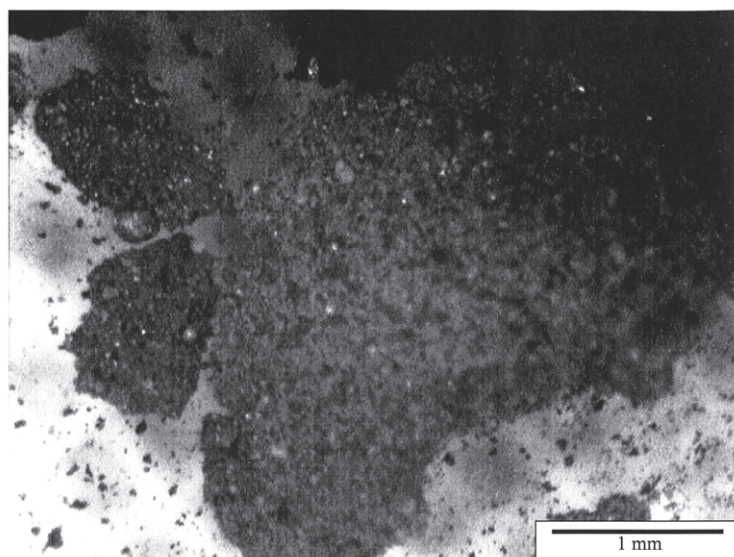
Fot. 2. Metaliczna miedź uzyskana z roztartego malachitu podczas pirolizy torfu: a) poniżej temperatury topnienia metalu, b) po przekroczeniu temperatury topnienia

Fot. L. Chróst



Fot. 3. Pył miedzi wypłukanej ze zwęglonego torfu po pirolizie materii organicznej z dodatkiem roztartego malachitu

Fot. L. Chróst



Fot. 4. Tkwiące w zwęglonym torfie ziarna mosiądzu wytopionego ze smitsonitu i malachitu (rud miedzi i cynku) podczas pirolizy torfu

Fot. L. Chróst

Podsumowanie

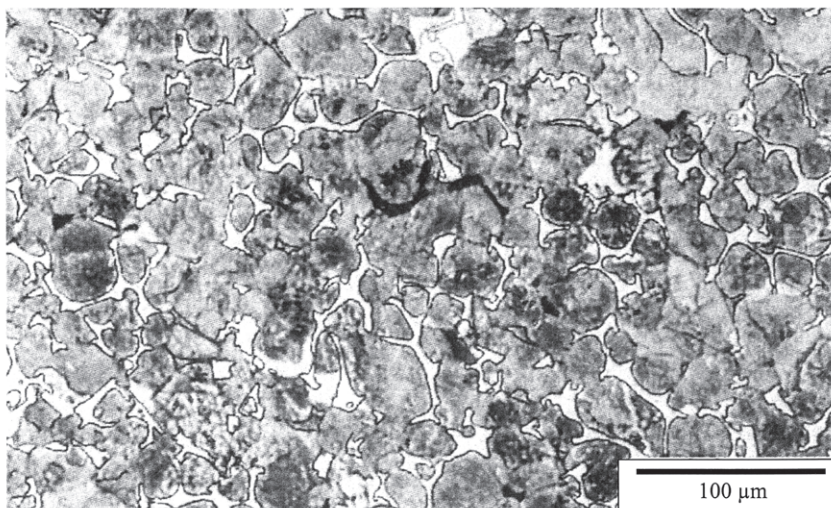
Metoda gwarantująca efektywność procesu pozyskiwania żelaza w procesie dymarkowym wymaga spełnienia kilku warunków. Po pierwsze, otoczenia paleniska dymarki grubą warstwą gruntu stanowiącego izolację cieplną lub zagłębienia go w gruncie, co zapewnia, po jego rozgrzaniu do temperatury powyżej 800°C, dużą bezwładność cieplną dymarki w trakcie późniejszego procesu redukcji do metalu żelaza przy ograniczonym wówczas dostępie powietrza. Wydłużenie czasu redukcji tlenków do metalu umożliwia przemianę w metal grubszych frakcji rudy. Paleniska naziemne pozbawione dodatkowej izolacji cieplnej wymagają dla utrzymania odpowiedniej temperatury ciągłego dostępu powietrza hamującego proces redukcji. Moim zdaniem w czasie rozgrzewania dymarki prawdopodobnie stosowano naziemne przewody kominowe zawieszane na przesuwnych konstrukcjach w celu wywołania tzw. ciągu kominowego zwiększającego żar spalanego węgla drzewnego wprost proporcjonalnie do długości liniowej komina²¹. Na to wskazuje ciasne upakowanie pozostawionych w gruncie kłoców żużla i ich układ sugerujący stosowanie przesuwnej konstrukcji obsługującej w jednym położeniu kolejno kilka dymarek. Do takiego wniosku prowadzą wyniki wykopalisk archeologicznych w torfowisku w Żyglinku oraz układ piecowisk uporządkowanych przedstawiany w literaturze przedmiotu. Paleniska nieliczne również usytuowane są blisko siebie, być może ze względu na łatwość ich przysypywania gruntem na pewnym etapie procesu technologicznego. Po drugie, stosowania dwuetapowego procesu produkcji. W etapie pierwszym rozgrzewano komorę dymarki i otaczający ją grunt powyżej temperatury redukcji żelaza, to jest powyżej 800°C. Następnie dodawano węgiel drzewny wymieszany z pyłem hematytu i ograniczano dostęp powietrza w celu redukcji rudy

■ 21 Starożytne piece stosowane w dawnych gospodarstwach domowych miały typowy kolbowaty kształt (zob. Internet „starożytny piec”). Pomysł posadowienia takiego pieca pod powierzchnią gruntu, by zapewnić możliwie dużą jego izolację cieplną, nie wydaje się przekraczać możliwości intelektualnych praprzodków. Kolbowaty kształt wynika z pozytywnego efektu zwiększającego żar w centralnej części pieca, a wydłużona szyjka pieca wytwarza tzw. ciąg kominowy jeszcze bardziej zwiększając żar w palenisku. Dlaczego starożytni mieli by rezygnować z takich udogodnień? Żużel walcowatego kształtu w takim piecu utworzy się w wyniku zmiennej w czasie efektywnej objętości paleniska, wywołanej narastaniem kłoca, co zmniejszać będzie objętość, w której temperatura może topić wsad.

Wzór na ciąg kominowy ma postać: $ps = h * g (pp - ps)$ gdzie: ps – ciąg kominowy [Pa], h – wysokość komina [m], pp – gęstość powietrza zewnętrznego [kg/m³], ps – gęstość spalin [kg/m³], za [@:] www.naukowiec.org/wzory/inzynieria/ciag-kominowy_2605.html, dostęp: 3.12.2017.

do metalu. Po pewnym czasie odgarniano grunt od strony zasłoniętego wlotu do dymarki i szybko wygarniano oraz schładzano luźną zawartość wyjętą z jej komory. Wydzielano na przykład metodą szlichową uzyskany pył metalicznego żelaza (fot. 3), który po niskotemperaturowym wypaleniu resztek węgla drzewnego, w etapie drugim, stapiano w kęs w innym piecu, na przykład w zagotowanym boraksie. Metoda szlichowa polega na przepłukiwaniu w nieckowatym naczyniu drobnych frakcji materiałów o zróżnicowanym ciężarze właściwym, co prowadzi do gromadzenia się na dnie naczynia ziaren ciężkich – podobnie jak przy wypłukiwaniu złota z piasku rzecznoego.

Badania laboratoryjne wykazały, że ziarna pyłu po redukcji w materii organicznej (w temperaturze powyżej temperatury topienia żelaza), składały się z czystego ferrytu (żelaza nie zawierającego węgla), a próbka stopiona we wrzącym boraksie bez oczyszczenia z resztek pyłu węglowego zawierała tylko 0,7% węgla (fot. 5).



Fot. 5. Stal o typowej dla 0,7% zawartości węgla strukturze otrzymana przez stopienie we wrzącym boraksie uzyskanego pyłu żelaza – kolonie perlitu (pola ciemniejsze) otoczone siatką ferrytu (pola jasne)

Źródło: Ekspertyza metaloznawcza – raport z pracy N0 = 9978/BL, pt. Ocena struktury żelaza otrzymanego z żużla dymarkowego po redukcji i stopieniu we wrzącym boraksie, wykonana w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach dla SMZT, lipiec 2018, fot. J. Wiedermann

Dane o zawartości węgla w mieczach i pikach (z 13 przebadanych obiektów) z okresu rzymskiego²² wykazały następujące zawartości węgla w żelazie: od jego braku (1 przypadek) do średnio około 0,4% (11 przypadków). Tylko jeden przedmiot zawierał bardziej uwęglone żelazo.

Wypaliska prowadzone na wydmy w sąsiedztwie torfowiska w Żyglinku, pod kierunkiem Eugeniusza Foltyna, podjęte z inicjatywy Stowarzyszenia Miłośników Ziemi Tarnogórskiej, finansowane przez województwo śląskie, sugerują pozyskiwanie hematytu z piaskowców pstrych w procesie termicznego rozluźniania i moczenia w wodzie oraz wydzielania metodą sedymentacyjną (jak we wspomnianym opisie M. Marciniewskiego). Duża bryła wydobyta z warstw torfowiska, tworzących się od czasów rzymskich (od ok. 100 r. n.e.) po około 900 r. n.e., zawierała około 36% wagowych hematytu łatwo pozyskanego z rozmokłego piaskowca wyżej opisaną metodą.

Wnioski

Dalszych badań wymaga poznanie grubości warstw przemiany do metalu pokruszonej rudy w zależności od czasu prażenia w określonych przedziałach temperatury między 800°C a 1200°C. Wymagane jest również określenie zużycia węgla drzewnego i czasu potrzebnego do wstępnego ogrzania znacznej warstwy gruntu otaczającego dymarkę, w celu utrzymania odpowiedniej temperatury w późniejszym procesie redukcji rudy do metalu, zapoczątkowanego nowym wsadem węgla drzewnego pokrytego pyłem rudy metalu przy ograniczonym na tym etapie dostępie powietrza. Również wymagane jest poznanie celu pokrywania w procesie dymarkowym części węgla drzewnych gliną. Prawdopodobnie umożliwiałoby to dodatkowe ograniczenie dostępu powietrza podczas spalania i wytwarzanie większej ilości tlenku węgla – gazu o silnych właściwościach redukcyjnych.

Wyniki powyższych badań posłużą do optymalizacji procesu pozyskiwania żelaza w dymarce typu małopolskiego, której budowa i uruchomienie do celów archeologii eksperymentalnej planowane jest w skansenie Kopalni Srebra i Ołowiu w Tarnowskich Górach.

■ 22 Z. Kędzierski, J. Stępiński, *Metaloznawstwo żelaza z okresu rzymskiego na ziemiach polskich*, [w:] *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia – Metalurgia – Edukacja*, red. S. Orzechowski, I. Suliga, Kielce 2006, s. 192–193 (tam charakterystyka metaloznawcza wyrobów wykonanych z żelaza dymarskiego).

Ancient Metallurgy (Eneolith to the Early Middle Ages) in the Context of Archaeological and Geochemical Investigations Carried Out in the Basins of the Upper Brynica and Stoła Rivers and Graniczny Creek

The study discloses the method that can be used for extraction of metals (Cu, Cu-Zn, Pb, Ag and Fe) by means of low temperature reduction of oxygen and carbonate ores in organic substances (peat or touchwood). The method presented herein eliminates errors of former attempts to extract bloomery iron. The discussed approach is based on the results of archaeological, mineralogical and geochemical surveys that were carried out in the region of Tarnowskie Góry – a town in the Southern Poland where ores of precious metals used to be mined in the past.