

PAŃSTWOWE MUZEUM ARCHEOLOGICZNE

w Warszawie

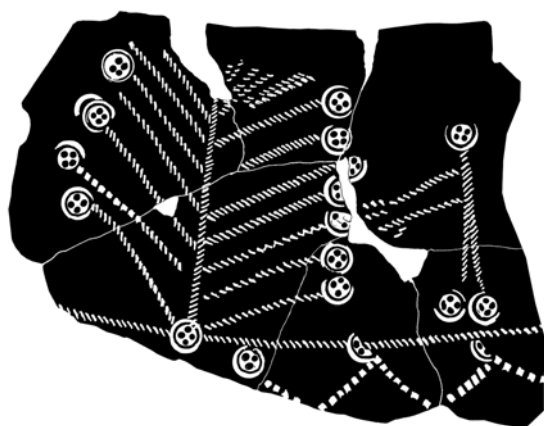


WIADOMOŚCI ARCHEOLOGICZNE

BULLETIN ARCHÉOLOGIQUE POLONAIS

TOM (VOL.) LXVII

2016



WARSZAWA 2016 VARSOVIE

**WIADOMOŚCI
ARCHEOLOGICZNE**

TOM LXVII

Redaguje zespół / Editorial staff:

dr Jacek Andrzejowski (sekretarz redakcji / managing editor), dr Wojciech Brzeziński (redaktor naczelny / editor in chief),
mgr Grażyna Orlińska, mgr Radosław Prochowicz, mgr Barbara Sałacińska,
mgr Andrzej Jacek Tomaszewski, mgr Katarzyna Watemborska-Rakowska

Rada Naukowa / Scientific Advisory Board:

Przewodniczący / Chairman – prof. dr hab. **Wojciech Nowakowski** (Instytut Archeologii Uniwersytetu Warszawskiego),
prof. dr **Audronė Bliujienė** (Klaipėdos universitetas), prof. dr hab. **Claus von Carnap-Bornheim** (Stiftung
Schleswig-Holsteinische Landesmuseen, Zentrum für Baltische und Skandinavische Archäologie, Schleswig),
prof. dr hab. **Zbigniew Kobyliński** (Instytut Archeologii Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego),
prof. dr hab. **Jerzy Maik** (Instytut Archeologii i Etnologii Polskiej Akademii Nauk),
prof. dr hab. **Dieter Quast** (Forschungsinstitut für Archäologie, Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Mainz),
prof. dr hab. **Paweł Valde-Nowak** (Instytut Archeologii Uniwersytetu Jagiellońskiego)

Recenzenci tomu / Peer-reviewed by:

dr hab. **Anna Bitner-Wróblewska**, prof. dr hab. **Wojciech Blajer**, prof. dr hab. **Sylwester Czopek**,
dr hab. prof. UMCS **Jerzy Libera**, prof. dr hab. **Magdalena Mączyńska**, prof. dr hab. **Wojciech Nowakowski**,
dr hab. **Szymon Orzechowski**, dr hab. prof. UŁ **Jan Schuster**

Tłumaczenia / Translations:

Anna Kinecka

Jacek Andrzejowski, Magdalena Małek, Jan Schuster, Sylwia Twardo

Korekta / Proof-reading

Autorzy

Katarzyna Watemborska-Rakowska

Skład i łamanie / Layout:

JRJ

Rycina na okładce: fragment fryzu z popielnicy z Kosina. Rys.: Anna Potoczny i Jacek Andrzejowski
Cover picture: part of an elaborate decoration of an orn from Kosin. Drawing: Anna Potoczny and Jacek Andrzejowski

© Państwowe Muzeum Archeologiczne w Warszawie, 2016

© Autorzy, 2016

Państwowe Muzeum Archeologiczne jest instytucją
finansowaną ze środków
Samorządu Województwa Mazowieckiego



Pełen spis zawartości „Wiadomości Archeologicznych”: <http://www.wiadomosci-archeologiczne.pl/spisy-tresci/>

List of contents of “Wiadomości Archeologiczne”: <http://www.wiadomosci-archeologiczne.pl/spisy-tresci/>

Adres redakcji / Editorial office:

Państwowe Muzeum Archeologiczne, ul. Długa 52 (Arsenał), 00-241 Warszawa
tel.: +48 (22) 5044 841, +48 (22) 5044 813; fax: +48 (22) 831 51 95
e-mail: j.andrzejowski@wiadomosci-archeologiczne.pl

<http://www.wiadomosci-archeologiczne.pl>

WIADOMOŚCI ARCHEOLOGICZNE

Tom (Vol.) LXVII

SPIS TREŚCI

Contents

ROZPRAWY

- Audronė Bliujienė, On Both Sides of the Middle Reaches of the Nemunas River. A New Approach to Old Problems 3
Po obu stronach środkowego Niemna. Nowe spojrzenie na dawne problemy
- Bartosz Kontny, Siekiery tulejkowe z kultur bogaczewskiej i sudowskiej 37
Socketed Axes in the Bogaczewo and Sudovian Cultures
- Renata Małdyda - Legutko, Funkcje użytkowe niektórych elementów wystroju pasów ludności kultury przeworskiej. Casus kabłączków, zawieszek, skuwek z pierścieniem 65
The Utilitarian Function of Selected Belt Fittings of the Przeworsk Culture People. The Case of Belt Hangers, Belt Pendants and Belt Fittings with a Pendent Ring

MISCELLANEA

- Mirosława Andrzejowska, Uwagi o technice zdobienia, pochodzeniu i chronologii naczynia z przedstawieniem figuralnym z Kosina, pow. kraśnicki 111
Some Remarks about the Decoration, Provenance and Chronology of a Vessel with Figural Representations from Kosin, Kraśnik County
- Grażyna Orlińska, Groby w skrzyniach kamiennych na cmentarzysku kultury łużyckiej z Cichowa, pow. przasnyski 131
Graves with Stone Cists in a Lusatian Culture Cemetery at Cichowo, Przasnysz County
- Andrzej Przychodni, Ireneusz Suliga, Charakterystyka łupki żelaznej i kłosa żuźlowego z doświadczalnego procesu dymarskiego 147
Characteristic of Iron Bloom and Slag Block from Experimental Iron Smelting Process
- Piotr Mączynski, Beata Polit, Wytwory krzemienne z cmentarzyska z późnej starożytności Nezac na Krymie 175
Flint Artefacts from a Late Antique Cemetery Neyzats in Crimea

MATERIAŁY

- Marcin Woźniak, Cmentarzysko kultury wielbarskiej w Litwinkach, pow. nidzicki 195
A Cemetery of the Wielbark Culture at Litwinki, Nidzica County
- Jan Schuster, The Świlcza Hoard. An Extraneous 5th Century AD Complex from the Northern Carpathian Foreland 227
Skarb ze Świlczy. „Obcy” zespół z V wieku po Chr. z północnego przedpola Karpat

KRONIKA

- Barbara Sałacińska, Sławomir Sałaciński, Wspomnienie o Annie Uzarowicz-Chmielewskiej (1935–2015) 265

WYKAZ SKRÓTÓW / ABBREVIATIONS

271

ANDRZEJ PRZYCHODNI, IRENEUSZ SULIGA

CHARAKTERYSTYKA ŁUPKI ŻELAZNEJ I KLOCA ŻUŻLOWEGO Z DOŚWIADCZALNEGO PROCESU DYMARSKIEGO

CHARACTERISTIC OF IRON BLOOM AND SLAG BLOCK
FROM EXPERIMENTAL IRON SMELTING PROCESS

Wprowadzenie

Produktem starożytnego procesu dymarskiego¹ prowadzonego w piecu kotlinkowym² była łupka żelazna, uformowana w wyniku procesów fizyko-chemicznych zachodzących w szybie pieca. Uzyskane w ten sposób żelazo powinno być w niewielkim stopniu zanieczyszczone zażuzleniami i wtrąceniami niemetalicznymi, a ponadto niskowęglowe – ferrytyczne³, co gwarantowało odpowiednią plastyczność podczas kucia.

Stosunkowo duża wartość i znaczenie żelaza na terenach środkowoeuropejskiego *Barbaricum* w okresie wpływów rzymskich (por.: K. Bielenin 1992, s. 197–199; Sz. Orzechowski 2013, s. 268–269, 286, 289) prawdopodobnie są przyczyną niemal zupełnego braku odkryć łupki żelaznych. Większość znanych nam egzemplarzy jest już mocno zagęszczona poprzez kucie do postaci plackowatego kęsiska (K. Bielenin 1992, s. 83–84, ryc. 43; por. A. Espelund 2009, s. 51, ryc. 3)⁴. Za wyjątkowe należy

uznać znalezienie w okresie międzywojennym w Pawłowie, pow. starachowicki, kilkunastu mocno już przetworzonych kęsów żelaznych o kształcie zbliżonym do ostrosłupa (Sz. Orzechowski, A. Wrona 2015, s. 255, przyp. 1), które miano następnie przerobić na narzędzia, oręż czy też ozdoby⁵. Notowano też świadectwa kucia surowych łupki, w postaci grąpi (M. Radwan 1963, s. 64; Z. Kędzierski, J. Stepiński 2006, s. 175).

Wobec braku w materiale źródłowym oryginalnych, nieprzetworzonych łupki, formowanie ich w piecu dymarskim typu kotlinkowego można badać jedynie na produktach „wytopów”⁶ doświadczalnych. Takie możliwości stworzyły próby prowadzenia procesu dymarskiego zgodnie koncepcją *powierzchni swobodnego krzepnięcia* (dalej PSK) opracowaną przez profesora Kazimierza

przez mocne obkucie kęsy żelaza zostały znalezione w Starej Słupi, pow. kielecki, stan. 8 (K. Bielenin 1992, s. 228:A.22), oraz w Gardzienicach (dziś. Gardzienice-Kolonia), pow. lipski (K. Bielenin 1992, s. 220:A.4).

¹ Mamy tu na myśli proces, który realizowany był w warsztatach hutniczych funkcjonujących na terenie ziem polskich w okresie wpływów rzymskich, głównie w środowisku kultury przeworskiej.

² K. Bielenin 1973; 1992; R. Pleiner 2000, s. 45–47, 149–163; 2006; por. także Sz. Orzechowski 2013, s. 95–110.

³ Żelazo, powstałe w wyniku zachodzącej w piecu redukcji bezpośredniej tlenków żelaza zawartych w rudzie, było następnie, dzięki kontaktowi z tlenkiem węgla, poddane częściowo wtórnemu nawęgleniu (np. dyfuzyjnie). W metaloznawstwie stop żelaza z węglem nazywany jest stalą, a stop niskowęglowy o zawartości węgla poniżej 0,02% – stalą ferrytyczną. Ze względu na odmienną technologię uzyskiwania stali, produkt będący efektem tego pierwszego będziemy określać mianem żelaza.

⁴ Na terenie starożytnego okręgu świętokrzyskiego przekształcone

⁵ W Górach Świętokrzyskich na stanowiskach *stricte* produkcyjnych nie ma praktycznie żadnych gotowych wyrobów żelaznych. Nieliczne pochodzą jedynie z osad, które najprawdopodobniej użytkowane były przez ludność zajmującą się produkcją żelaza (K. Bielenin 1992, s. 84–85, ryc. 44).

⁶ Należy zwrócić uwagę na nieadekwatność określenia „wytop” (ang. *smelting*) w odniesieniu do procesu uzyskiwania żelaza stosowanego w starożytności, także używanego często dla opisu średniowiecznego procesu dymarskiego. Procesy te ze względu na niską temperaturę pieca (<1538° C) nie powodowały bowiem upłynnienia, czyli wytopienia samego żelaza, a w trakcie ich trwania przez fazę ciekłą przechodził wyłącznie żużel dymarski. Termin „wytop” jest jednak dość powszechnie używany – także w literaturze – zatem został też przyjęty w niniejszym artykule.

Bielenina, których rezultatem są surowe łupki żelazne i kłocze żuźlowe powstałe w kotlinie pieca. Przedmiotem prezentowanych tu studiów były łupki wytworzone w latach 2013–2015 przez Adriana Wronę i Andrzeja Przychodniego wraz z współpracownikami⁷, oraz wcześniej samodzielnie przez Adriana Wronę. Celem badań była charakterystyka metaloznawcza łupki i żuźła, oparta przede wszystkim na eksperymencie przeprowadzonym w Starachowicach w październiku roku 2013, zmierzająca do opisu mechanizmu formowania żelaza w szybie pieca.

Ewolucja poglądów na budowę pieca i przebieg starożytnego procesu dymarskiego

Historia systematycznych badań naukowych nad starożytnym procesem dymarskim w regionie świętokrzyskim sięga połowy lat 50. poprzedniego stulecia (por.: I. Suliga 2006; K. Bielenin 2011; Sz. Orzechowski, A. Przychodni 2014). Pionierzy badań: Mieczysław Radwan (mechanik z wykształcenia, hutnik z praktyki i historyk hutnictwa), Kazimierz Bielenin (archeolog), Stanisław Holewiński (wielkopieczownik), Wacław Różański (metaloznawca) mimo, że dysponowali specjalistyczną wiedzą w dziedzinach hutnictwa i historii techniki, nie umieli jednak wyjaśnić odkrywanych w trakcie badań archeologicznych śladów starożytnej produkcji żelaza. Rekonstruując piec i sposoby wytwarzania żelaza zmuszeni byli posługiwać się metodą prób i błędów.

Zachowane relikty „wymurówki”, czyli części nadziemnej pieca, w formie charakterystycznych *quasi* cegieł z lesu⁸, i ślady wypełniska w postaci grapi i kawałków węgla drzewnego⁹ wskazywały na szybową konstrukcję obiektu hutniczego, związaną z podziemną kotlinką, a także na prowadzenie procesu z użyciem węgla drzewnego i zasilanie pieca dmuchem (naturalnym lub sztucznym) poprzez otwory uformowane we wspomnianych ceglach. Świadczenia archeologiczne wskazywały jednocześnie (o czym wspomniano wcześniej), że warunki termiczne w takim obiekcie hutniczym nie pozwalały na przetopienie otrzymanego żelaza, zatem produktem staro-

żytnego pieca dymarskiego powinno być żelazo prawie ferrytyczne, lokalnie nawęglone dyfuzyjnie w atmosferze spalin, lub pośrednio, poprzez eutektyki fosforowe: Fe-Fe₃P, lub Fe-Fe₃P-Fe₃C (Z. Kędzierski, J. Stępiński 2006, s. 175). Wyniki badań archeologicznych narzucały metalurgom zakres proponowanych rozwiązań technologicznych i tej zasady konsekwentnie przestrzegano przy rekonstrukcjach pieca i procesu (K. Bielenin 2011, s. 79)¹⁰.

Poza żelazem metalicznym, w trakcie procesu dymarskiego powstawał żużel. Był on materiałem odpadowym, mającym jednak istotny wpływ na przebieg procesu metalurgicznego, mechanikę ruchu materiałów wsadowych i przepływ gazów w szybie pieca. We współczesnej metalurgii panuje przekonanie, że jakość żuźła świadczy o dobrej jakości wywarzanego surowca. W pierwszych pracach z tego zakresu S. Holewiński (1956, s. 29–30, 260) charakteryzował żużel dymarski jako stopioną masę rudną, nieznacznie pozbawioną tlenków żelaza w wyniku słabo zaawansowanej redukcji. Wpływ żuźła na ruch materiałów wsadowych i przepływ gazów uznawał za bardzo znaczący, przede wszystkim ze względu na stosunkowo małą średnicę pieca i relatywnie dużą ilość wytwarzanego w nim żuźła. Skład chemiczny odkrywanych żużli dymarskich świadczył o niestosowaniu topnika, co uznano za cechę charakterystyczną dla centrum świętokrzyskiego (Sz. Orzechowski 2013, s. 74–75). W pracach S. Holewińskiego (1956, s. 260) pojawił się też wątek spływu żuźła do kotlinki piecowej; owo spływanie żuźła miało się odbywać sukcesywnie podczas całego procesu.

Próby rekonstrukcji pieca i samego procesu podjęte zostały kilka lat po rozpoczęciu prac archeologicznych na terenie starożytnego okręgu hutniczego w Górach Świętokrzyskich (Ryc. 1). Pierwsze doświadczenia prowadzono w ogniskach o średnicy 40–50 cm (M. Radwan 1958) i piecach cylindrycznych o ściankach wysokości 20 cm, z dmuchem podawanym od góry (M. Radwan 1959). W kolejnych eksperymentach piece przyjęły kształt stożkowaty, a ich część szybową podwyższano do 50 cm. Budowane na potrzeby prac doświadczalnych w latach 80. XX wieku obiekty hutnicze miały już wysokość 80–120 cm oraz nieznajdujące analogii w materiałach archeologicznych kielichowate zakończenie szybu (W. Różański 1982, s. 55). Wysokość pieców z ostatnich, omawianych tu szerzej eksperymentów, wynosiła ok. 160 cm; były one zasilane powietrzem z użyciem dmuchu sztucznego.

W trakcie wielu wytopów doświadczalnych, prowadzonych przez zespoły badawcze K. Bielenina i M. Radwana, zdołano ustalić szczegóły konstrukcji pieca, w tym rodzaj budulca, oraz określić typ materiałów wsado-

⁷ W eksperymentach prowadzonych w latach 2013–2015 uczestniczyli: Szymon Orzechowski, Mariola i Marek Banasiewiczowie, Ada Banasiewicz, Daniel Czernek, Paweł Gławiński, Sławomir Kitowski, Kamil Bilski, Małgorzata Rakalska i Miriam Zawadzka. We wcześniejszym etapie prac korzystano też z doświadczenia eksperymentatora z Helteborg Museum w Danii – Jensa Jørgena Olesena, który w czasie „Dymarek Świętokrzyskich” w latach 2009–2010 prezentował z powodzeniem proces uzyskiwania żelaza w piecu napowierzchniowym z bocznym spustem żuźła, z użyciem darniowych rud duńskich. Analizy efektów prac eksperymentalnych wykonał dr inż. Ireneusz Suliga

⁸ Przykładami mogą być ułamki szybów znalezione na Łysej Górze, pow. kielecki, stan. 10 (K. Bielenin 1992, s. 70, 231:B.11, ryc. 32) czy też kształtki odkryte w Bilczy-Zastawiu, pow. kielecki, stan. 8/45 (A. Przychodni 2002, s. 59, ryc. 16).

⁹ Por. opis wyników badań w Jeleniowie, pow. kielecki, stan. 4 (por. K. Bielenin 1992, s. 83, 238:C.17).

¹⁰ *Szliśmy tą drogą razem, lecz każdy miał swój indywidualny kierunek [...] Każdy [...] analizował odkrywane materiały i związane z nimi zjawiska ze swojego punktu odniesienia, uzupełniając je wynikami badań drugiej strony.*

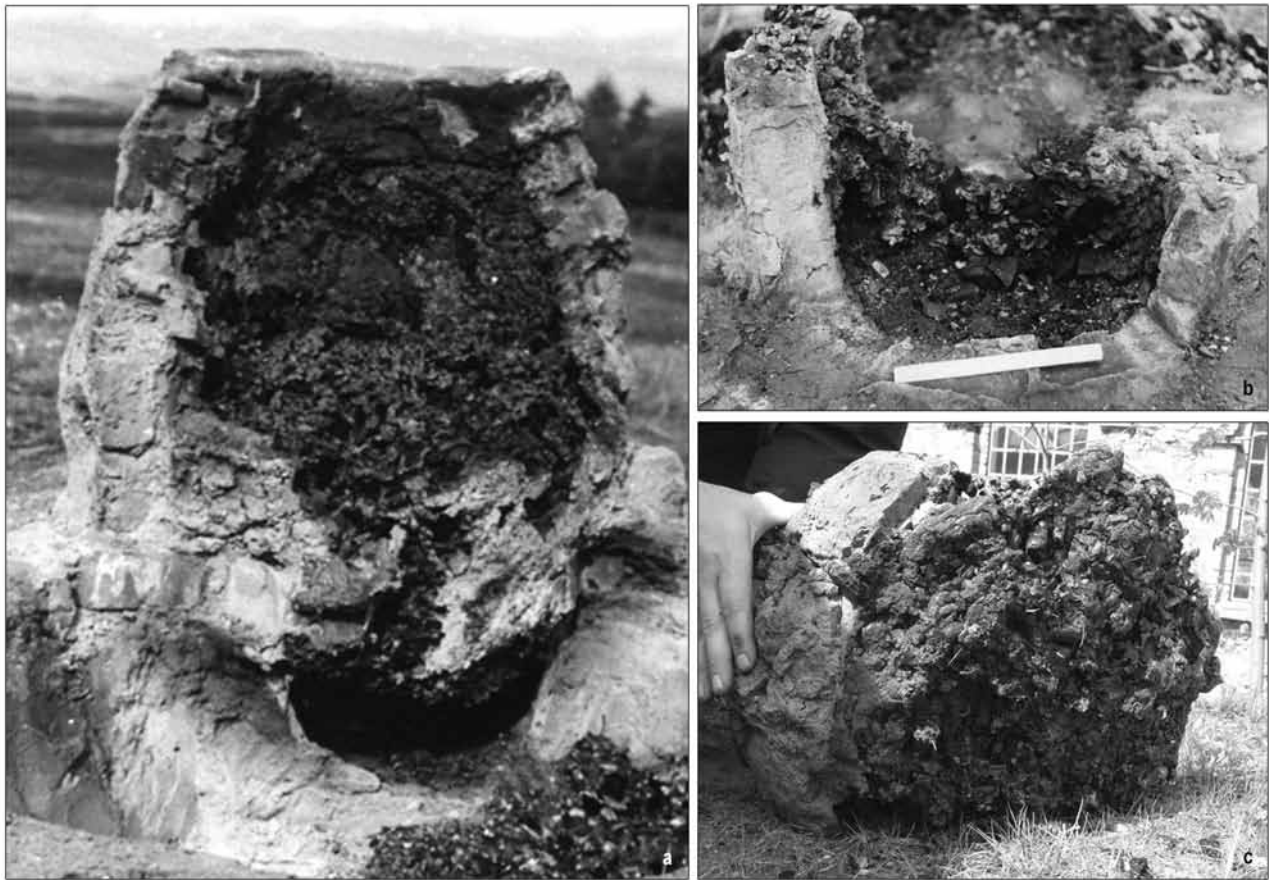
wych. Preferowano dmuch naturalny poprzez dwa otwory dmuchowe. Podczas tych eksperymentów uzyskiwano bardzo podobne do siebie produkty (Ryc. 2). Nie odpowiadały one jednak oczekiwaniom badaczy oraz nie znajdowały potwierdzenia w źródłach archeo-

logicznych. Nie zdołano bowiem uzyskać kłoca żużlowego w kotlinie (I. Suliga 2006, s. 173). Niekiedy ilość otrzymanego w trakcie doświadczeń żelaza była większa, jednak nie udawało się osiągnąć efektu jego separacji od żużla. Na przekrojach brył widoczne były siatki



Ryc. 1. Evolucja rekonstrukcji pieców używanych na potrzeby badań eksperymentalnych nad procesem dymarskim: a – prace doświadczalne na terenie AGH w latach 1958–1959; b – wytopy doświadczalne w Nowej Słupi w latach 1962–1964; c, d – eksperymenty dymarskie podczas „Dymarek Świętokrzyskich” w latach 70. XX wieku; e – piec dymarski wykorzystywany w czasie eksperymentu prowadzonego przez Jensa Jørgena Olesena w Starachowicach w 2008 roku. Fot.: K. Bielenin, T. Pilecki i M. Fludziński, Archiwum Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (dalej: AGH) i Świętokrzyskiego Stowarzyszenia Dziedzictwa Przemysłowego (dalej: ŚSDP)

Fig. 1. Evolution of modern replicas of furnaces used in the experimental studies of the bloomery process: a – experimental work at AGH University of Science and Technology, 1958–1959; b – experimental smelts at Nowa Słupia, 1962–1964; c, d – bloomery experiments during the “Holy Cross Bloomeries”, 1970s; e – a bloomery furnace used in the experiments of Jens Jørgen Olesen in Starachowice, 2008. Photo: K. Bielenin, T. Pilecki and M. Fludziński, Archive of Stanisław Staszic University of Science and Technology in Cracow (subseq. AGH) and of the Holy Cross Mts. Industrial Heritage Association (subseq. ŚSDP)



Ryc. 2. Aglomerat żelazisto-żuźlowy uzyskiwany podczas „wytopów” doświadczalnych: a – Nowa Słupia, 1963 rok; b – Nowa Słupia, „Dymarki Świętokrzyskie”, 2000 rok; c – Stalowa Wola, 2007 rok. Fot.: K. Bielenin (a), Archiwum AGH i ŚSDP (b–d)
 Fig. 2. Iron-slag agglomerate from experimental smelts: a – Nowa Słupia, 1963; b – Nowa Słupia, “Holy Cross Bloomeries”, 2000; c – Stalowa Wola, 2007. Photo: K. Bielenin (a), AGH and ŚSDP archive (b–d)

żelaza na granicach pęcherzy gazowych i kawałków węgla drzewnego (Ryc. 3) na tle żuźła.

Taka bryła mogła być i była uznawana za właściwy produkt pieca dymarskiego pod warunkiem późniejszego obtapiania, wyciskania, czy też kruszenia żuźła w tzw. przeróbce postredukcyjnej, realizowanej w odrębnym palenisku, z wykorzystaniem kowadła i młota. Sugerowały to opisy i drzeworyty zawarte w XVI-wiecznym dziele *De re Metallica* (G. Agricola 2000, s. 379–380), dotyczące dymarek średniowiecznych i nowożytnych, o innej konstrukcji i technologii otrzymywania żelaza niż w wypadku starożytnych pieców dymarskich, chociaż również na drodze redukcji bezpośredniej tlenków żelaza zawartych w rudzie. Dul żelazny¹¹ wyjmowany był z zaprawy dymarki po częściowym odprowadzeniu żuźła przez tzw. lachor¹². Ten sposób uzyskiwania żelaza nie pozwalał

na jego prawidłowe obsączenie z żuźła i oczyszczenie z węgla. Dul wymagał dalszej, mechanicznej puryfikacji.

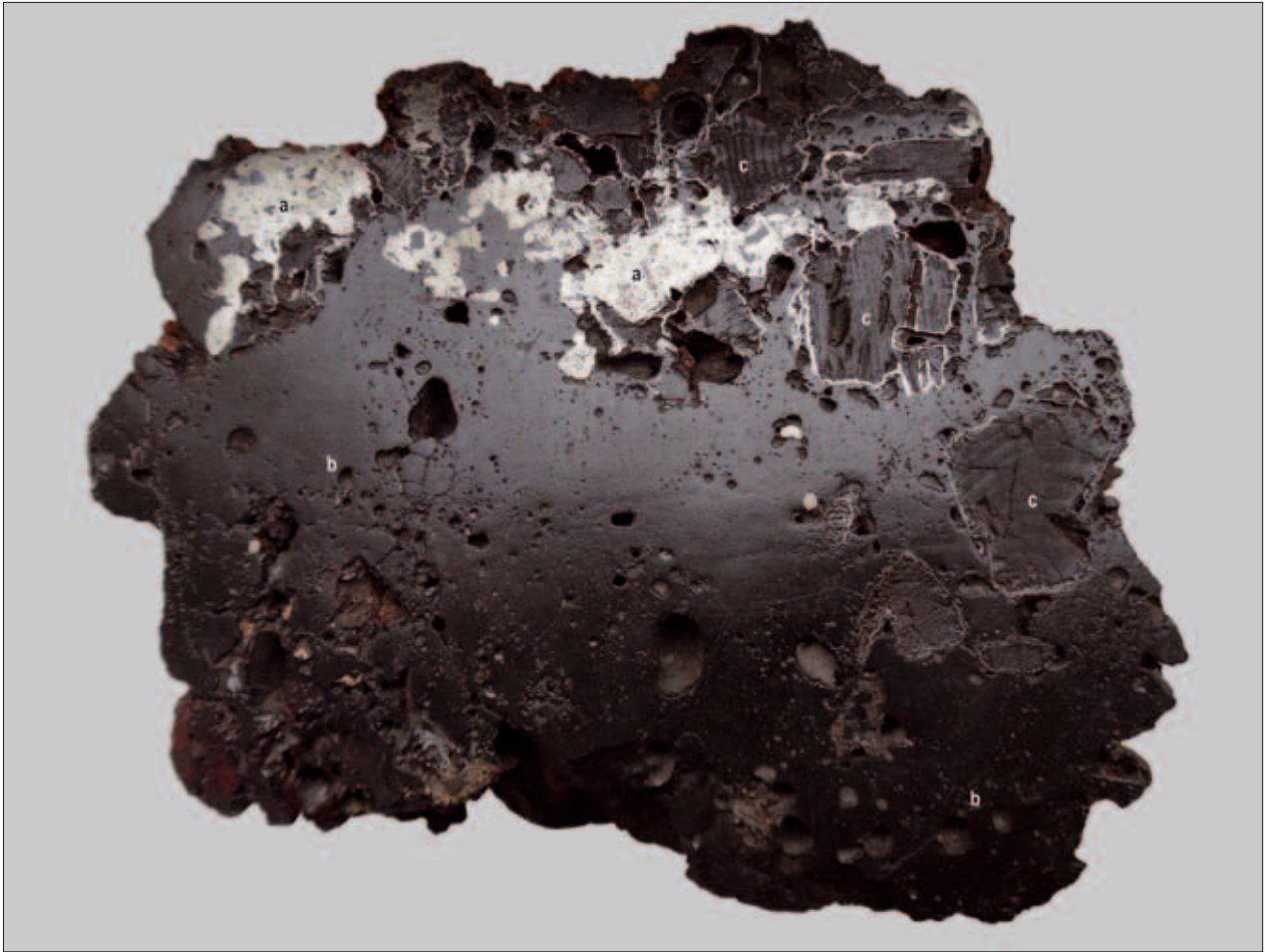
Relikty starożytnych pieców dymarskich – kłoc żuźlowe wypełniające podziemną kotlinkę – i bardzo rzadkie ślady odrywania czy wydłubywania łupki żelaznych z tych kłoców przemawiały za innym od średniowiecznego rozwiązaniem technologicznym, chociaż nie zaprzęcały wstępnemu kompaktowaniu, tj. scalaniu łupki po jej wyjęciu z pieca¹³. Łupka żelazna powinna być w czasie procesu dymarskiego odseparowana od żuźła, a sam żu-

wrzuca najpierw węgiel do dolka i wysypuje na niego rozkruszone i z niegaszonym wapnem zmieszane rudy żelaza, ile się zmieści na żelaznej łopatce. [...] W ten sposób wytopi rudę należycie, i może wyprodukować bryłę, ważącą dwa lub 3 cetnary, w zależności od bogactwa rudy. Teraz otwiera mistrz zastawkę dla żuźłu prętem, i gdy cały odpłynie, pozostawia masę żelazną do wystygnięcia, następnie ją z pomocnikami wylamuje łomami z trzonu, zrzuca na ziemię i bije w nią drewnianymi młotami z cienkimi rękojeściami o długości pięciu stóp. By otłuc żuźel do tej pory do niej przyczepiony, stłuc żelazo i wykuć. (G. Agricola 2000, s. 380).

¹¹ Określenie bryły żelaznej z XVII-wiecznego poematu *Officina Ferraria* Walentego Roździńskiego (1948).

¹² [piec] *Jest to trzon o głębokości trzech i pół stopy, szerokości i długości mniej więcej pięciu stóp, w jego środku jest wgłębienie o głębokości stopy, szerokości półtora stopy. [...] Mistrz przejmuje pewną ilość rudy żelaza, z której może wytopić żelaza dużo lub mało. Mając podjąć się tej pracy*

¹³ Wstępne kucie łupki zostało też opisane W. Roździńskiego (1948, s. 74), gdzie czynność tę nazwano *cyngowaniem*. Z podobnym działaniem wiąże znaleziska grąpi na piecowiskach starożytnych K. Bielenin (1992, s. 82–83).



Ryc. 3. Przekrój bryły żużlowo-żelazistej z eksperymentów koła naukowego „Officina Ferraria” z lat 80. XX wieku:
 a – żelazo; b – żużel; c – węgiel drzewny. Fot.: I. Suliga
 Fig. 3. Cross-section of a slag-iron block from experiments made by the “Officina Ferraria” science club, 1980s:
 a – iron; b – slag; c – charcoal. Photo: I. Suliga

żel powinien spłynąć do kotlinki. Przesłanki te albo były bagatelizowane, albo też niezauważane przez rekonstruktorów procesu dymarskiego. Przez długie lata zadowalano się aglomeratem żelazisto-żużlowym, lub też uznawano, że jest on wynikiem braku należytego doświadczenia eksperymentatorów (por. M. Karbowiczek, I. Suliga, W. Weker 2009, s. 49). Wskazywano również na możliwość stosowania w starożytności czynników ułatwiających upłynianie żużla, które mogły nie pozostawić po sobie czytelnych śladów w materiale archeologicznym.

Istnieje trudność w jednoznacznym ustaleniu, jakie parametry winna spełniać surowa, starożytna łupka żelazna. Odkrycie na stan. 1 w Pokrzywnicy, pow. starachowicki, żużli miseczkowych oraz związanych z nimi obiektów, które należy najpewniej interpretować jako paleniska służące obtapianiu i oczyszczaniu produktów uzyskanych w piecu dymarskim w celu ich uzdatnienia do dalszej przeróbki kowalskiej, mogłoby wskazywać, że finalne efekty pracy starożytnych hutników nie nadawały się do kucia zaraz po zakończeniu wytopu (Sz. Orzechowski

2013, s. 81–91, 151, 259). W trakcie prowadzonych przez siebie badań na piecowiskach świętokrzyskich K. Bielenin wyróżniał także szereg obiektów *pomocniczych*, do których zaliczał *piece wygrzewcze i przekuwalnie żelaza łupkowego* (K. Bielenin 1992, s. 129, 132–133). Wymienione struktury mogą wskazywać na zróżnicowanie czystości produktów wyjmowanych z pieców dymarskich po zakończeniu procesu. Niemniej jednak nie są one dowodem na obtapianie przez antycznych hutników aglomeratu żużlowo-żelazistego. Przeczą temu świadectwa samego procesu dymarskiego – kłocę żużlowe.

Przełom w sposobie myślenia o efektach procesu dymarskiego stanowiła koncepcja *powierzchni swobodnego krzepnięcia* (PSK) kłoców żużlowych sformułowana przez K. Bielenina. Jej podstaw należy szukać w przemysłeniach M. Radwana¹⁴ (1963, s. 56) oraz rezultatach prac

¹⁴ [...] Gdy górna powierzchnia kłoca pozostała nie naruszona, stanowiła powierzchnię zasadniczo równą, ale nie gładką, bez gwałtownych wprawdzie załamań, ale z widocznymi wzdęciami od pęcherzy gazowych,

wykopaliskowych prowadzonych na Mazowszu przez Stefana Woydę, który od samego początku zwracał szczególną uwagę na dokumentowanie powierzchni kłoców, będących według niego zapisem nieznanymi jeszcze procesów technologicznych (D. Słowińska 2014, s. 94).

Dla archeologów kloc żuźlowy jest postawowym źródłem do poznania technologii dymarskiej. Interesowano się układem kłoców w piecowisku, ich rozmiarami, ciężarem, składem chemicznym, ogólną formą oraz kanałami kotlinkowymi. Powierzchnia kłoców nie była natomiast przedmiotem bardziej szczegółowych badań tak archeologicznych, jak i metalurgicznych. Dopiero w 1978 roku K. Bielenin zdefiniował powierzchnię jako rezultat swobodnego krzepnięcia kłoca w kotlinie pieca (K. Bielenin 1978). W kolejnych pracach określił jej związek z wysoką płynnością żuźła w kotlinie i konsekwentnie – z oddzieleniem żuźła od łupki żelaznej (K. Bielenin 1985, s. 187–193; 1999; 2002). Ustalił też, jakie winny być charakterystyczne cechy tego produktu (K. Bielenin 2005, s. 189). Zgodnie z jego teorią, uzyskiwane dotychczas w trakcie eksperymentów bryły aglomeratów żelazisto-żuźlowych nie mogły być właściwym produktem procesu dymarskiego.

Weryfikacja założeń K. Bielenina wymagała przede wszystkim sprawdzenia, czy kloc rzeczywiście krzepnie zgodnie z zasadami krystalizacji dla hipotetycznego układu – dużej ilości przegrzanego stopu wieloskładnikowego w zimnej wlewnicy (I. Suliga 2006, s. 268; K. Bielenin, I. Suliga 2008, s. 68–72). Konieczne było w tym celu wykonanie przekrojów kłoców, zbadanie segregacji składników i faz oraz obserwacje makro- i mikrostruktury na przekroju kłoca.

Badania potwierdziły słusność ustaleń autora koncepcji PSK (K. Bielenin, I. Suliga 2008, s. 53) oraz dostarczyły nowych informacji na temat powstawania żelaza metalicznego w kłocach żuźlowych. Okazało się, że płynny żużel ściekał do kotlinki, gdzie ulegał swobodnej krystalizacji, a znajdujący się w nim fajalit – wtórnej redukcji w kontakcie z tlenkiem węgla lub węglem drzewnym (I. Suliga, T. Kargul 2007, s. 615). Proces ten rzucił nowe światło na zjawiska zachodzące w części szybowej pieca (I. Suliga, T. Karwan 2014, s. 155). Żużel uformowany w piecu dymarskim był tworzywem wiążącym skałę płonną użytej w procesie rudy, a w określonych warunkach stawał się tworzywem żelazodajnym, odpowiedzialnym także za formowanie łupki żelaznej.

Poprawność tej koncepcji PSK stała się podstawą do opracowania nowego schematu pieca dymarskiego i technologii wytwarzania w nim żelaza (Ryc. 4:C). Wcześniejsze schematy były dużo prostsze. M. Radwan (1963,

s. 83) wyróżniał trzy strefy – szybu, poziomu dysz i kotlinki (Ryc. 4:A). Redukcja rudy do żelaza metalicznego zachodziła w szybie. Na poziomie dysz następowało zaś ożużlenie skały płonnej, a w kotlinie, poprzedzony formami soplawatymi, ze ściekającego z szybu płynnego żuźła powstawał kloc żuźlowy. Trudne do jednoznacznej interpretacji było stwierdzenie, iż w żuźlu tworzy się *gąbka żelazna*¹⁵, nie podano również jej związku z grąpiami, formującymi się – według M. Radwana – w szybie pieca. Żużel w strefie dysz odpowiedzialny był, zdaniem tego autora, za odwęglenie zredukowanego wcześniej i nawęglonego żelaza. Bardziej złożony schemat pieca dymarskiego zaprezentował K. Bielenin (1992, s. 62, ryc. 28; 2006, s. 26, ryc. 10). Pojawiła się w nim łupka żelazna i powierzchnia swobodnego krzepnięcia żuźła (Ryc. 4:B). W nowym schemacie pieca (Ryc. 4:C) podniesiono nieco poziom otworów dmuchowych i zapewniono odpowiednią przestrzeń dla paliwa umożliwiającego upłynnienie żuźła na poziomie otworów dmuchowych. Rozważano wypełnienie kotlinki przed procesem kawałkami drewna lub ewentualną obecność rusztu w górnej części kotlinki, co miało utrzymać łupkę żelazną na odpowiednim poziomie. Ze schematem korespondował zasugerowany w roku 2006 przebieg procesu dymarskiego, mającego odbywać się w dwóch etapach – redukcji rud i ożużlenia skały płonnej a następnie upłynniania i spływu żuźła do kotlinki (I. Suliga 2006, s. 173).

Eksperymentalna weryfikacja koncepcji PSK

Metodę, która pozwoliła na uzyskanie separacji łupki żelaznej od kłoca żuźlowego w piecu kotlinkowym, a zatem najprawdopodobniej odzwierciedlającą efekty starożytnego procesu dymarskiego, opracował stosunkowo niedawno Adrian Wrona (2013; por. A. Przychodni, A. Wrona 2014). Jego studia nad procesem dymarskim były elementem projektu realizowanego w latach 2010–2014 w ramach badań własnych, finansowanych przez Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach. Działania te były kontynuowane przez wspomniany wcześniej zespół¹⁶, w czasie eksperymentów prowadzonych w Mójczy, pow. kielecki, oraz w ramach seminariów dymarskich¹⁷. Opierając się na po-

¹⁵ [...] W strefie III tworzy się ostatecznie żużel dzięki temu, że dotarł do tej strefy, w której panuje już temperatura powyżej 1200°C, dotarł tlenek żelaza FeO i spowodował upłynnienie skały płonnej. W tej strefie tworzyła się ostatecznie gąbka żelazna przepojona żużlem (M. Radwan a n 1963, s. 66).

¹⁶ Por. przyp. 7.

¹⁷ Seminaria te miały miejsce na terenie Muzeum Przyrody i Techniki w Starachowicach w październiku 2013 i maju 2014 roku. Były działaniem Świętokrzyskiego Stowarzyszenia Dziedzictwa Przemysłowego dofinansowanym przez Urząd Marszałkowski Województwa Świętokrzyskiego w ramach wspierania zadań dotyczących organizowania lub uczestnictwa w konferencjach, seminariach, sympoziach naukowych, warsztatach oraz innych imprezach z zakresu edukacji i nauki, służących rozwojowi, upowszechnianiu i promocji edukacji i nauki wśród dzieci,

świadczących o tym, że w chwili zakończenia procesu żużel był płynny. Czasem wśród tych pęcherzy znalazł się intruz w postaci kawałka wprawy, lessu, czy też niekiedy – co jest bardzo ważne – rudy.

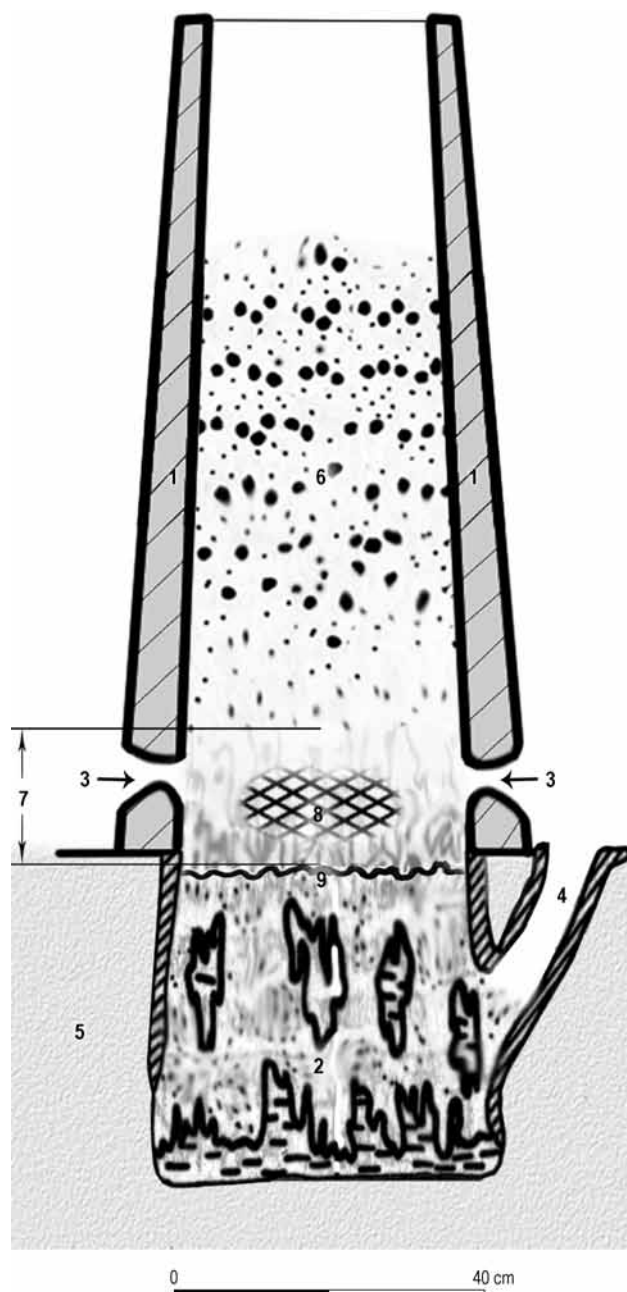
drożny aż do zakończenia procesu dymarskiego. Wskazuje na to wypalenie ścianek pustego kanału i występowanie żużla zwisającego w postaci sopli „spływających” z litej partii kłoca – bezpośrednio nad wylotem kanału do kotlinki (por. Ryc. 5:a). Różnorodność obiektów, w których zachowały się kanały kotlinkowe, skłaniała badaczy do przedstawiania różnych poglądów na ich funkcję w trakcie trwania procesu dymarskiego (por. Sz. Orzechowski 2013, s. 114–117). Wyraża się też przekonanie, że kanał kotlinkowy wiąże się raczej z wczesnym etapem działalności produkcyjnej na terenie Gór Świętokrzyskich, oraz że piece wyposażone w kanały kotlinkowe mogą reprezentować względnie niższy poziom wiedzy technicznej i umiejętności starożytnych hutników (Sz. Orzechowski 2011, s. 52).

Wybór pieca z kanałem kotlinkowym (K. Bielenin 1992, s. 72–73, 77, 79, ryc. 34, 38:B–D, 39:B, tab. 6) wynikał z konkluzji, że dla powodzenia działań ekspery-



Ryc. 5. Przekroje kotlinek: a – odkrytej w 1995 roku na piecowisku nr 2 w P o k r z y w n i c y, stan. 1; b – pieca eksploatowanego doświadczalnie w październiku 2013 roku w M ó j c z y, pow. kielecki. Fot.: Sz. Orzechowski (a), A. Przychodni (b)

Fig. 5. Cross-section of slag-pits: a – discovered in 1995 in the bloomery field no. 2 at P o k r z y w n i c a, site 1; b – a furnace exploited experimentally in October 2013 at M ó j c z a, Kielce County. Photo: Sz. Orzechowski (a), A. Przychodni (b)



Ryc. 6. Schemat rekonstrukcji pieca typu kunowskiego, użytkowanej w czasie eksperymentów dymarskich prowadzonych metodą A. Wrony w latach 2013–2015: 1 – szyb (część nadziemna pieca); 2 – kotlinka (część podziemna wypełniona żużlem i niespalonym węglem drzewnym); 3 – otwory dmuchowe; 4 – kanał kotlinkowy; 5 – całec; 6 – wsad (ruda żelaza i węgiel drzewny); 7 – strefa powstawania płynnego żużla; 8 – łupka żelazna; 9 – powierzchnia swobodnego krzepnięcia w górnej części kłoca żużlowego.

Rys.: A. Przychodni

Fig. 6. Diagram of the modern replicas of type *Kunów* furnace used in the bloomery experiments made using the A. Wrona method, 2013–2015: 1 – the furnace shaft (above-ground);

2 – the slag-pit (below-ground, filled with slag and unburnt charcoal); 3 – tuyeres; 4 – slag-pit canal; 5 – avirgin soil; 6 – charge (iron ore and charcoal); 7 – zone of liquid slag formation; 8 – iron bloom; 9 – surface of free solidification in the upper part of the slag block. Drawing: A. Przychodni



Ryc. 7. Przeprażona lokalna ruda pozyskana z hałd byłego Zakładu Wielkopiecowego w Starachowicach, użyta do eksperymentu w czasie seminarium w 2013 roku. Fot.: M. Rakalska
 Fig. 7. Roasted local iron ore obtained from the spoil heaps of the former Blast Furnace Plant (Zakład Wielkopiecowy) in Starachowice, used in experiments made within the Bloomery Seminar, 2013. Photo: M. Rakalska

mentalnych niezbędne jest testowanie takiego obiektu hutniczego, który umożliwiłby obserwacje zjawisk zachodzących w samej kotłince, a zarazem większą kontrolę przebiegu procesu. Ze względu na czas, w którym możliwe było przeprowadzenie eksperymentu, oraz chęć ograniczenia ilości materiałów wsadowych, istotne były średnica i pojemność kotlinki pieca (Ryc. 6). Kanał kotlinkowy, dzięki zapewnieniu dostępu powietrza do kotlinki, pozwalał na wykorzystanie znajdującego się w niej zapasu węgla. Tym samym możliwa była realizacja założeń koncepcji PSK, obtopienie łupki żelaznej z żużla w określonym etapie procesu i oddzielenie łupki od kłosa żużlowego.

Wypełnienie kotlinki przed rozpoczęciem procesu stanowił węgiel drzewny, frakcji średniej i grubej. Takie

wypełnienie, sugerowane też w koncepcji PSK, znajduje potwierdzenie w źródłach archeologicznych z terenu Gór Świętokrzyskich. Dość powszechnie obserwowane są odciski węgla drzewnego w kłocach żużlowych, a także można stwierdzić obecność węgla, głównie w postaci pylastej, który zachował się w części wypełnisk kotlinek (por. A. Przychodni 2002, s. 57, ryc. 10, 11). Te ostatnie świadectwa można uznać za dowód zamknięcia dopływu powietrza do kotlinki zawierającej niespalony węgiel drzewny, które zostało spowodowane przez napływającą z góry żużel.

Eksperyment starachowicki oraz późniejsze prace doświadczalne prowadzone były przy wykorzystaniu dwóch rodzajów rudy żelaza. W wypadku procesu przeprowadzonego w październiku 2013 roku w Starachowicach zastosowano mieszkankę tych rud w proporcjach wagowych 1 do 1. 50% stanowiły lokalne rudy syderytowe²⁰, pozyskiwane ze składowiska na terenie byłego Zakładu Wielkopiecowego, gdzie realizowano wytop doświadczalny (Ryc. 7). Drugie 50% stanowił natomiast hematyt pochodzący z Bośni i Hercegowiny, przekazany przez firmę ArcelorMittal w postaci rudy kawałkowej, którą poddawano eksperymentalnemu przeprażeniu (Ryc. 8). Do opisywanego tu eksperymentu użyto łącznie 40,6 kg rudy i ok. 50 kg węgla drzewnego, a więc stosunek wagowy rudy do paliwa użytego w samym procesie wynosił 0,8 do 1.

Część szybowa pieca eksperymentalnego miała wysokość ok. 120 cm. Szyb wyposażony był w dwa lejkowato zwężające się ku wnętrzu pieca otwory dmuchowe o średnicy od ok. 6 cm do ok. 4 cm, usytuowane na wysokości ok. 10–12 cm od poziomu gruntu. Dmucha podawano z miechów o wydajności ok. 0,2–0,3 m³/min., przy czym zachowano odpowiedni dystans między wylotami dysz miechów a otworami dmuchowymi, uniemożliwiający zapalenie się końcówek dysz. Dystans ten pozwalał również na równoczesne funkcjonowanie dmuchu naturalnego, uwarunkowanego ciągiem kominowym w szybie pieca. Zachowanie odstępów końcówek dysz od otworów

²⁰ Za typowy dla tych rud można uznać skład chemiczny rudy żelaza pochodzącej ze złoża „Majówka”: 30,1% Fe, 17,46% SiO₂, 10,05% Al₂O₃, 0,65% CaO, 80% MgO, 1,18% Mn, 0,57% S i 0,08% P (wg S. Holewińskiego).

Składniki rudy / ore components	H ₂ O	Fe	Mn	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	C	Na ₂ O	K ₂ O	ZN
Udział procentowy / Percentage content (%)	12,20	54,69	1,64	0,24	0,56	0,63	0,11	0,012	0,89	0,03	0,07	0,01

Ryc. 8. Skład chemiczny rudy bośniackiej używanej do eksperymentalnych „wytopów” w latach 2012–2015. Wg: A. Wrona 2013
 Fig. 8. Chemical composition of Bosnian ore used in experimental ‘smelts’ of 2012–2015. After: A. Wrona 2013



Ryc. 9. Eksperyment dymarski w październiku 2013 roku w Starachowicach:
 a – sposób instalacji dyszy miecha workowatego; b – realizacja dmuchu sztucznego przy użyciu miecha workowatego.
 Fot.: M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)

Fig. 9. The bloomery experiment carried out in October 2013 in Starachowice: a – the method of installing the bag bellows nozzle;
 b – artificial blast achieved with the bag bellows. Photo: M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)



Ryc. 10. Seminarium w Starachowicach w 2013 roku: a – obserwacja przez otwarty kanał kotlinkowy stopnia upłynnienia żużla i wypalenia węgla drzewnego wypełniającego kotlinkę pieca; b – zastygły żużel częściowo wypełniający kanał kotlinkowy pieca po rozbiórce jego części szybowej. Fot.: M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)

Fig. 10. The Bloomery Seminar in Starachowice, 2013: a – observation via an open slag-pit of the degree of liquefaction of the slag and the combustion of the charcoal filling the furnace slag-pit canal; b – solidified slag partly filling the furnace slag-pit after dismantling the furnace shaft. Photo: M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)

dmuchowych umożliwiło też ciągłą kontrolę przebiegu procesu na poziomie dmuchu (Ryc. 9).

Proces prowadzono przez ok. 6 godzin, w dwóch etapach, po wcześniejszym, trwającym kilka godzin suszeniu i wygrzewaniu pieca z użyciem drewna, a następnie węgla drzewnego. W pierwszym etapie, realizowanym przy zamkniętym kanale kotlinkowym, zasypywano szyb pieca na przemian „nabojami” rudy (waga – 4 kg, frakcja drobno- i średnioziarnista – do 15 mm) i węgla drzewnego (waga 4–5 kg, frakcja gruba i średnia). W wyniku procesów zachodzących w szybie pieca etap ten kończył się ukształtowaniem w szybie łupki żelaznej, zanurzonej w płynnym żużlu (Ryc. 10).

W drugim etapie, przy otwartym kanale kotlinkowym, następowało „obtopienie” łupki z żużla – tzn. obsączenie jego nadmiaru gromadzącego się wokół łupki, a następnie spływ żużla do kotlinki. Oba etapy powtarzały się kilkukrotnie podczas procesu, skutkując odprowadzeniem kolejnych porcji żużla i zwiększeniem masy łupki żelaznej. Przy otwartym kanale kotlinkowym obserwowano, iż w miarę zwiększenia masy żużla spuszczanego do kotlinki następowało jego coraz lepsze upłynnienie, spowodowane wymieszaniem partii żużla o różnej temperaturze – przegrzanego i częściowo ostudzonego. Żużel napływający do kotlinki upłynniał żużel już się w niej znajdujący. Doprowadzenie powietrza do kotlinki za pośrednictwem kanału umożliwiło spalenie węgla drzewnego pod formującym się kłosem. Spływ żużla do kotlinki był możliwy pod warunkiem zachowania drożności połączenia kotlinki z szybem oraz utrzymania kontaktu powietrza z kotlinką poprzez kanał. Zalanie kanału kotlinkowego przez żużel powodowało konieczność zakończenia procesu. Zauważono, że wspomniane zwiększenie masy żużla o znacznym potencjale cieplnym powodowało jego utrzymanie w stanie ciekłym, umożliwiające finalne ukształtowanie kłosa. Następnie – po spuszczeniu ostatniej partii żużla do kotlinki, rozbiórce szybu pieca i wydobytcu łupki żelaznej – kłos żużlowy podlegał kryształizacji jako jednorodna masa (Ryc. 11).

Otrzymana łupka żelazna o ciężarze 3,65 kg stanowiła niecałe 10% wagowego udziału wsadu rudnego, co wskazuje na słuszność teoretycznych założeń efektywności procesu dymarskiego znanych z literatury przedmiotu (por. M. Radwan 1963; K. Bielenin 1992; 2006). Rozbiórka pieca odbywająca się zaraz po przerwaniu podawania dmuchu i po zejściu ostatniej partii materiałów wsadowych do poziomu otworów dmuchowych, pozwoliła na obserwację separacji łupki od kłosa żużlowego, którego górna powierzchnia pozostawała jeszcze wówczas w stanie półpłynnym. Zastosowano wstępne kucie łupki z użyciem drewnianego młota, które spowodowało odkruszenie stosunkowo licznych grąpi – słabiej zgrzanych z zasadniczą bryłą żelaza, i nadanie jej formy miseczkowatej.



Ryc. 11. Częściowo odpreparowany kłos żużlowy (a) i jego profil (b). Seminarium w Starachowicach w roku 2013.

Fot. M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)

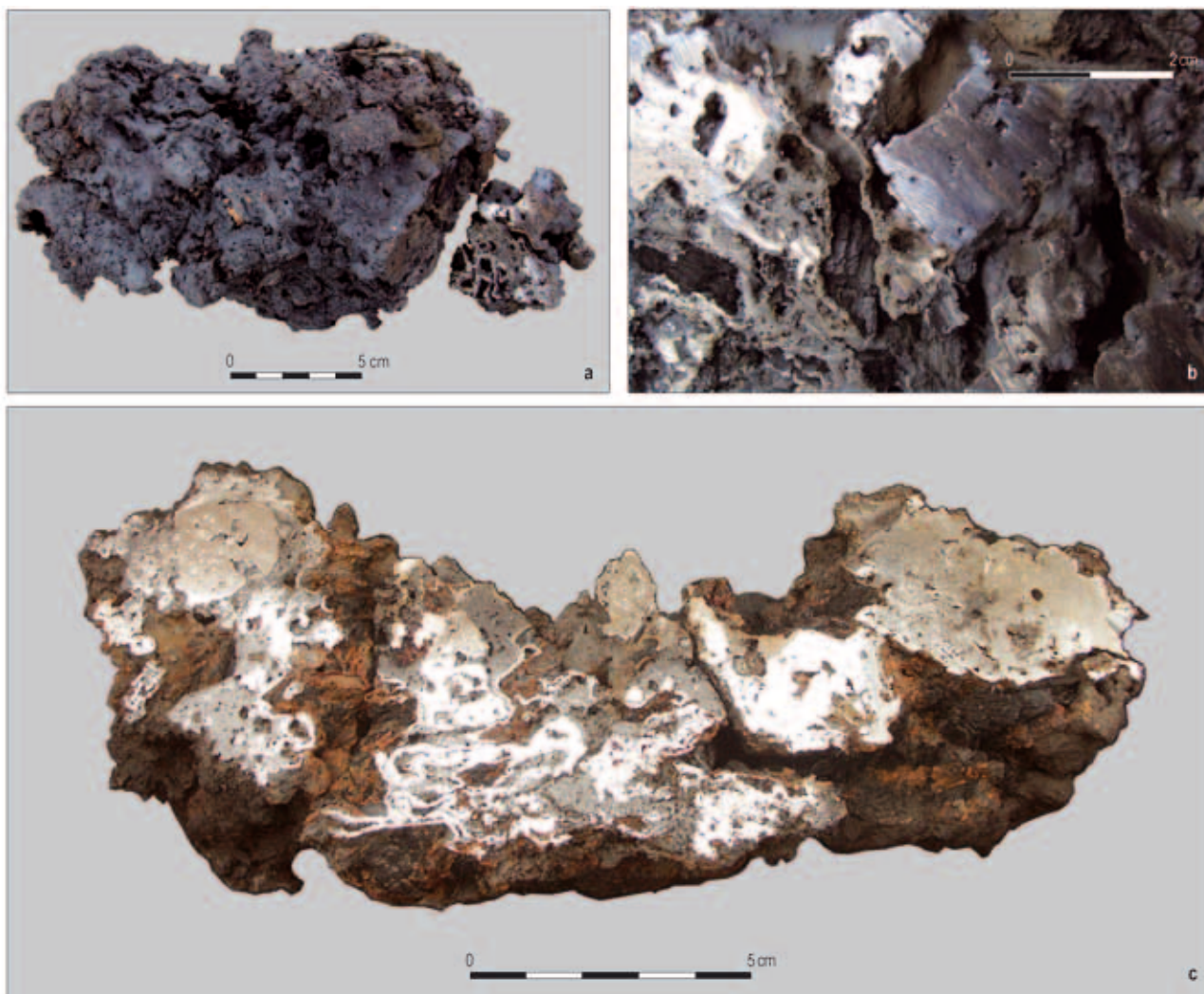
Fig. 11. Partly extracted block of slag (a) and its profile (b).

The seminar in Starachowice, 2013.

Photo M. Banasiewicz (a), M. Rakalska (b)

Makro- i mikrostruktura łupki z „wytopu” doświadczalnego w Starachowicach

Uzyskana podczas eksperymentu łupka składała się z pięciu zgrzanych ze sobą brył żelaznych (Ryc. 12:c). Miały one powierzchnie silnie rozwinięte, pokryte grubą warstwą zgorzeliny. Wgłębienia na powierzchniach, a także nieciągłości widoczne w przekroju, pozbawione były makroskopowo żużla. Charakterystyczną cechą makrostruktury przekroju była strefowość strukturalna. W górnej części materiał był zwarty – lity. Drugą strefę stanowiła tzw. struktura filigranowa – w postaci charakterystycznych skupisk ziaren żelaza w fajalicie, lokalnie z dużymi obszarami litego żelaza. W trzeciej strefie widoczne były siatki złożone z ziaren żelaza powstałych wokół pęcherzy i kawałków węgla drzewnego. Strefa filigranowa i strefa siatek dominowały w środkowej i dolnej części przekroju.



Ryc. 12. Łupka żelazna uzyskana w trakcie seminarium w Starachowicach w 2013 roku: a – widok ogólny z góry; b – zbliżenie makrostruktury fragmentu łupki; c – przekrój podłużny. Fot.: A. Wrona (a, b), I. Suliga (c)
 Fig. 12. Iron bloom obtained during the seminar in Starachowice, 2013: a – general view from above; b – close up of the microstructure of the iron bloom; c – longitudinal section. Photo: A. Wrona (a, b), I. Suliga (c)

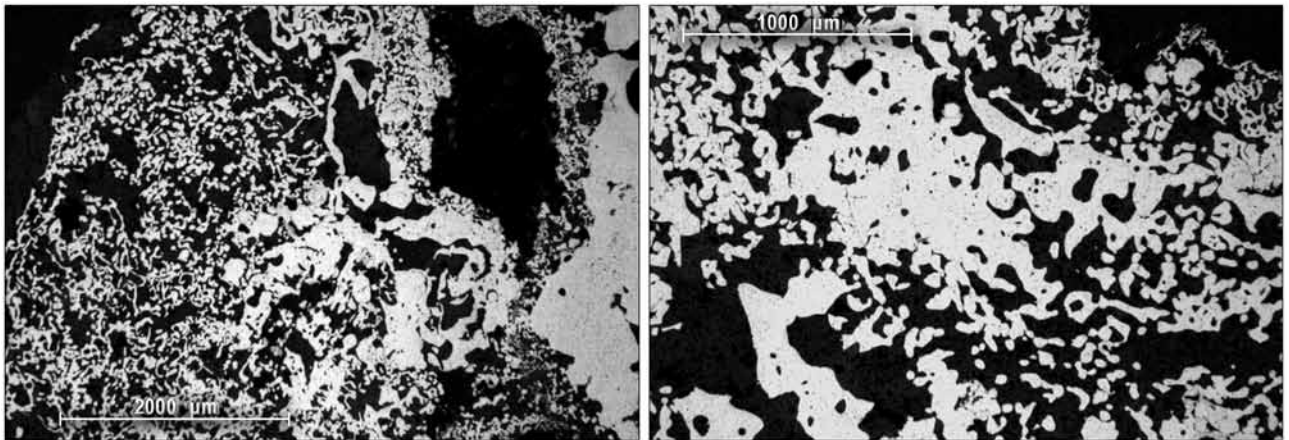
W strefie struktury filigranowej widoczne są rozproszone ziarna żelaza ferrytycznego, tworzące lokalnie skupiska, przechodzące w obszary o strukturze zwartej (Ryc. 13). Strefa filigranowa jest mieszaniną ferrytu i fajalitu. W strefie zwartej udział fazy żuźlowej jest niewielki (Ryc. 14). Zażużlenia występują na granicach ziaren ferrytu. Lokalnie obserwuje się pozostałości struktury filigranowej. Widoczne są również wtrącenia niemetaliczne w postaci tlenków punktowych. Strefę siatek stanowią wydzielenia żelaza wokół pęcherzy gazowych i węgla drzewnego, w formie linii i pasm (Ryc. 15).

Obserwacje mikrostruktury sugerują, że faza żelaza metalicznego powstaje częściowo z fazy żuźlowej. Taką możliwość dyskutowano już wcześniej w literaturze²¹.

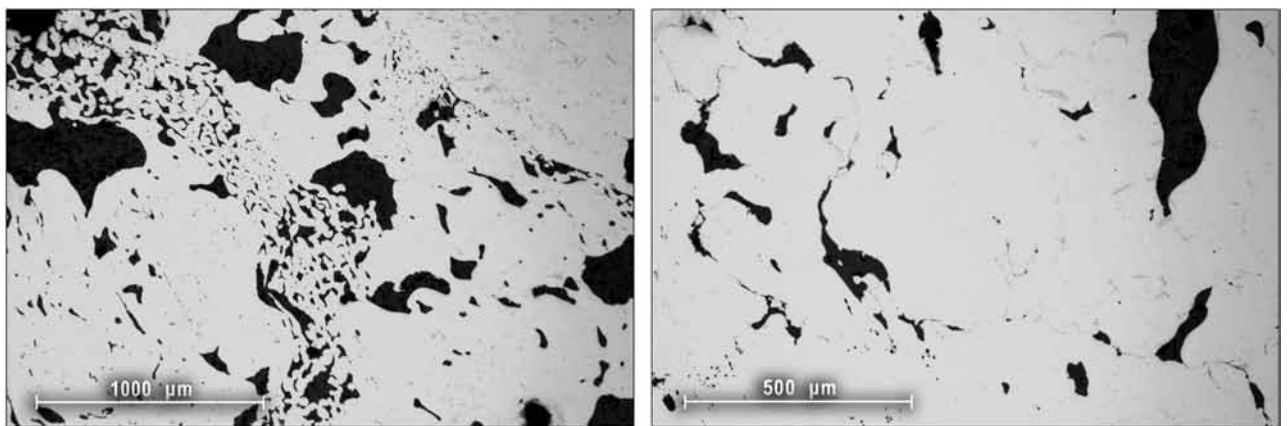
²¹ Czy po uformowaniu w III strefie pieca dymarskiego (żuźel) mógł być źródłem uzysku żelaza? Czy zjawiska zachodzące w żuźlu mogły popra-

Wyniki doświadczenia wskazują na to, że obok redukcji bezpośredniej, kształtowanie łupki żelaznej jest też skutkiem redukcji wtórnej. Przebieg tego procesu można opisać w sposób następujący. Rozproszone w fajalicie ziarna ferrytu, powstałe w wyniku redukcji wtórnej, formują większe obszary lite, które rosną kosztem fazy żuźlowej. Formowanie obszarów litych możliwe jest w wyniku zjawiska koagulacji ziaren, statystycznie zbliżonych do

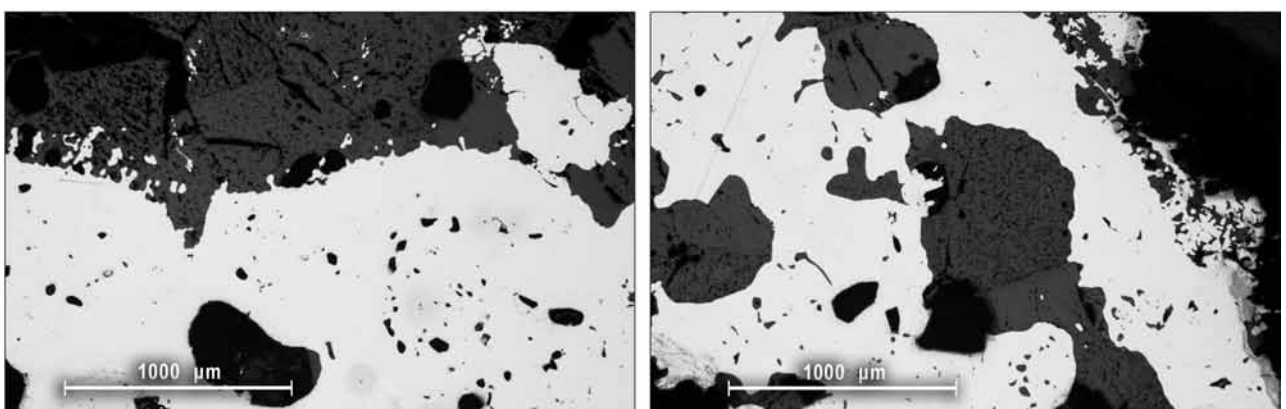
wić bilans materiałowy pieca dymarskiego? – Wyniki symulacji numerycznych układu starożytny żuźel dymarski–węgiel drzewny oraz wyniki badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych [...] pozwalają pozytywnie odpowiedzieć na postawione wyżej pytania. W warunkach szybu pieca dymarskiego mogła zachodzić wtórna redukcja żuźła. [...] Uformowanie łupki żelaza w piecu dymarskim typu kotlinkowego jest wynikiem redukcji bezpośredniej rudy (redukcji pierwotnej) oraz zjawisk zachodzących w utworzonym żuźlu fajalitowym: redukcji wtórnej i reakcji dysproporcjonacji. (I. Suliga, T. Karwan 2014, s. 163, 170).



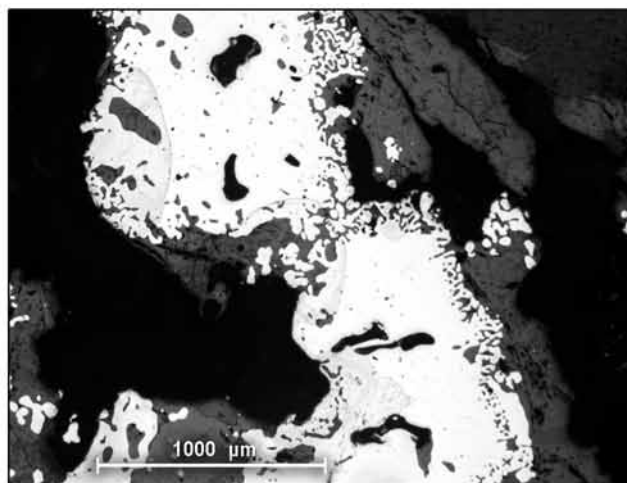
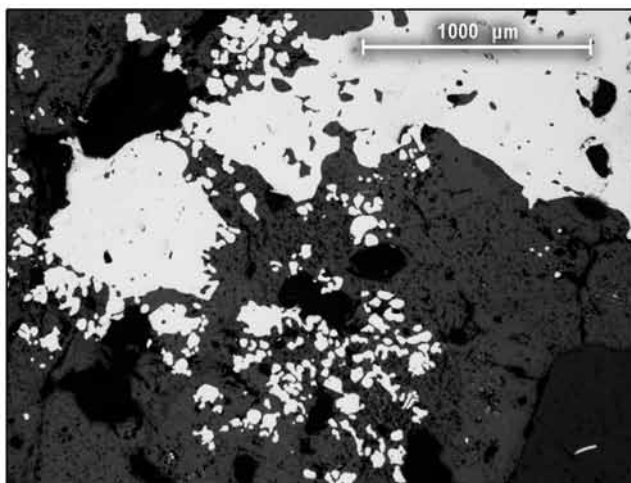
Ryc. 13. Mikrostruktura strefy filigranowej łupki żelaznej wytworzonej w październiku 2013 roku. Mieszanka ziaren ferrytu i fajalitu. Skupiska ferrytu. Zgląd nietrawiony. Fot.: I. Suliga
 Fig. 13. Microstructure of the filigree zone in the iron bloom obtained in October 2013. Mixture of ferritic and fayalitic grains. Concentration of ferrite. Unetched microsection. Photo: I. Suliga



Ryc. 14. Mikrostruktura strefy litej łupki żelaznej pochodzącej z eksperymentu w 2013 roku w Starachowicach. Stopniowe zanikanie mieszaniny żelaza i fajalitu. Zgląd nietrawiony. Fot.: I. Suliga
 Fig. 14. Microstructure of the solid zone in the iron bloom obtained during the 2013 experiment in Starachowice. Gradual disappearance of the ferrite-fayalite mixture. Unetched microsection. Photo: I. Suliga

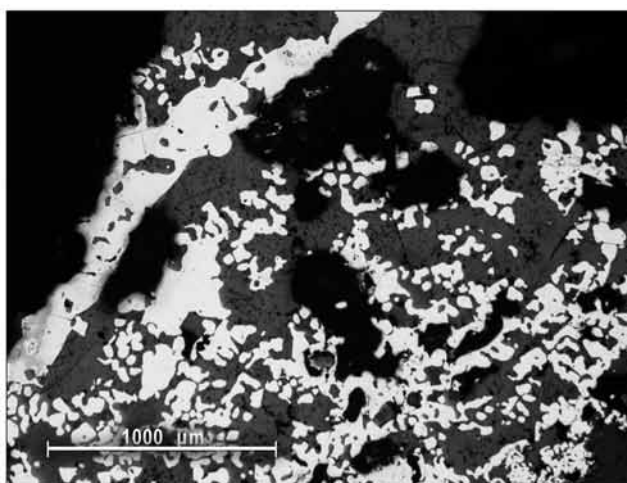
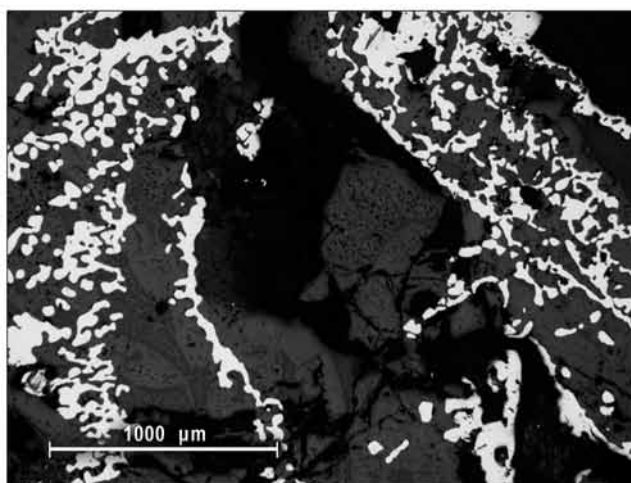


Ryc. 15. Mikrostruktura powierzchni rozdziału żelazo (duże obszary) – fajalit (mniejsze obszary) w obrębie łupki żelaznej wytworzonej eksperymentalnie w Starachowicach w 2013 roku. Zjawiska na granicy między żużłem a żelazem. Ziarna, charakterystyczne „mosty” i zamykanie obszarów żużlowych. Zgląd nietrawiony. Fot.: I. Suliga
 Fig. 15. Microstructure of the surface of the divide between iron (large areas) and fayalite (smaller areas) within the iron bloom obtained experimentally in Starachowice in 2013. Phenomena on the boundary between slag and iron. Grains, characteristic 'bridges' and the closing of the slag areas. Unetched microsection. Photo: I. Suliga



Ryc. 16. Obszary żelaza w strukturze filigranowej w obrębie łupki żelaznej powstałej w czasie seminarium w Starachowicach w 2013 roku. Zjawiska na granicy między żużłem a żelazem – ziarna żelaza, charakterystyczne „mosty” i zamknięte zażużlenia. Zgląd nietrawiony.
Fot.: I. Suliga

Fig. 16. Areas of filligree iron within the iron bloom obtained during the seminar in Starachowice in 2013. Phenomena on the boundary between slag and iron – iron grains, characteristic 'bridges' and closed slag inclusions. Unetched microsection. Photo: I. Suliga



Ryc. 17. Mikrostruktura strefy siatek wydzieleni żelaza w obrębie łupki żelaznej wytworzonej w roku 2013 w Starachowicach. Zgląd nietrawiony. Fot.: I. Suliga

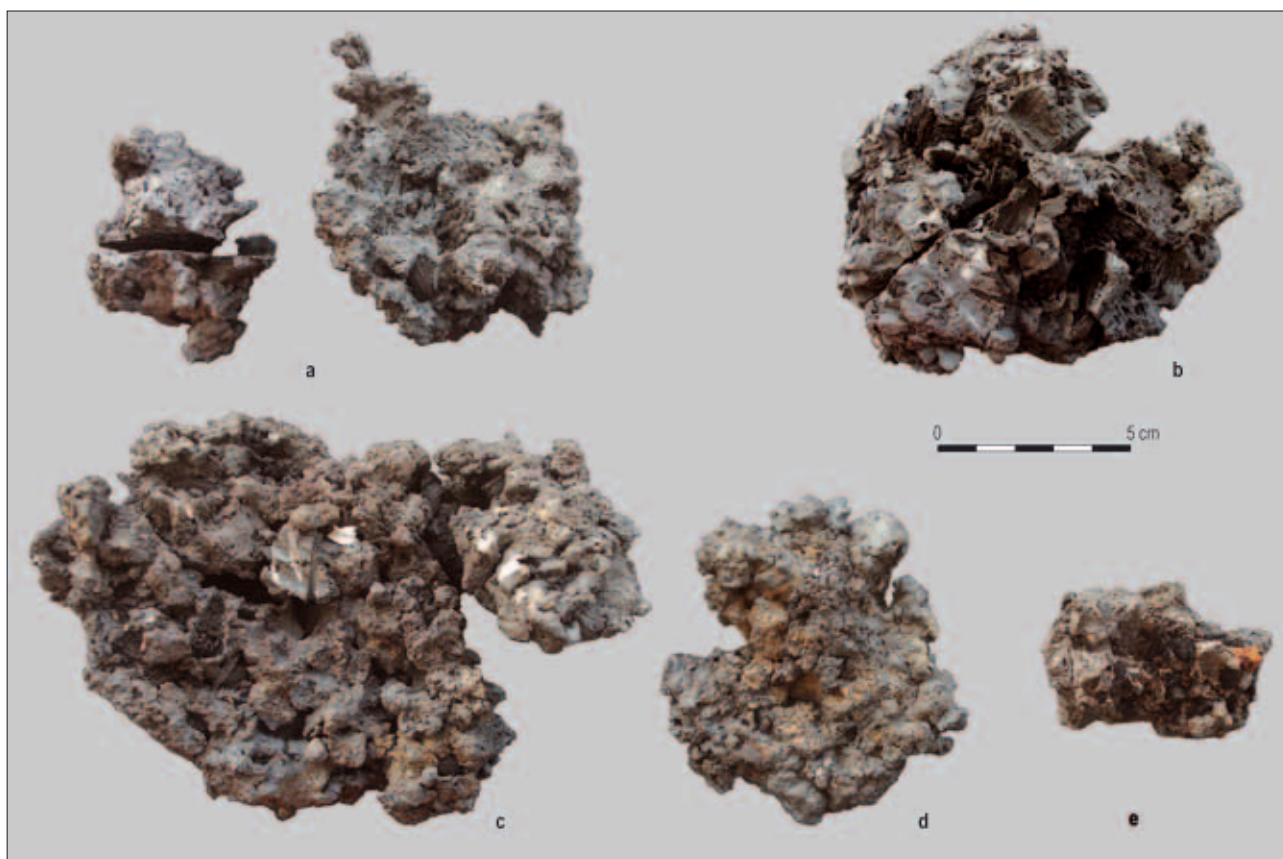
Fig. 17. Microstructure of the zone with groups within the iron bloom obtained in Starachowice in 2013. Unetched microsection.
Photo: I. Suliga

siebie w półpłynnej fazie żużlowej. W procesie koagulacji duże wydzielania rosną kosztem małych, a siłą pędną procesu jest obniżenie energii układu. Cechą charakterystyczną procesu koagulacji są tzw. mosty – przewężenia na styku ziaren ulegających koagulacji. Na ryc. 16 i 17 pokazano powierzchnię rozdziału obszarów metalicznych litych – dużych i małych oraz fazy żużlowej. W obu wypadkach ziarna ferrytu rozproszone w fazie żużlowej stykając się z fazą żelaza, łączą się z nią dyfuzyjnie w procesie koagulacji poprzez „most”.

Prezentowane tu efekty doświadczenia przeprowadzonego podczas seminarium dymarskiego w Starachowicach poprzedziły wyniki innych eksperymentów

A. Wrony²². Miały one miejsce w czasie „Dymarek Świętokrzyskich” w roku 2012 i 2013 oraz podczas wytopu w piecu typu *Lodénice* w roku 2013 w Starachowicach. Uzyskano wówczas niewielkie odżużlone łupki żelazne, o podobnej formie zewnętrznej (Ryc. 18).

²² Można wspomnieć, że celem studiów A. Wrony była pierwotnie próba rekonstrukcji metody redukcji bezpośredniej w piecu kotlinkowym nie inspirowana wyłącznie koncepcją PSK (por. A. Przychodni, A. Wrona 2014). Na zgodność z tą koncepcją położono natomiast szczególny nacisk w trakcie realizacji I seminarium dymarskiego w Starachowicach i w czasie późniejszych prac eksperymentalnych.



Ryc. 18. Łupki żelazne otrzymane metodą A. Wrony: a – „Dymarki Świętokrzyskie”, 2012 r.; b, c – „Dymarki Świętokrzyskie”, 2013 rok; d – Starachowice, maj 2013 roku; e – piec typu *Loděnice*, 2012 rok. Fot.: I. Suliga
 Fig. 18. Iron bloom obtained using the A. Wrona method: a – “Holy Cross Bloomeries”, 2012; b, c – “Holy Cross Bloomeries”, 2013; d – Starachowice, May 2013; e – type *Loděnice* furnace, 2012. Photo: I. Suliga

Wyniki makro- i mikroskopowych badań ich przekrojów (Ryc. 19, 20) były podobne do rezultatów analiz łupki otrzymanej w czasie seminarium dymarskiego w Starachowicach. W zależności od ich ciężaru – stopnia zaawansowania procesu formowania łupki – obserwowano siatki żelaza w osnowie fajalitowej (Ryc. 19:a), niewielkie obszary żelaza litego, obszary żelaza filigranowego (Ryc. 20:b.c) i uformowne żelazo lite (Ryc. 19:d.e). Widoczna była też analogia między makrostrukturą przekroju łupki (Ryc. 12:c) a makrostrukturą przekrojów łupek z wcześniejszych eksperymentów. Analiza mikrostruktury tych ostatnich ujawniła wzbogacenie żużla w fazę tlenkową w strefach filigranowych (Ryc. 20:a.b) oraz przesunięcie składu żużla w stronę wyższych zawartości FeO, co potwierdza prawdopodobieństwo zachodzenia reakcji dysproporcjonacji.

W łupkach uzyskano strukturę ferrytyczną (Ryc. 21:a.b), strukturę ferrytyczno-perlityczną w całej próbce (ok. 0,5% C; Ryc. 21:d) lub lokalnie (ok. 0,2% C) obok struktury ferrytycznej (Ryc. 21:c.e). Osobliwością próbki pobranej z łupki żelaznej wytworzonej w roku 2013 w Starachowicach była struktura widmowa, związana z segregacją fosforu (Ryc. 21:f).

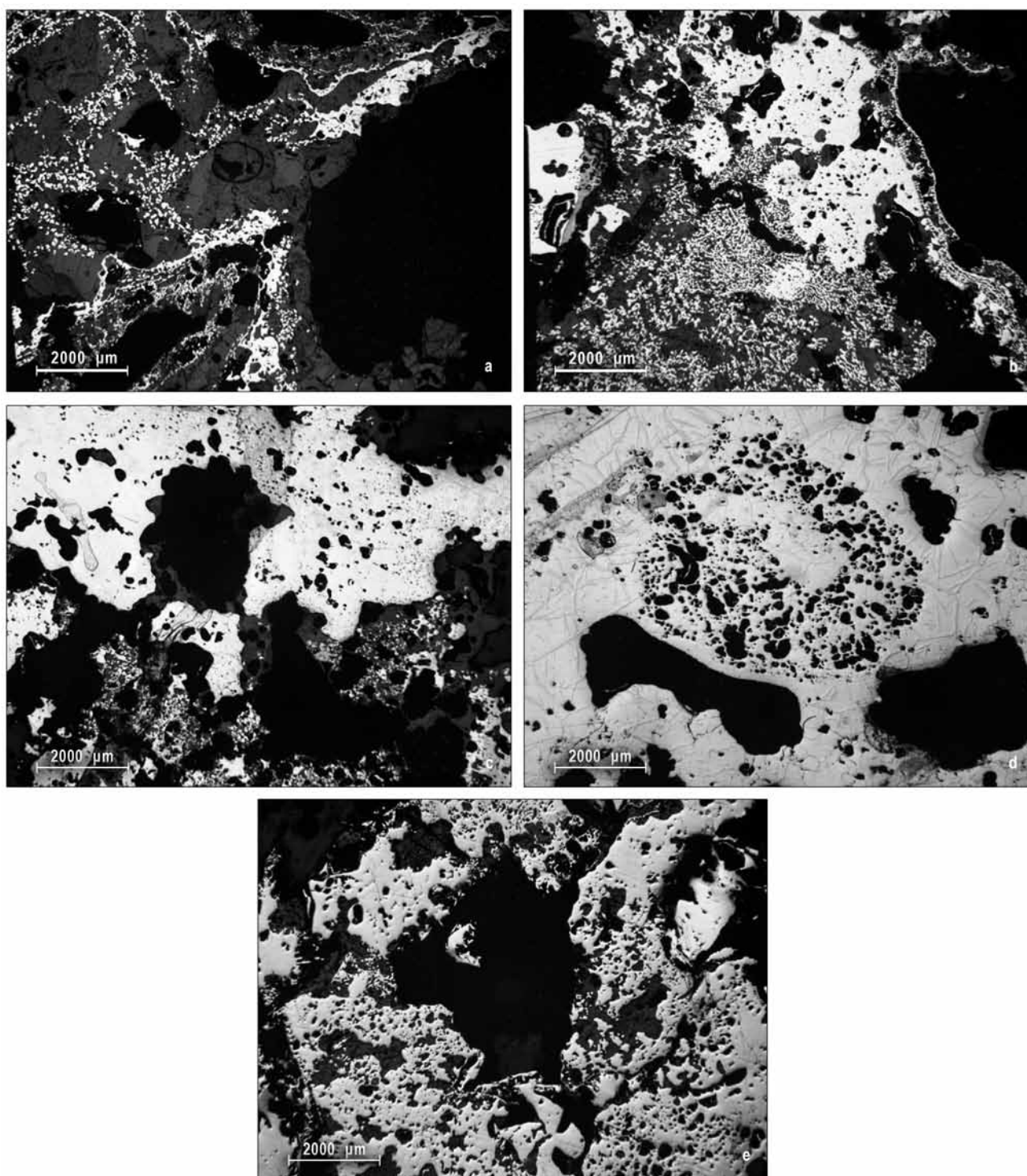
Mikrostruktura żużla z eksperymentu dymarskiego w Starachowicach

Żużel powstały w trakcie eksperymentu starachowickiego ma mikrostrukturę typową dla kłoców znanych z badań archeologicznych (por. ryc. 24). Jej osnowę stanowi jasnoszary fajalit (Fe_2SiO_4) z jasnymi dendrytami wistytu (FeO), lokalnie w formie eutektyk. W przestrzeniach międzykrystalicznych fajalitu widoczny jest ciemnoszary hercynit (FeAl_2O_4). Materiał jest lekko porowaty.

Odstępstwem od struktury starożytnych żużli świętokrzyskich jest obecność w badanym żużlu faz związanych z materiałem wsadowym użytym w eksperymencie, czyli rudą bośniacką zawierającą 0,07% K_2O (Ryc. 11). W konsekwencji pojawił się zidentyfikowany mikroanalizy leucyt $\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}$, mający postać czarnych dendrytów (Ryc. 23). Udział leucytu w strukturze nie miał wpływu na płynność otrzymanego żużla. Eutektyka potrójna z udziałem leucytu o temperaturze topnienia 985°C powstaje w stopach o zawartości powyżej 20% K_2O .

Podsumowanie i wnioski

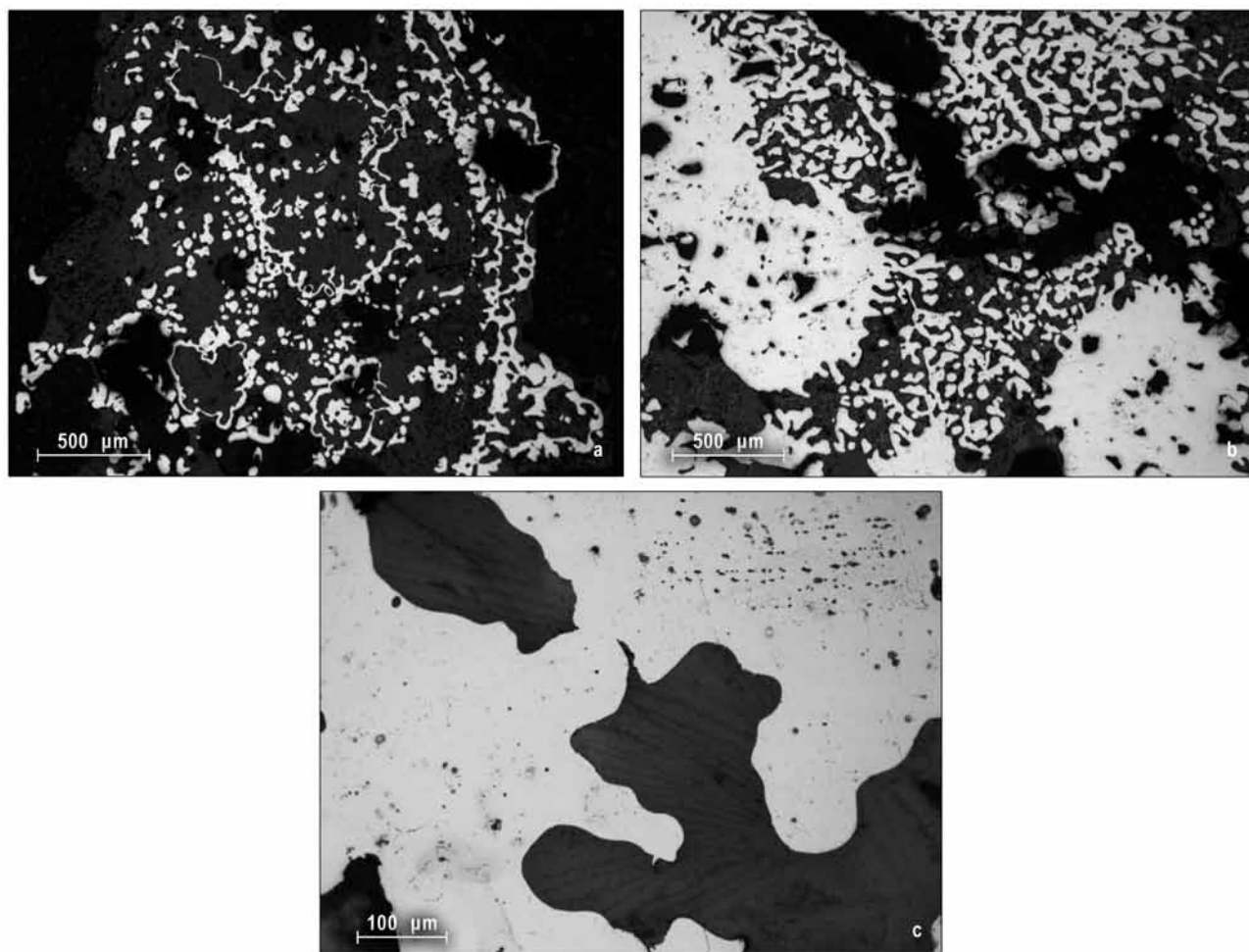
Podczas opisanego eksperymentalnego wytopu uzyskano niskowęglową łupkę żelazną, oczyszczoną z żużla pod



Ryc. 19. Makrostruktury przekrojów łupek z wcześniejszych „wytopów” doświadczalnych: a – siatki żelaza (próbka 5 z pieca typu *Loděnice*); b – obszary żelaza litego i żelaza filigranowego (próbka 4 z pieca z bocznym spustem żuźla); c – obszary żelaza litego i żelaza filigranowego (próbka 3 pozyskana w trakcie „Dymarek Świętokrzyskich” w 2013 roku), d – obszary żelaza litego (próbka 1 pozyskana w trakcie eksperymentu w Starachowicach w 2012 roku); e – obszary żelaza litego (próbka 2 pozyskana w trakcie eksperymentu w Starachowicach w maju 2013 roku). Fot.: I. Suliga

Fig. 19. Macrostructure of cross-sections of iron bloom from earlier experimental smelts: a – iron ‘grids’ (sample 5 from type *Loděnice* furnace); b – areas of solid iron and filligree iron (sample 4 from a furnace with a lateral slag tapping method); c – areas of solid and filligree iron (sample 3 obtained during the “Holy Cross Bloomeries” in 2013); d – areas of solid iron (sample 1 obtained from experiments in Starachowice in 2012); e – areas of solid iron (sample 2 obtained from experiments in Starachowice in May 2013).

Photo: I. Suliga



Ryc. 20. Mikrostruktury przekrojów łupek z wcześniejszych „wytopów” w stanie nietrawionym: a – próbka 5; b – próbka 4; c – próbka 3 (oznaczenie pochodzenia próbek – patrz podpis pod ryc. 19). Fot.: I. Suliga

Fig. 20. Microstructure of cross-sections of bloom (unetched) from earlier smelts: a – sample 5; b – sample 4; c – sample 3 (origin of samples – see caption for Fig. 19). Photo: I. Suliga

koniec procesu dymarskiego, oraz kloc żuźlowy o właściwościach charakterystycznych dla tego rodzaju struktur pochodzących z badań archeologicznych prowadzonych od połowy lat 50. XX wieku w Górach Świętokrzyskich. W ten sposób dokonano praktycznej weryfikacji głównych tez koncepcji PSK²³. W pierwszym etapie procesu prowadzono redukcję rudy i ożużlanie²⁴ skały płonnej, a w drugim upłynniono żużel i spuszczone go do kotlinki piecowej. Odsączono łupkę z żużla, nadając jej cechy półproduktu zdolnego do dalszej przeróbki plastycznej.

Zdaniem Sz. Orzechowskiego i A. Wrony (2015, s. 256) *otrzymana w procesie redukcji surowa łupka, bez wzglę-*

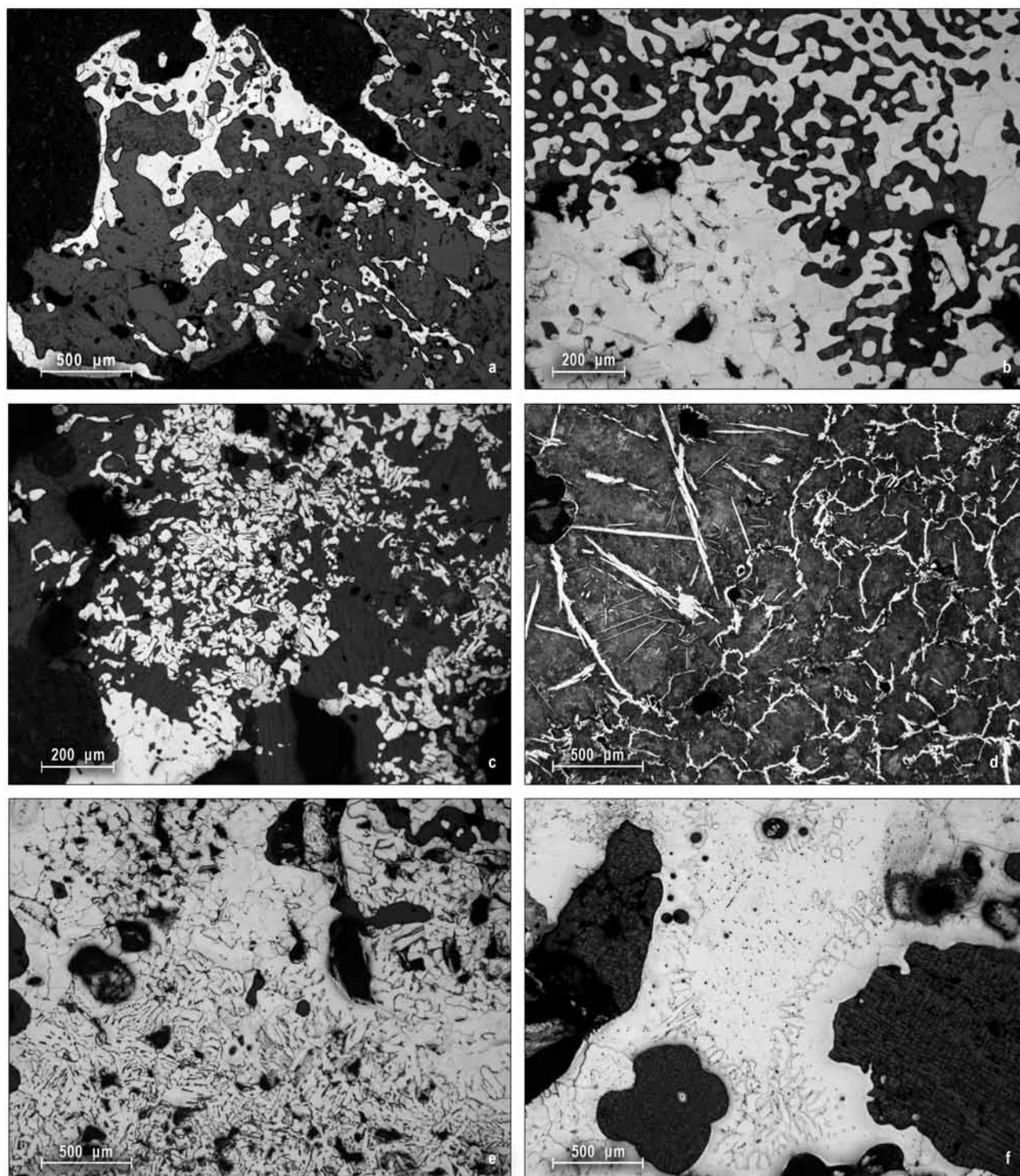
du na stopień jej czystości, musiała być poddana różnym zabiegom, których zadaniem było wyeliminowanie istniejących zanieczyszczeń, przekucie i zagęszczenie niejednorodnej bryły metalu oraz jej podzielenie na mniejsze fragmenty (por. W. Sławiński 2002, s. 178–179). Operacji tych nie należy traktować jako faz „postredukcyjnych” w sensie niezbędnego etapu wywarzania żelaza dymarskiego. Techniczna czystość uzyskanego eksperymentalnie żelaza zaprzecza stosowaniu w starożytności zabiegów „postredukcyjnych” rozumianych jako służące puryfikacji żelaza, analogicznych do opisywanych w cytowanym dziele G. Agricoli. Trudno bowiem porównywać stosowane w trakcie omawianych eksperymentów kompaktowanie łupki do wspomnianego wcześniej „cyngowania”, znanego z poematu Rożdzieńskiego, chociaż odbywa się ono z użyciem zbliżonych narzędzi. Technologicznie kompaktowanie łupki jest zatem zabiegiem „postredukcyjnym” służącym jej ukształtowaniu, scaleniu, nie zaś oczyszczeniu z żużla. Wynika to z różnic technologicznych

²³ [...] do kotlinki spłynął „czysty” żużel [...] łupka żelazna uzyskana w tym piecu nie stanowiła konglomeratu żelazo-żuźlowego, lecz była bryłą optymalnie czystego żelaza kowalnego (K. Bielenin 2005, s. 190).

²⁴ Ożużlanie – formowanie żużla w reakcjach między krzemionką a tlenkami żelaza. Płynność uformowanego żużla zależy od temperatury i czasu trwania procesu.

pomiędzy starożytnym piecem dymarskim a dymarką średniowieczną, w której nie można było uzyskać, poprzez wydarcie z „trzonu pieca”, bryły metalu w takim stopniu odseparowanego od żużla, jak w piecu kotlinkowym, który „trzonu” nie miał. Kolejne eksperymenty przeprowadzone w latach 2013–2015 wykazały też, że

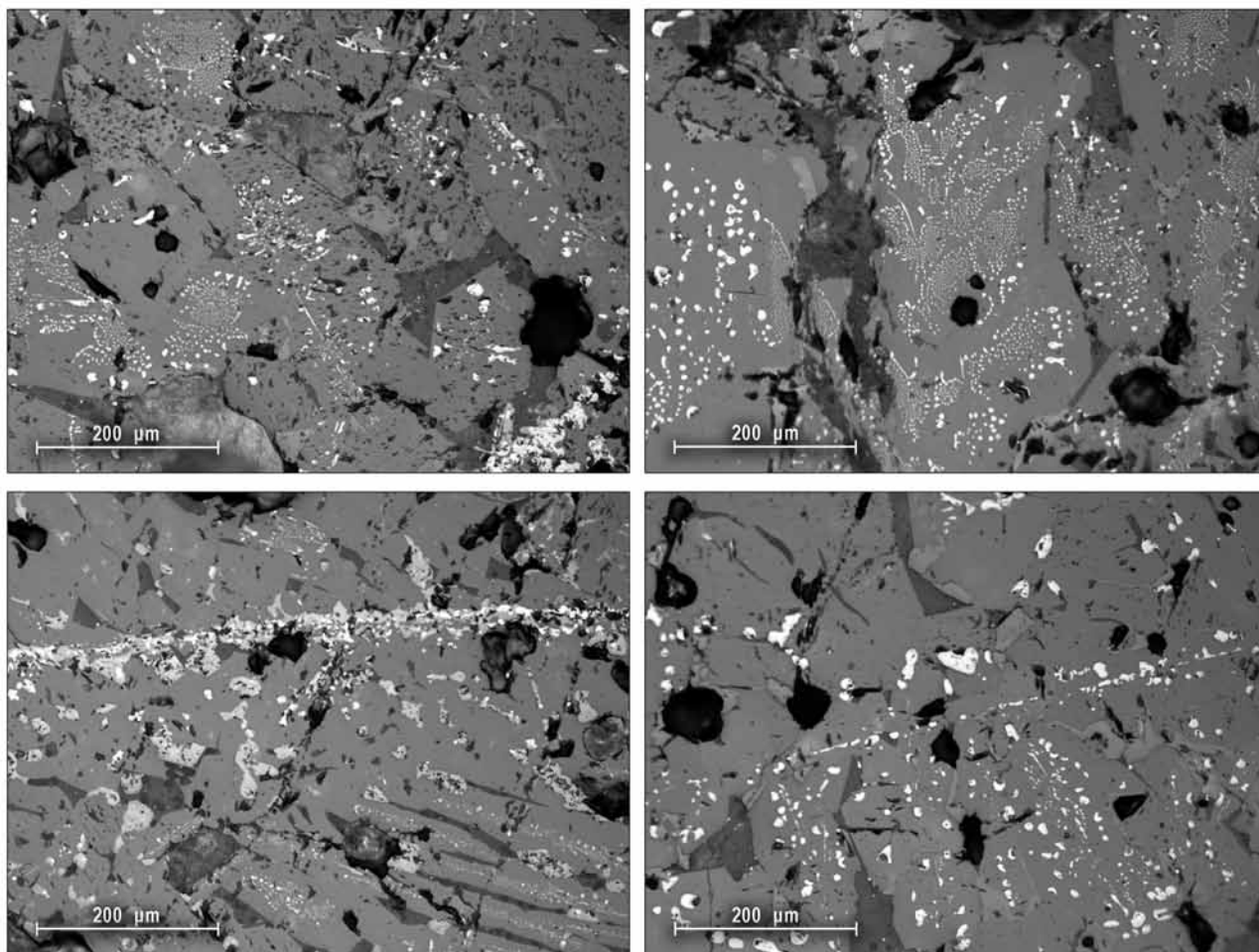
za każdym razem uzyskane w piecu dymarskim żelazo jest kowalne, a występujące w nim drobne zażuzlenia nie mają wpływu na jego właściwości techniczne (por. wyżej). Produktem ubocznym jego skuwania – np. do postaci kęsiska – są żużle miseczkowe o formie zbliżonej do wspomnianych wcześniej, pochodzących ze sta-



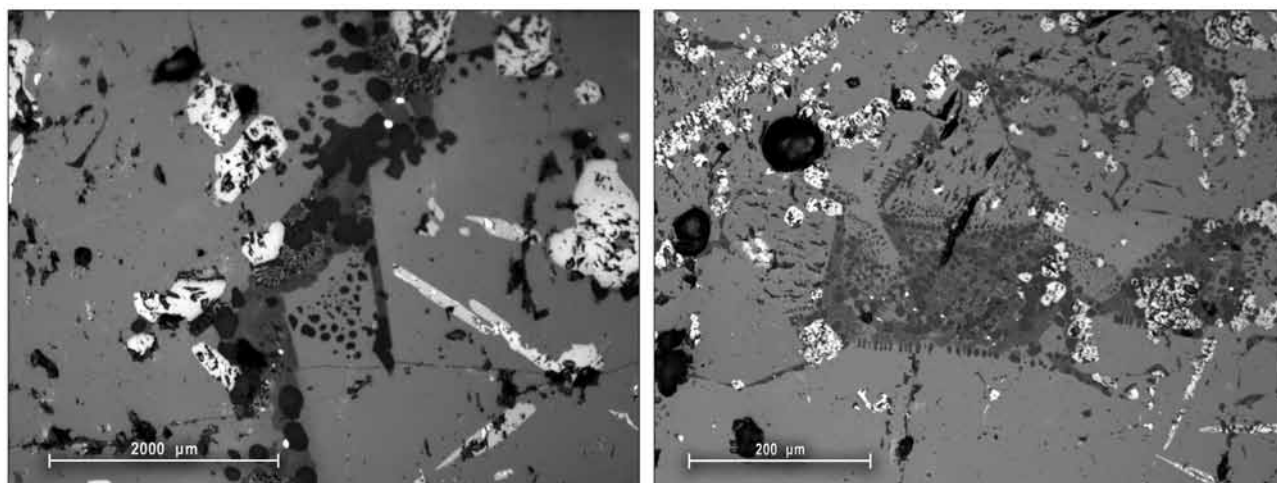
Ryc. 21. Mikrostruktury przekrojów łupek z wcześniejszych „wypotów” eksperymentalnych w stanie trawionym (3% nital): a – próbka 5; b – próbka 4; c – próbka 3; d – próbka 1; e, f – próbka 2 (oznaczenie pochodzenia próbek – patrz podpis pod ryc. 19).
 Fig. 21. Microstructure of cross-sections of bloom (etched with 3% nital) from earlier experimental smelts: a – sample 5; b – sample 4; c – sample 3; d – sample 1; e, f – sample 2 (origin of samples – see caption for Fig. 19). Photo: I. Suliga

nowiska w Pokrzywnicy. Przy analizie tych czynności „postredukcyjnych” należy też brać pod uwagę reakcje pomiędzy zendrą, popiołem, „wymurówką” paleniska i piaskiem, które miały niewątpliwie wpływ na powstawa-

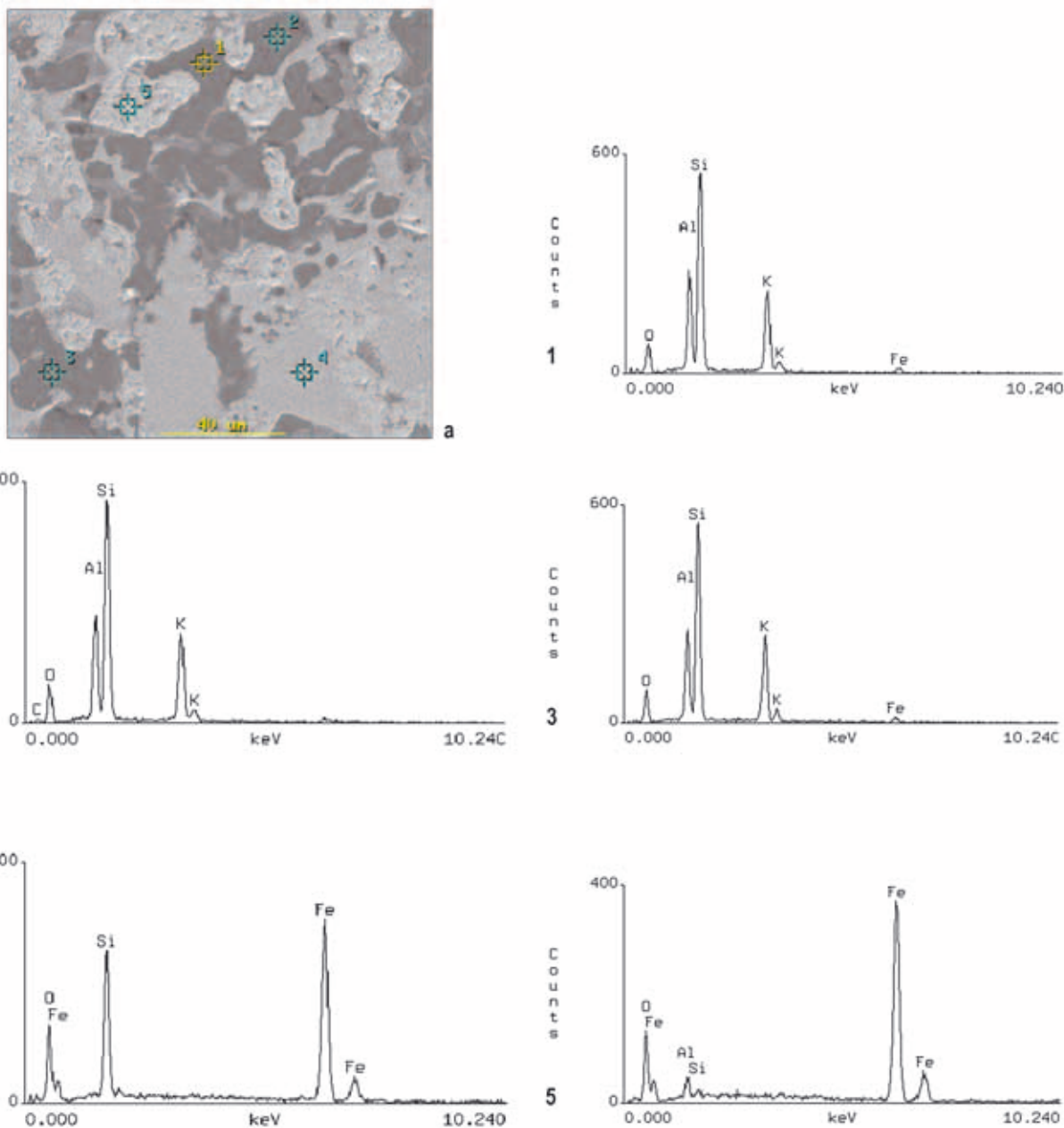
nia wspomnianych powyżej żużli. Naszym zdaniem ten proces winien być jednak definiowany raczej jako dotyczący obróbki kowalskiej materiału uzyskanego w piecu dymarskim. Jest zatem odrębnym działaniem, którego



Ryc. 22. Mikrostruktura żużla z „wytopy” doświadczalnego w Starachowicach w październiku 2013 roku. Fot.: I. Suliga
Fig. 22. Microstructure of slag from the experimental smelt in Starachowice, October 2013. Photo: I. Suliga



Ryc. 23. Ciemne dendryty leucytu $K_2Al_2Si_6O_{16}$ na tle typowej struktury żużli dymarskich. Fot.: I. Suliga
Fig. 23. Dark-hued dendrites of leucite $K_2Al_2Si_6O_{16}$ against the background of a typical structure of bloomery slag. Photo: I. Suliga



Ryc. 24. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej próbki żużla z eksperymentalnego procesu dymarskiego w Starachowicach w październiku 2013 roku: a – miejsca mikroanaliz nr 1–5. Rys.: I. Suliga

Fig. 24. Results of X-ray microanalysis of slag from the experimental bloomery process in Starachowice in October 2013: a – places sampled for microanalysis no. 1–5. Drawing: I. Suliga

nie można odnosić wprost do technologii stosowanej w średniowieczu. Być może za sprawą powstałych podczas wytopów doświadczalnych aglomeratów żużlowo-żelazistych czynności „postredukcyjne” były w pewnym stopniu kojarzone z działalnością służącą przede wszystkim oczyszczeniu żelaza dymarskiego, podczas gdy w rzeczywistości jest to etap ewidentnie związany z plastyczną obróbką uzyskanego materiału.

Postać i struktura łupki uzyskanej w roku 2013 w Starachowicach wskazuje też, że w piecu dymarskim typu kotlinkowego funkcjonuje nierozważany dotąd mecha-

nizm formowania żelaza. Źródłem metalicznego żelaza są bowiem w znaczącym stopniu procesy redukcji wtórnej i reakcje dysproporcjonacji w gąbczastej fazie żużlowej powstałej uprzednio w okolicy otworów dmuchowych (por. I. Suliga, T. Karwan 2014). Łupka żelazna pozostaje podczas procesu w stałym kontakcie z płynnym żużłem, który zabezpiecza ją przed wtórnym utlenieniem za sprawą powietrza dostarczanego przez otwory dmuchowe, ale też czynnie uczestniczy w procesie jej stopniowego rozrostu.

Zaproponowany tu model powstawania łupki żelaznej nie wyklucza udziału w jej formowaniu grąpi, które

w świetle wcześniej cytowanych opracowań mają powstać w części szybowej pieca. Te bryłki żelaza, o zawartości węgla dochodzącej do składu pondeutetycznego (por. E. Nosek 1994), mogą gromadzić się w strefie dmuchu, tworzyć strefę litej łupki oraz umożliwiać inicjowanie fazy metalicznej wydzielającej się z żużla.

Podczas badań łupki nie zaobserwowano jednak obszarów o podwyższonej zawartości węgla. Łupka wytworzona w październiku 2013 roku w Starachowicach na całej powierzchni miała strukturę ferrytyczną. W świetle tych obserwacji nie można zatem bezpośrednio strefy litej łupki wiązać z grąpiami nawęglonymi w środowisku szybu pieca dyfuzyjnie lub zgodnie ze schematem Z. Kędzierskiego i J. Stępińskiego (2006, s. 177, 192). Zaobserwowali oni obecność fazy ciekłej żelaza w niektórych badanych przez nich grąpiach ze stanowisk Łysa Góra i Jeleniów. Nawęglenie tych grąpi badacze wiązali z obecnością fosforu żelaza w sąsiedztwie ferrytu, umożliwiającą powstanie fazy ciekłej już w temperaturze 1050° C. Formowanie strefy litej łupki żelaznej z udziałem grąpi możliwe byłoby przy dopuszczeniu ich odwęglenia w utleniającej atmosferze dmuchu. Biorąc pod uwagę odkruszanie się grąpi w fazie wstępnego kucia – scalania łupki, można przyjąć, że większość tego typu form mogła powstawać w związku z taką czynnością (por. K. Bielenin 1992, s. 82–84).

Ważną przesłanką dla rekonstrukcji procesu dymarskiego w piecach kunowskich jest też fakt formowania kłoca żużlowego w górnej partii kotlinki, przy rzadkich stosunkowo wypadkach prawie całkowitego wypełnienia jej żużlem (por. K. Bielenin 1992, s. 76). Można w tym miejscu zwrócić uwagę, że oczekiwane przez współczesnych eksperymentatorów zalanie przez żużel nieomal całej kotlinki pieca dymarskiego nie jest aż tak częste w wypadku oryginalnych kłoców żużla znanych z terenu świętokrzyskiego okręgu hutnictwa starożytnego. Zwłaszcza enklawy tego okręgu, zlokalizowane nad rzekami Kamienną czy Czarną Nidą, dostarczają przykładów stosunkowo płytkiej penetracji kotlinki przez żużel (por. A. Przychodni 2006a, s. 113). Trudno jednoznacznie uznać to za dowód niższego poziomu umiejętności hutników pracujących na tych terenach. Można raczej przypuszczać, że w znaczącej mierze było to wynikiem charakteru dostępnych złóż rudnych (por. A. Przychodni 2006a, s. 107, ryc. 2). Niewykluczone, że również inne warunki prowadzenia procesu dymarskiego – np. związane z pogodą – miały znaczący wpływ na obserwowaną w materiale archeologicznym zmienną i różnorodną jakość jego świadectw. Można tu dodać, że obserwowana jest ona często w obrębie jednego warsztatu hutniczego – piecowiska, zapewne eksploatowanego przez jedną grupę dymarzy.

Na uzyskanie opisanych efektów eksperymentalnego „wytopu” miało również wpływ stosowanie się do rezi-

mów związanych np. z zachowaniem właściwego kierunku dmuchu, służącego odpowiedniej cyrkulacji powietrza w części szybowej pieca. Istotne okazują się właściwe porcje i frakcje materiałów wsadowych, zapewniające odpowiednią „przewiewność” w obrębie szybu i uzyskanie właściwej temperatury. Podobne znaczenie ma umiejętne porcjowanie materiałów wsadowych, czyli podawanie namiarów rudy żelaza na przemian z wyselekcjonowanym węglem drzewnym w odpowiednim stosunku wagowym. Obserwacja otworów dmuchowych oraz wlotu kanału kotlinkowego pozwala natomiast skutecznie reagować na wahania temperatury, skutkujące zmianą stopnia upłynnienia żużla, oraz na podnoszenie się jego poziomu w strefie dmuchu.

W latach 2014 i 2015 przeprowadzono, zgodnie z metodyką zaproponowaną przez A. Wronę, szereg dalszych eksperymentów, które każdorazowo dostarczyły rezultatów porównywalnych do uzyskanego w październiku roku 2013. Zastosowanie różnych proporcji dwóch rodzajów rud używanych do tych procesów skutkowało zróżnicowaniem ilości otrzymanego żelaza i żużla. Za każdym razem uzyskiwano jednak powtarzalność zasadniczego efektu, tj. upłynnienia żużla i jego spuszczenia do kotlinki piecowej (Ryc. 25), towarzyszącego uformowaniu łupki żelaznej powyżej kotlinki (Ryc. 26). Wykazano, że proces można z powodzeniem przeprowadzić przy zastosowaniu kilkudziesięciu kilogramów rudy, przy czym ze względu na rozmiary kotlinki, ilość ta nie może przekroczyć ok. 50 kg. Większa część wsadu rudnego przetworzona zostaje na żużel, który spływa do kotlinki wypełniając ją w stopniu uwarunkowanym przez drożność połączenia szybu z częścią podziemną pieca²⁵. Łupka żelazna stanowi każdorazowo ok. 10–15% wagowego udziału tego wsadu, chociaż niekiedy uzyskiwano produkt stanowiący blisko 20% wagi użytej do procesu rudy. Paliwo, czyli węgiel drzewny, poza ilością niezbędną dla wygrzania i wysuszenia pieca oraz wypełnienia kotlinki, stanowi niewiele ponad wskazane 50 kg, zatem jego stosunek wagowy do całkowitej ilości użytej w procesie rudy jest nieomal równy.

Eksperyment przeprowadzony pod Kielcami późną jesienią 2013 roku przy użyciu ok. 60 kg rudy²⁶ wykazał, że jest to dla pieca typu kunowskiego wartość progowa, gdyż nadmierny rozrost łupki żelaznej spowodował wówczas nieomalże zamknięcie światła dmuchu, a w końcowej fazie tego procesu utrudnione było także dalsze odprowadzanie żużla do kotlinki.

Przedstawiony tu mechanizm formowania łupki żelaznej w piecu dymarskim typu kotlinkowego wymaga

²⁵ Przedwczesne zamknięcie dostępu do kotlinki przez napływający z góry żużel może spowodować niemożność kontynuowania procesu.

²⁶ Korzystano wówczas wyłącznie z rudy bośniackiej, bez dodatku lokalnych limonitów.



Ryc. 25. Kloc żuźlowy uzyskany w trakcie eksperymentalnego „wytopu” podczas „Dymarek Świętokrzyskich” w 2015 roku. Fot.: A. Wrona
 Fig. 25. Block of slag from experimental smelting during the “Holy Cross Bloomeries”, 2015. Photo: A. Wrona

weryfikacji w kolejnych próbnym „wytopach”. Szczególnie cenne byłoby prześledzenie kinetyki reakcji zachodzących w poszczególnych częściach pieca. Powstawanie łupki można zaobserwować już po podaniu dwóch-trzech porcji wsadu, kiedy na poziomie otworów dmuchowych nie jest jeszcze widoczny płynny żużel. Spływa on wówczas zapewne poniżej łupki, w przestrzenie pomiędzy kawałkami węgla drzewnego. Właściwa, nasycona gazami redukcyjnymi „kąpiel żuźlowa” łupki, skutkująca opisanymi wyżej zjawiskami koagulacji, redukcji wtórnej i dysproporcjonacji, odbywa się w trakcie ostatniej fazy procesu, zatem finalna łupka żelazna, będąca przedmiotem naszych studiów, jest najprawdopodobniej pozostałością tego właśnie etapu pracy pieca dymarskiego. Dalszych badań metaloznawczych nad mechanizmami nawęglania łupki w środowisku pieca dymarskiego wymaga także słabsza podatność na kucie niektórych łupek z późniejszych eksperymentów (por. A. Wrona 2013).

Ustalenia teoretyczne K. Bielenina dotyczące PSK zyskały też na wiarygodności poprzez nowe dowody w postaci wyników badań wykopaliskowych prowadzonych od 2010 roku przez Sz. Orzechowskiego na uroczysku

Wykus²⁷. Istotny dla naszych rozważań jest stan zachowania kłoców żuźlowych na tym stanowisku, które nie zostały naruszone przez działalność gospodarczą człowieka od momentu pozostawienia ich przez starożytnych hutników do czasu odkrycia. Omawiana tu powierzchnia żużla, który zastygał po oddzieleniu łupki żelaznej, nie podlegała procesom, które powodowały usunięcie porowatych „narośli” – form powstałych przypuszczalnie w trakcie wyciągania żelaza z pieców przez starożytnych hutników (Sz. Orzechowski 2013, s. 78–80). W wypadku stanowisk dymarskich odkrywanych na polach uprawnych, wspomniane „narośla” na powierzchni kłoców czy ułamki żużla o formie plackowatej lub soplowatej związane z jego wypływaniem w czasie procesu na powierzchnię gruntu, poza obręb pieca, a zwłaszcza w trakcie jego rozbiórki, nie mogły się zachować *in situ* i są zazwyczaj przemieszczone przez pług czy wręcz całkowicie usunię-

²⁷ Wzniesienie na Płaskowyżu Suchedniowskim, znane głównie jako miejsce obozowania żołnierzy majora Henryka Dobrzańskiego „Hubala” i zgrupowań Armii Krajowej „Ponurego” i „Nurta”, położone w pow. kieleckim na terenie leśnictwa Kaczka (nadleśnictwo Suchedniów, obręb leśny Siekierno).



Ryc. 26. Jedna z większych łupek żelaznych uzyskanych w trakcie eksperymentów dymarskich prowadzonych w Mójczy w 2014 roku.

Fot.: A. Przychodni

Fig. 26. A larger iron bloom from the bloomery experiments carried out at Mójczy in 2014.

Photo: A. Przychodni

te z pierwotnego kontekstu. Wspomniane tu stanowiska, zlokalizowane na terenach rolnych, stanowiły do-tychczas *gros* źródeł do badań starożytnego hutnictwa świętokrzyskiego. Relikty pieców dymarskich zachowa-nych praktycznie w stanie takim, w jakim pozostawili je starożytni hutnicy po zakończeniu pracy, gdzie nieko-rzystne oddziaływanie procesów postdepozycyjnych jest minimalne, umożliwia dokonanie obserwacji, które po szczegółowej analizie pozwolą na lepsze przygotowanie do dalszych prac nad rekonstrukcją procesu dymarskiego. Ułatwią też z pewnością bardziej poprawną interpretację wyników przeprowadzonych ostatnio eksperymentów²⁸.

Obserwacje związane z eksperymentem dymarskim przeprowadzonym w roku 2013 w Starachowicach i póź-niejszymi pracami doświadczalnymi mają również wpływ na możliwość odtworzenia organizacji pracy starożyt-

nych piecowisk, czyli warsztatów grupujących większą liczbę pieców. W świetle danych uzyskanych podczas tego doświadczenia, dość istotna dla owej organizacji wydaje się ilość powietrza, która dostępna jest w o-toczeniu każdego pracującego obiektu hutniczego, a właś- ciwie ilość zawartego w powietrzu tlenu, niezbędnego dla otrzymania odpowiedniej temperatury na poziomie dmuchu. Proponowana niegdyś rekonstrukcja „baterii piecowych” (por. A. Przychodni 2006b, s. 207, ryc. 4), czyli pieców pracujących równocześnie w ramach tzw. piecowisk uporządkowanych, wymaga zatem weryfika- cji. Praktyczne obserwacje eksperymentalne potwierdziły także wyrażane wcześniej poglądy K. Bielenina dotyczą- ce organizacji pracy na piecowisku dymarskim, wypra- cowane na podstawie analizy układów stratygraficznych poszczególnych kotlinek piecowych w ramach badanych przez niego struktur, które wskazują na budowanie pie- ców jeden po drugim, a nie równocześnie (K. Bielenin 1992, s. 129, ryc. 64).

W większości wypadków doświadczenia z lat 2013–2015 prowadzone były z użyciem dmuchu sztucznego, który z pewnością w okresie wpływów rzymskich był sto- sowany na terenie środkowoeuropejskiego *Barbaricum*, chociażby na potrzeby zasilania powietrzem palenisk

²⁸ Należy dodać, że dokonana tu interpretacja znalezisk z uroczyska Wykus ma charakter wstępny, zaś opracowanie wyników badań zosta- nie dokonane przez ich autora po zakończeniu rozpoznania tego kom- plesku produkcyjnego. Zamieszczone tu uwagi są oparte wyłącznie na obserwacjach uczestniczącego w tych badaniach A. Wrony oraz wizy- towania tychże przez współautora niniejszego tekstu. Za możliwość ich wykorzystania serdecznie dziękujemy Panu dr hab. Szymonowi Orzechowskiemu z Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach.

kowalskich. Dowodzą tego znaleziska bagienne z terenu dzisiejszej Danii (Ryc. 27). Drewniana, Y-kształtna dysza skupiająca powietrze podawane zapewne z dwóch pracujących równocześnie miechów, odkryta została na stanowisku w Hjortspring (A. E. Christensen 2005, s. 71; A. S. Dobat 2008, s. 84). Podobny egzemplarz pochodzi z depozytu bagiennego w Nydam, gdzie znaleziono również dwie pary drewnianych listew, służących zamykaniu i otwieraniu dopływu powietrza do wnętrza miechów workowatych (A. S. Dobat 2008, s. 83). Pojedyncza para listew stanowiących oprawę miecha omawianej tu konstrukcji znana jest też z bagna Vimose (A. S. Dobat 2008, s. 67, ryc. 39)²⁹.

W omawianych tu eksperymentach zastosowano miechy zrekonstruowane na podstawie tych właśnie znalezisk. Niekiedy, przy braku synchronizacji pracy miechów dochodziło do nadpalenia końcówek drewnianych dysz przez wydobywające się z otworów dmuchowych gazy spalinowe, dlatego też zaczęto je zabezpieczać gliną. Można założyć, że doświadczeni starożytni dymarze, korzystając z miechów, nie musieli używać tego typu ochrony. Należy tu nadmienić, że na terenie okręgu świętokrzyskiego nie stwierdzono dotychczas pozostałości tego typu końcówek, co uznaje się za jedną z przesłanek stosowania dmuchu naturalnego (Sz. Orzechowski 2013, s. 122). Dotychczasowe wyniki badań doświadczalnych wskazują jednak na możliwość używania dmuchu sztucznego, który wydaje się wręcz niezbędny dla utrzymania odpowiedniej temperatury w strefie powstawania łupki żelaznej w piecach o parametrach stosowanych w omawianych tu testach, chociaż nie wykluczają wykorzystywania także naturalnego ciągu powietrza w trakcie procesu.

Przeprowadzenie „wytopów” doświadczalnych zgodnie z tezami koncepcji PSK było wielką troską ostatnich lat życia i działalności naukowej K. Bielenina³⁰. W roku 2005 pisał on, że: [...] *nieznajomość techniki odprowadzania żużla ze strefy redukcji i związanych z nią uwarunkowań, to główna przyczyna impasu, w jakim znalazły się próby odtworzenia starożytnego procesu dymarskiego w piecu typu zagłębionego. W świetle przedstawionych tu materiałów przyznać należy, że nadal nie znamy również tak dalszych szczegółów konstrukcji szybowej ówczesnego pieca, jak i samych zabiegów przy prowadzonym wytopie* (K. Bielenin 2005, s. 190). Liczył, że weryfikacja jego teoretycznych założeń zostanie dokonana przez – jak mawiał – *środowisko kieleckie*. Możemy obecnie cieszyć się, że jego życzenie zaczyna się spełniać i dzięki inspiracji nestora archeometalurgii żelaza jesteśmy teraz bliżej wyjaśnienia tajemnic starożytnego procesu dymarskiego.



Ryc. 27. Nydam. Dwie pary drewnianych listew służących do oprawy miechów workowatych oraz drewniana dysza (wystawa *The Spoils of Victory. The North in the Shadow of the Roman Empire*, Muzeum Narodowe w Kopenhadze, 2003 roku por. L. Jørgensen, B. Storgaard, L. Gebauer Thomsen 2003). Fot.: A. Przychodni Fig. 27. Nydam. Two pairs of wooden slats framing the bag bellows and a wooden nozzle (*The Spoils of Victory. The North in the Shadow of the Roman Empire*, exhibition at the National Museum in Copenhagen in 2003; (cf. L. Jørgensen, B. Storgaard, L. Gebauer Thomsen 2003). Photo: A. Przychodni

Upłynnienie żużla i odprowadzenie go do kotlinki piecowej odsłoniło łupkę żelazną, która dostarczyła dodatkowych danych o procesach zachodzących w tym typowym dla kultury przeworskiej obiekcie hutniczym. Wyniki najnowszych badań eksperymentalnych umożliwiają również dokonanie zapewne bardziej trafnych interpretacji źródeł archeologicznych, poświadczających wysokie umiejętności techniczne grup ludności zajmujących się uzyskiwaniem żelaza w okresie wpływów rzymskich na terenie ziem polskich.

dr Andrzej Przychodni
Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków w Kielcach
Świętokrzyskie Stowarzyszenie Dziedzictwa
Przemysłowego
ul. Zamkowa 5, 25-009 Kielce
andrzejp@korzenie.gimnazjum.com.pl

dr inż. Ireneusz Suliga
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki
Przemysłowej
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
ireneusz.suliga@gmail.com

²⁹ Uprzejmie dziękujemy Pani dr Marzenie Przybyłe z Instytutu Archeologii Uniwersytetu Jagiellońskiego za pomoc w dotarciu do literatury dotyczącej omawianych tu zabytków.

³⁰ Profesor Kazimierz Bielenin zmarł 19 listopada 2011 roku.

BIBLIOGRAFIA

- Agricola, G.
2000 *De re Metallica libri XII*, Jelenia Góra (tłum. K. Kurková).
- Bielenin, K.
1973 *Dymarski piec szybowy zagłębiony (typu kotlinkowego) w Europie starożytnej*, *MatArch.* XIV, s. 5–101.
1978 *Żużel żelazny jako źródło archeologiczne w relacji żużel – typ pieca dymarskiego i odwrotnie*, *PMMAE* 25, s. 53–64.
1985 *Einige Bemerkungen zu Schmelzversuchen in Rennöfen*, [w:] *Urgeschichte – Römerzeit – Mittelalter. Materialien zur Archäologie und Landeskunde des Burgenlandes II. Mit kultur- und naturwissenschaftlichen Beiträgen. Festschrift Alois-J. Ohrenberger*, Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 71, Eisenstadt, s. 181–193.
1992 *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*, Kielce².
1999 *Einige Bemerkungen zu den Rennofenschlacken der Schlackengrubenöfen*, [w:] „...und sie formten das Eisen“. *Ur-, frühgeschichtliche und mittelalterliche Eisengewinnung und -verarbeitung. Internationales ÖGUF-Symposium, Linz–Freinberg, 27.–30.10.1998*, „*Archaeologia Austriaca*” 82/83 (1998/99), s. 523–528.
2002 *Kilka dalszych uwag dotyczących starożytnego hutnictwa świętokrzyskiego*, [w:] Sz. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnego hutnictwa żelaza na ziemiach polskich*, Kielce, s. 11–25.
2005 *Kłoc żużla dymarskiego z Boleszyna. Uwagi o znaczeniu badań powierzchni kłoców żużla dymarskiego*, *MatArch.* XXXV, s. 189–198.
2006 *Podsumowanie 50-lecia badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 13–31.
2011 *Mieczysław Radwan – inicjator badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*, [w:] M. Karbowniczek (red.), *Mieczysław Radwan. W 120. rocznicę urodzin*, Kraków, s. 75–104.
- Bielenin, K., Suliga, I.
2008 *The Ancient Slag-pit Furnace and the Reduction Process in the Light of a new Archeological Concept and Metallurgical Research*, „*Metallurgy and Foundry Engineering*” 34/1, s. 53–78.
- Christensen, A. E.
2005 *The Roman Iron Age tools from Vimose, Denmark*, „*Acta Archaeologica*” 76/2, s. 59–86.
- Dobat, A. S.
2008 *Jernalderen i Nordeuropa. Werkzeuge aus kaiserzeitlichen Heeresausüstungsopfern mit besonderer Berücksichtigung der Fundplätze Illerup Ådal und Vimose*, *Jysk Arkæologisk Selskab Skrifter* 61, Højbjerg.
- Espelund, A.
2009 *A new look at experimental ironmaking*, „*EuroREA – Journal of (Re)Construction and Experiment in Archeology*” 6, s. 50–52.
- Holewiński, S.
1956 *Wstępne badania starożytnych żużli hutniczych skupionych na niektórych terenach Polski*, „*Archiwum Hutnictwa*” 1/3, s. 251–282.
- Jørgensen, L., Storgaard, B., Gebauer Thomsen, L. (red.)
2003 *The Spoils of Victory. The North in the shadow of the Roman Empire*, Copenhagen.
- Karbowniczek, M., Suliga, I., Weker, W.
2009 *Experimental metallurgical process in a slag pit bloomery furnace*, „*EuroREA – Journal of (Re)Construction and Experiment in Archeology*” 6, s. 45–49.
- Kędzierski, Z., Stępiński, J.
2006 *Metaloznawstwo żelaza z okresu rzymskiego na ziemiach polskich*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 175–195.
- Nosek, E.
1994 *The metallography of gromps*, [w:] M. Mangin (red.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie. Actes du Colloque Besançon, 10–13 Novembre 1993*, *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 536, Série Archéologie 40, Paris, s. 65–73.
- Orzechowski, Sz.
2011 *The canal-pit and its role in the bloomery process: the example of the Przeworsk culture furnaces in the Polish territories*, [w:] J. Hošek, H. Cleere, L. Mihok (red.), *The archaeometallurgy of iron, Recent developments in archaeological and scientific research*, Praha, s. 41–54.
2013 *Region żelaza. Centra hutnicze kultury przeworskiej*, Kielce.
- Orzechowski, S., Przychodni, A.
2014 *Experimental Iron Smelting in the Research on Reconstruction of the Bloomery Process in the Świętokrzyskie (Holy Cross) Mountains, Poland*, [w:] J. Reeves Flores, R. P. Paardekoooper (red.), *Experiments Past. Histories of Experimental Archaeology*, Leiden, s. 249–267.
- Orzechowski, S., Wrona, A.
2015 *Warsztat kowalski ludności kultury przeworskiej – problem identyfikacji*, [w:] *Davní majsterní ta virobništvo u Vislo-Dníprov's'komu regioní*, *Naukoví studii* 8, Viníki-Žešív-L'viv, s. 253–276.

- Pleiner, R.
2000 *Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters*, Praha.
- 2006 *Piece typu kotlinkowego na terenie Europy w okresie wpływów rzymskich*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 137–149.
- Przychodni, A.
2002 *Ośrodek starożytnej metalurgii żelaza nad Nidą*, [w:] Sz. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnego hutnictwa żelaza na ziemiach polskich*, Kielce, s. 45–59.
- 2006a *Starożytne hutnictwo nad Nidą, jako potencjalna enklawa świętokrzyskiego centrum dymarskiego*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 103–123.
- 2006b *Hutnictwo świętokrzyskie w edukacji szkolnej*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 205–211.
- Przychodni, A., Wrona, A.
2014 *Review of the 1st Bloomery Seminar, Starachowice 2013*, „EXARC Journal” 2014/1 (<http://journal.exarc.net/issue-2014-1/mm/review-1st-bloomery-seminar-starachowice-2013>, dostęp 15.02.2014).
- Radwan, M.
1958 *Konferencja sprawozdawcza Zespołu Historii Polskiej Techniki Hutniczej i Odlewniczej Polskiej Akademii Nauk*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” 3/3, s. 491–504.
- 1959 *Konferencja sprawozdawcza Zespołu Historii Polskiej Techniki Hutniczej i Odlewniczej*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” 4/2, s. 387–393.
- 1963 *Rudy, kuźnie i huty żelaza w Polsce*, Warszawa.
- Roździeński, W.
1948 *Officina Ferraria abo huta y warstat z kuźniami szlachetnego dzieła żelaznego (1612). Z unikatów Biblioteki Kapitulnej w Gnieźnie wydał, wstępem i przypisami zaopatrzył Roman Pollak*, Biblioteka Pisarzy Śląskich, seria II, tom 2, Katowice-Wrocław.
- Różański, W.
1982 *Sprawozdanie z obozu naukowo-doświadczalnego Akademii Górniczo-Hutniczej odbytego w dniach od 11 do 17 IX 1982 r. w Nowej Stupi*, Towarzystwo Przyjaciół Gór-
- nictwa Hutnictwa i Przemysłu Staropolskiego w Kielcach. Informator, październik, s. 54–57.
- Sławiński, W.
2002 *Techniki kowalskie stosowane na Mazowszu w okresie wpływów rzymskich – uwagi praktyka*, [w:] Sz. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnej metalurgii żelaza na ziemiach polskich*, Kielce, s. 177–181.
- Słowińska, D.
2014 *Związki z badaniami starożytnego hutnictwa na Mazowszu*, [w:] M. Karbowniczek (red.), *Kazimierz Bielenin, twórca polskiej archeometalurgii*, Kraków, s. 87–99.
- Suliga, I.
2006 *Dotychczasowe próby rekonstrukcji starożytnego procesu metalurgicznego w kotlinkowych piecach dymarskich z regionu świętokrzyskiego*, [w:] Sz. Orzechowski, I. Suliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim. Archeologia-Metalurgia-Edukacja*, Kielce, s. 163–173.
- Suliga I., Kargul P.
2007 *Efekt redukcji wtórnej w starożytnych żużlach dymarskich*, „Hutnik. Wiadomości Hutnicze” 74/11, s. 615–622.
- Suliga I., Karwan T.
2014 *Koncepcja prof. Kazimierza Bielenina „powierzchni swobodnego krzepnięcia” kłoców żużlowych i jej rozwinięcie w odniesieniu do starożytnego procesu dymarskiego*, [w:] M. Karbowniczek (red.), *Kazimierz Bielenin – twórca polskiej archeometalurgii*, Kraków, s. 155–172.
- Woyda, S.
2002 *Mazowieckie centrum metalurgiczne z młodszego okresu przedrzymskiego i okresu wpływów rzymskich*, [w:] Sz. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnego hutnictwa żelaza na ziemiach polskich*, Kielce, s. 121–154.
- Wrona, A.
2013 *The Production of High Carbon Steel Directly in Bloomery Process. Theoretical Bases and Metallographic Analyses of the Experiments Results*, „EXARC Journal” 2013/2 (<http://journal.exarc.net/issue-2013-2/ea/production-high-carbon-steel-directly-bloomery-process-theoretical-bases-and-metallographic-analyses>; dostęp 15.06.2013).

CHARACTERISTIC OF IRON BLOOM AND SLAG BLOCK FROM EXPERIMENTAL IRON SMELTING PROCESS

SUMMARY

Iron bloom was obtained as a result of an ancient iron smelting process carried out in slag-pit furnaces, apparently in use during the Roman Period in the Central European *Barbaricum*, more notably in the ter-

ritory settled by the Przeworsk Culture people. In the 1970s, prompted by the reflections of M. Radwan (1963) and by the insights gained from the study of archaeological traces of the iron smelting process found in

the great centre of iron metallurgy in the Świętokrzyskie (Holy Cross) Mts. in central Poland, K. Bielenin developed the concept of the free solidification process (Polish acronym PSK) to describe the process of the formation of the iron bloom and slag blocks inside the slag-pit – the underground part of the bloomery furnace. Bielenin found that iron obtained in these furnaces had to contain only a minor amount of slag, non-ferritic inclusions and non-carbonized ferritic inclusions. Only then would the iron have the right degree of malleability needed for successful forging.

Archaeological studies of the Holy Cross Mts. centre of iron metallurgy have yielded a very modest amount of iron bloom finds, mostly in the form of flattened lumps, the product from the working of the bloom with hammers. Obviously, the obtained iron, a highly valued and prized resource, was taken out of the production site. What remained was the debris of the bloomery furnace slag-pits, filled to a various extent with slag, and iron making residue, so-called gromps, from the process of forging and consolidating raw iron blooms. Alternately, M. Radwan has interpreted these finds as debris from the smelting process claiming that this residue had formed in the shaft of the furnace during the iron smelting process. Given that the process of smelting iron in furnaces with a slag-pit is poorly documented in the archaeological record more comprehensive data had to be obtained from experimental studies. In Poland the first of these experiments were made in the late 1950s.

Furnaces with a variously designed shaft (the above-ground structure) were used in the experiments (cf. Fig. 1, 4). Unfortunately, the product obtained tended to be a slag-iron agglomerate (Fig. 2, 3) markedly different from what is available in the archaeological record. To solve this problem the experiments were modified to employ K. Bielenin's conception of the free solidification of slag blocks.

This concept would be tested in practice only in the second decade of the 21st cent. during the experimental studies of A. Wrona made with modern replicas of a furnace referred to as type *Kunów* with a slag-pit canal (Fig. 6). The research findings outlined here mostly draw on results of an experimental process carried out during the 1st Bloomery Seminar held in Starachowice in October 2013. Similar results had been obtained by A. Wrona in 2012 and 2013, and during experiments carried out by a specialist team in 2013–2015. Their results help to supplement the analysis presented here.

During the experiment made in 2013 a block of slag was obtained (Fig. 11) and iron bloom separated from the surface of the slag-block (Fig. 12). Weighing 3.65 kg the bloom had a ferritic structure appropriate for subsequent working. The experimental smelt had used 40.6 kg of iron ore and 50 kg of charcoal. The ore was locally obtained siderite (Fig. 7) and hematite imported from Bosnia and Herzegovina (Fig. 8), at a ratio of 1:1. The process was carried out in two stages, in

an artificial blast furnace, with air injected under pressure from bag bellows (Fig. 9). During the first stage waste rock was reduced to slag and the formation of the iron bloom initiated. Next, air was allowed into the slag-pit canal of the furnace draining the iron bloom from the slag (Fig. 10).

The iron bloom (Fig. 12) and the block of slag (Fig. 11) were next subjected to specialist studies. Observations of the microstructure of the bloom obtained during experiments made in Starachowice in 2013 identified a solid zone (Fig. 14) and a filigree zone (Fig. 13, 16) as well as a net-zone of iron formation (Fig. 17). The presence of these zones has been confirmed in blooms deriving from the earlier experiments of A. Wrona (Fig. 18–21). Furthermore, the study of the microstructure of the bloom helped establish that in a bloomery furnace equipped with a slag-pit the metallic iron is mostly obtained through processes of secondary reduction and disproportionation within the sponge gob of slag formed earlier near the tuyeres of the furnace. Throughout the process the iron bloom is in constant contact with liquid slag, which not only prevents the bloom from undergoing a secondary oxidation caused by air injected through the tuyeres, but also has an active part in the process of the gradual accretion of the bloom. Upon examination, the microstructure of the slag (Fig. 22–24) formed during the experiment was found to be consistent with the chemical composition and structure of ancient slag discovered in the Holy Cross Mts., except for compounds formed when Bosnian ore was used; the 0.07% content of K_2O (cf. Fig. 11) in this ore led to the formation of leucite $K_2Al_2Si_6O_{16}$, identified during the microstructural analysis as black dendrites (Fig. 23).

Similarly as experiments carried out in 2012–2015, the Starachowice experiment confirmed the validity of the assumptions made by K. Bielenin. Furthermore, observations made during these studies prompted a series of conclusions on the organization of the operation of a slag-pit furnace cluster, the feasibility of the use of artificial blast during the process (Fig. 9, 27) and the impact of atmospheric factors on the process flow. The results presented here prove that it is highly advisable to continue the experimental work to obtain a more detailed understanding of the stages of the iron smelting process, and to carry out these tests using local iron ores only. It was found also that the technical purity of the experimentally obtained iron is sufficient to classify this stage of product to working phase. Consequently, the procedures described in the literature as a post reductive stage should not be understood as a stage aimed on the removal of impurities but rather as a phase aimed on shaping the metal obtained in the process of reduction. It is also important to note the new data possibly of use in our studies of the bloomery process furnished since 2010 by the investigation of well-preserved bloomery fields in site (wilderness) Wykus in forest inspectorate Suchedniów, Kielce County.

Tłumaczenie: Anna Kinecka

WYKAZ SKRÓTÓW TYTUŁÓW CZASOPISM I WYDAWNICTW WIELOTOMOWYCH

ABBREVIATIONS OF PERIODICALS' AND SERIAL PUBLICATIONS' TITLES

AAC	– „Acta Archaeologica Carpathica”, Kraków
AAHung.	– „Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae”, Budapest
AFB	– „Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodendenkmalpflege”, Berlin (Stuttgart)
Amtl. Ber.	– „Amtlicher Bericht über die Verwaltung der naturgeschichtlichen, vorgeschichtlichen und volkskundlichen Sammlungen des Westpreußischen Provinzial-Museums für das Jahr...”, (później: „Amtlicher Bericht über die Verwaltung der naturhistorischen, archaeologischen und ethnologischen Sammlungen des Westpreußischen Provinzial-Museums für das Jahr...” oraz „Amtlicher Bericht über die Verwaltung der naturgeschichtlichen, vorgeschichtlichen und volkskundlichen Sammlungen des Westpreußischen Provinzial-Museums für das Jahr...”), Danzig
APolski	– „Archeologia Polski”, Warszawa
APS	– „Archeologia Polski Środkowoschodniej”, Lublin (wcześniej: Lublin-Chełm-Zamość)
AR	– „Archeologické rozhledy”, Praha
B.A.R. Int. Series	– British Archaeological Reports, International Series, Oxford
BerRGK	– „Bericht der Römisch-Germanischen Kommission”, Frankfurt a.M.-Berlin
BJahr.	– „Bonner Jahrbücher”, Köln/Bonn
BMJ	– „Bodendenkmalpflege in Mecklenburg-Vorpommern”, Lübstorf (wcześniej: „Bodendenkmalpflege in Mecklenburg. Jahrbuch ...”, Schwerin/Rostock/Berlin)
CRFB	– Corpus der römischen Funde im europäischen Barbaricum
FAP	– „Fontes Archaeologici Posnanienses” (wcześniej: „Fontes Praehistorici”), Poznań
Inf.Arch.	– „Informator Archeologiczny. Badania rok ...”, Warszawa
InvArch.	– „Inventaria Archaeologica, Pologne”, Warszawa-Lódź
JmV	– „Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte”, Halle/Saale
JRGZM	– „Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz”, Mainz
KHKM	– „Kwartalnik Historii Kultury Materialnej”, Warszawa
KZIA	– Kratkie soobšeniá Instituta arheologii Akademii nauk SSSR (Краткие сообщения Института археологии Академии наук СССР), Moskva
MIA	– Materialy i issledovaniá po arheologii SSSR (Материалы и исследования по археологии СССР), Moskva
MatArch.	– „Materiały Archeologiczne”, Kraków
MS	– „Materiały Starożytne”, Warszawa
MSiW	– „Materiały Starożytne i Wczesnośredniowieczne”, Warszawa
MSROA	– „Materiały i Sprawozdania Rzeszowskiego Ośrodka Archeologicznego”, Rzeszów-Krosno-Sandomierz-Tarnów (-Przemysł/Tarnobrzeg)
MZP	– „Materiały Zachodniopomorskie”, Szczecin
PA	– „Památky archeologické” (wcześniej: „Památky archeologické a místopisné”), Praha
PArch.	– „Przegląd Archeologiczny”, Poznań
PMMAE	– „Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi. Seria Archeologiczna”, Łódź
PomAnt	– „Pomorania Antiqua”, Gdańsk
Prahistoria ziem polskich	– <i>Prahistoria ziem polskich</i> , tom I: <i>Paleolit i mezolit</i> (red. W. Chmielewski, W. Hensel), Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1975; tom II: <i>Neolit</i> (red. W. Hensel, T. Wiślański), Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1979; tom III: <i>Wczesna epoka brązu</i> (red. A. Gardawski, J. Kowalczyk), Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1978; tom IV: <i>Od środkowej epoki brązu do środkowego okresu lateńskiego</i> (red. J. Dąbrowski, Z. Rajewski), Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1979; tom V: <i>Późny okres lateński i okres rzymski</i> (red. J. Wielowiejski), Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1981
Prussia	– „Sitzungsberichte der Altertumsgesellschaft Prussia” (później: „Prussia. Zeitschrift für Heimatkunde”), Königsberg
PZ	– „Praehistorische Zeitschrift”, Berlin-New York
RArch.	– „Recherches Archéologiques”, Kraków
RB	– „Rocznik Białostocki”, Białystok
RGA	– Reallexikon der Germanischen Altertumskunde: 1. wyd.: J. Hoops (wyd.), tomy 1–4 (K. J. Trübner, Straßburg 1911–1919), 2. wyd.: H. Jankuhn, H. Beck i in. (wyd.), tomy 1–35 (de Gruyter, Berlin-New York 1973–2007).
RO	– „Rocznik Olsztyński”, Olsztyn
RosArh.	– „Rossijskaá arheologíá” (Российская археология), Moskva
SJahr.	– „Saalburg Jahrbuch”, Berlin-New York
SlA	– „Slovenská archeológia”, Bratislava
SovArh.	– „Sovetskaá arheologíá” (Советская археология), Moskva
SprArch.	– „Sprawozdania Archeologiczne”, Kraków
SprPMA	– „Sprawozdania P.M.A.”, Warszawa
WA	– „Wiadomości Archeologiczne”, Warszawa
ZfE	– „Zeitschrift für Ethnologie”, Berlin
ZNUJ	– „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego”, Kraków
ZOW	– „Z otchłani wieków”, Warszawa

Sprzedaż / Retail:
Długa 52 (Arsenał), 00-241 Warszawa

Sprzedaż wysyłkowa / Mail order:
tel./phone: +48 22 5044 872, +48 22 5044 873
e-mail: wydawnictwapma@pma.pl

Państwowe Muzeum Archeologiczne. Warszawa 2016. Wydanie I. Nakład 300 egz.

Druk i oprawa: DRUKARNIA Janusz Bieszczad, ul. Moszczenicka 2, 03-660 Warszawa