

MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii



pod redakcją
Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki



WYDZIAŁ
ARCHEOLOGII

MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii

pod redakcją

Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki

Poznań 2021

Mikroprzeszłość
Badania specjalistyczne w archeologii

Recenzje:
dr hab. Maria Lityńska-Zajac, prof. IAE PAN
dr hab. Marek Nowak, prof. UJ

Redakcja:
Aldona Kurzawska
Iwona Sobkowiak-Tabaka

Opracowanie techniczne i skład komputerowy:
Bartłomiej Gruszka

Korekta językowa:
Agnieszka Gruszka

Projekt okładki i rycin poprzedzających rozdziały:
Przemysław Matejko

ISBN: 978-83-946591-8-9

<https://doi.org/10.14746/WA.2021.1.978-83-946591-8-9>

Monografia jest dostępna online w Repozytorium Uniwersytetu im A. Mickiewicza w Poznaniu
<https://repozytorium.amu.edu.pl/>

Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Publikacja dofinansowana z Projektu Wydziału Archeologii nr DEC/19/WArch/2021

Copyright by Faculty of Archaeology Adam Mickiewicz University in Poznań and authors

Poznań 2021

Nakład:
200 egz.

SPIS TREŚCI

Przedmowa	5
Andrzej Michałowski	
Wprowadzenie	7
Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka	
Palinologia	13
Piotr Kołaczek, Monika Karpińska-Kołaczek, Sambor Czerwiński, Katarzyna Marcisz, Mariusz Lamentowicz	
Archeobotanika	31
Magdalena Moskal-del Hoyo	
Dendroarcheologia	67
Henryk P. Dąbrowski	
Mikroskamieniałości okrzemkowe	89
Monika Rzodkiewicz	
Wioślarki	115
Izabela Zawiska	
Archeoentomologia	131
Marcin Kadej, Szymon Konwerski, Agata Hałuszko	
Archeomalakologia	155
Aldona Kurzawska	
Izotopy stabilne węgla ($\delta^{13}\text{C}$) i tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w archeomalakologii	181
Karina Apolinarska	
Archeozoologia	199
Jarosław Wilczyński	

Antropologia fizyczna	219
Dorota Lorkiewicz-Muszyńska, Julia Sobol, Wojciech Kociemba, Anna Hyrchała, Mariusz Glapiński	
Archeogenetyka	249
Maciej Chyleński	
Mikromorfologia	277
Karolina Leszczyńska, Michał Jankowiak	
Petroarcheologia	297
Piotr Gunia, Ewa Lisowska	
Surowce krzemionkowe – możliwości badań	315
Iwona Sobkowiak-Tabaka	
Traseologia	333
Katarzyna Pyżewicz	
Ceramika – badania petroarcheologiczne	353
Piotr Gunia, Marta Krueger, Ewa Lisowska	
Ceramika – badania osadów organicznych wnętrza naczyń	367
Marta Krueger	
Tekstylnia	387
Maria Cybulska, Anna Drązkowska	
Archeometalurgia	407
Marcin Biborski, Mateusz Biborski	
Mikroskopy stosowane w archeologii	431
Piotr Gunia, Ewa Lisowska, Aldona Kurzawska	
Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w archeologii	443
Michał Krueger	
Wykaz autorów	451



Archeometalurgia

Marcin Biborski, Mateusz Biborski

WSTĘP

Od przeszło kilku dekad w badaniach specjalistycznych nad zabytkami archeologicznymi pojawił się termin archeometria. Pojęcie to ma w najnowszym obiegu naukowym bardzo szerokie znaczenie. W jego zakres wchodzi m.in. takie specjalności badawcze (dyscypliny naukowe), jak archeozoologia, archeobotanika, antropologia fizyczna, archeopetrografia, a także archeometalurgia. Wszystkie te specjalności naukowe mają w swoim założeniu pogłębienie i doprecyzowanie naszej wiedzy o prehistorii, a to m.in. dzięki zastosowaniu nowych metod badawczych, wykorzystujących nowe, coraz bardziej nowoczesne instrumentarium. Mamy tu na myśli m.in. rozwój mikroskopii świetlnej, a przede wszystkim mikroskopii elektronowej, zwanej także mikroskopią skaningową (por. Gunia i in., w tym tomie). Do tego dochodzą jeszcze szeroko stosowane różnego typu urządzenia, jak: spektrografy do nieniszczących badań składu chemicznego zabytków, twardościomierze i całe zestawy urządzeń, które w razie potrzeby ułatwiają przygotowywanie preparatów badawczych. Kluczowe znaczenie ma tu zwłaszcza odpowiednia preparatyka materiałów do badań, pozwala ona bowiem na uzyskiwanie wiarygodnych wyników, na podstawie których można przeprowadzić właściwą interpretację.

W badaniach nad zabytkami archeologicznymi wykonanymi z żelaza oraz ze stopów metali kolorowych, takich jak brązy, mosiądze, srebro i złoto, a także wyroby z cyny i ołowiu, jak już wyżej wspomniano, stosowana jest niezwykle przydatna archeometalurgia. W jej zakresie mamy najogólniej do czynienia z badaniami koncentrującymi się wokół dwóch podstawowych zagadnień, tj. próby odtworzenia czy też identyfikacji procesów technologii wykonywania starożytnych wyrobów metalowych oraz badania materiałoznawcze. Niekiedy mogą one też wskazywać na pochodzenie badanych wyrobów.

Do ich realizacji stosowane są przede wszystkim nowoczesne, metalograficzne mikroskopy świetlne, sterowane elektroniką i wyposażane w cyfrowe detektory, z których obraz może być zapisany w pamięci oraz poddany obróbce graficznej. W odróżnieniu od mikroskopów biologicznych, w których światło przechodzi przez badany preparat, w mikroskopie metalograficznym obserwacje próbki metalowej prowadzi się w świetle odbitym od jej powierzchni. Ponadto w badaniach wykorzystywana jest spektroskopia promieniowania elektromagnetycznego, jak np. fourierowska, ramanowska czy najczęściej stosowana rentgenowska spektroskopia fluorescencyjna (XRF) (por. Krueger, w tym tomie), pozwalająca na jakościową i ilościową analizę składu pierwiastkowego badanych materiałów zabytkowych.

Oprócz nowoczesnych mikroskopów świetlnych, m.in. w badaniach technologiczno-materiałowych archeologicznych zabytków metalowych, niezastąpionym instrumentem badawczym stał się skaningowy mikroskop elektronowy (ang. *scanning electron microscope*, SEM), który poza obrazowaniem, o dużej głębi ostrości i wysokim kontraście, równocześnie pozwala na przeprowadzenie analizy chemicznej (EDS), z użyciem wzorców, lub bezwzorcowo (por. Gunia i in., w tym tomie).

Niewątpliwie w ramach szeroko pojętej archeometalurgii mogą być też stosowane badania defektoskopowe z użyciem metody radiologicznej (rentgenowskiej), magnetycznej czy ultradźwiękowej.

W ramach badań archeometalurgicznych można wyróżnić dwa podstawowe kierunki, tj. archeometalurgię żelaza i archeometalurgię metali kolorowych, który to podział wynika ze zróżnicowanych warunkowań fizyko-chemicznych wyżej wspomnianych metali. Tego rodzaju zadania badawcze realizuje m.in. wyposażone w nowoczesny sprzęt i aparaturę badawczą, Laboratorium Archeometalurgii i Konserwacji Zabytków, Instytutu Archeologii Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Dla archeologa zajmującego się zwłaszcza epoką żelaza, a bliżej precyzując okresami, kiedy nastąpiło upowszechnienie używania tego metalu, do najistotniejszych pytań, na które chciałby znaleźć odpowiedź w pracach archeometalurgicznych, należą dwa zagadnienia. Jedno z nich dotyczy zróżnicowania technologii produkcji zabytków żelaznych, drugie natomiast możliwości identyfikacji ośrodków produkcji tych przedmiotów na podstawie kryteriów technologiczno-surowcowych (Kaczanowski 2006: 132). Jeszcze innym ważnym zagadnieniem są próby określenia potencjałów produkcyjnych, znaczenia gospodarczo-społecznego oraz kwestie dotyczące wymiany handlowej i kontaktów interkulturowych.

Prekursorami tychże badań w II poł. XX w. w Polsce byli m.in. M. Radwan, W. Różański, J. Piaskowski oraz później ich następcy, jak Z. Kędzierski, J. Stępiński, M. Biborski, P. Kaczanowski i G. Żabiński, a także specjaliści od starożytnego hutnictwa, jak K. Bielenin, S. Woyda, S. Pazda, I. Suliga oraz S. Orzechowski. Ich prace koncentrowały się na materiałach pochodzących ze świętokrzyskiego ośrodka metalurgicznego, mazowieckiego czy dolnośląskiego, ale także uwzględniały zabytki pochodzące z cmentarzysk i osad z epoki żelaza. Ponadto niektórzy ze wspomnianych badaczy

analizowali także i opracowywali zabytki z innych terenów Europy.

Spoza Polski nie sposób pominąć także wielu badaczy zajmujących się starożytną metalurgią, którzy przyczynili się do rozwoju archeometalurgii, takich jak E. Schürmann, R.F. Tylecote, H.H. Coghlan, R. Pleiner, J.F. Healy, R. Wyss, J. Ypey, D. Sim, R. Thomsen, V.F. Buchwald, D.A. Scott i ostatnio J. Lang.

MIKROSKOPOWA TECHNIKA BADAŃ METALOGRAFICZNYCH

Mikroskopowe badania metalograficzne zabytków mają na celu zbadanie mikrostruktury metali przy użyciu mikroskopu świetlnego (dawnej zwanego optycznym) w powiększeniach rzędu od około 50 nawet, do ponad 1000-krotnych. Aby można było strukturę metalu zbadać, należy najpierw pobrać odpowiednią próbkę, a następnie wykonać tzw. szlif, czyli zgląd metalograficzny. W tym celu pobraną próbkę zatapia się w odpowiednim tworzywie sztucznym. Po jego zastygnięciu przy zastosowaniu odpowiednich polerek poddaje się je mechanicznemu szlifowaniu i polerowaniu. W procesie tym używane są tarcze diamentowe oraz pasty lub zawiesiny diamentowe, tlenek aluminium, a także koloid silikonowy, często wykorzystywany w końcowych fazach polerowania. Należy przy tym pamiętać, że w przypadku obserwacji w mikroskopie świetlnym tworzywo sztuczne użyte do zatapiania próbek może być różnego rodzaju i nieprzewodzące elektryczności, natomiast w przypadku obserwacji w mikroskopie elektronowym próbka musi być zatopiona w materiale przewodzącym, zwykle na bazie węgla, tak aby elektrony mogły być odprowadzane ze zglądu i nie powodowały świecenia uniemożliwiającego obserwację próbki.

Z uwagi na ograniczenie w zakresie głębi ostrości, które następuje stopniowo przy coraz większych powiększeniach, powierzchnie preparatów muszą być wypolerowane aż do lustrzanego połysku. Na tak przygotowanej powierzchni trudno jest obserwować składniki struktury, wobec czego konieczne staje się wytrawienie zglądu odpowiednimi odczynnikami. Pozwalają one na ujawnienie zróżnicowanej, ziarnistej struktury metalu użytego do wyrobu zabytku. Najczęściej stosowanym odczynnikiem trawiącym żelazne próbki jest „Nital”, będący 3-4% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym. Stosuje

się go także w celu ujawnienia obszarów, zwłaszcza o podwyższonym udziale fosforu (tzw. odczynnik Oberhoffer). Natomiast w przypadku zgładów metalograficznych pobranych z metali kolorowych trawiące odczynniki dla ujawniania struktury próbek są inne. I tak np. dla miedzi i jej stopów stosuje się odpowiednie mieszaniny roztworów, które zawierają kwas solny + chlorek żelazowy + alkohol etylowy. W przemyśle wykorzystuje się także polerowanie i wytrawianie próbek metodą elektrolityczną, do obserwacji zarówno w mikroskopach świetlnych, ale także w mikroskopach transmisyjnych (TEM), zwłaszcza przy bardzo cienkich zgładach, np. foliach.

Wspomniane odczynniki trawią przede wszystkim granice ziarna metalu. Powierzchnia poszczególnych ziaren tej samej fazy może się różnie wytrawić, niekiedy silniej lub słabiej, co jest uzależnione od ich orientacji krystalograficznej. W przypadku stopów, które składają się z różnych faz, zwykle obserwuje się silniejsze wytrawienie jednej z nich, co daje w efekcie możliwość ich rozróżnienia pod mikroskopem świetlnym. Po przeprowadzonych badaniach zgłady metalograficzne traktuje się jak zabytki, z których zostały pobrane. Muszą być skatalogowane i dostępne w przyszłości do dalszych badań. W tym celu przechowuje się je w odpowiednich naczyniach, tzw. ekssikatorach, wypełnionych żelem krzemionkowym lub też chlorkiem wapnia, które mają za zadanie pochłaniać wilgoć i chronić preparaty przed korozją.

Do podstawowych badań archeometalograficznych należą także badania twardości składników strukturalnych zabytków metalowych, zarówno żelaznych, jak i wykonanych z metali kolorowych. Przeprowadza się je przy zastosowaniu odpowiednich urządzeń i metod, takich jak metoda Brinella, Rockwella czy Vickersa. Uzyskany wynik w przypadku tej ostatniej poprzedzony jest dużymi literami alfabetu HV (H – twardość, V – Vickers). Metoda ta ze względu na swoją uniwersalność jest stosowana szczególnie często w badaniach nad zabytkami archeologicznymi. Używa się w tym celu specjalnego twardościomierza, np. dla zabytków żelaznych, zwykle przy stałym obciążeniu 10kG. Urządzenie to wgniata w powierzchnię próbki specjalnie ukształtowany diament w postaci piramidki czworokątnej, o kącie wierzchołkowym między przeciwległymi ściankami, równym 136°. Twardość Vickersa mierzona jest stosunkiem siły działającej do powierzchni odcisku o następującym wzorze:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P\alpha}{d^2} \left[\frac{kG}{mm^2} \right]$$

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2} \left[\frac{kG}{mm^2} \right]$$

Gdzie:

P – obciążenie [kG]

F – powierzchnia odcisku [mm²]

d – przekątna odcisku [mm]

α – kąt rozwarcia

Nowoczesne twardościomierze oprócz części optyczno-mechanicznej, z konstrukcją wgłębnika do precyzyjnego ustalenia punktu pomiarowego, mają możliwość automatycznej transmisji wyników bezpośrednio do komputera.

Tego typu badania umożliwiają odpowiedź na pytania, czy struktury np. ostrza miecza, noża oraz innych wyrobów skrawających były dodatkowo utwardzane. Pozwalają też m.in. określić twardość żelaza fosforowego, bardzo często używanego wśród różnych wyrobów żelaznych z okresu rzymskiego. Ma to w tym przypadku niezmiernie istotne znaczenie, żelazo fosforowe ma bowiem podobną twardość jak stal średniowęgłowa. Należy w tym miejscu wskazać, że ważnym uzupełnieniem badań archeometalurgicznych są też inne, bardzo często stosowane badania (jako ich uzupełnienie), jak np. wspomniane analizy rentgenograficzne, defektoskopowe, a nawet traseologiczne.

W ramach prowadzonych badań nad starożytną metalurgią nie sposób pominąć bardzo ważnego etapu, jakim jest analiza wtrąceń niemetalicznych, zwykle w postaci zróżnicowanych żużli. Obserwacje w miejscach ich rozmieszczenia, a nawet ich kształty w badanych wyrobach, mogą być pomocne np. przy identyfikacji technologii wykonania zabytków. Poza tym analizy składu chemicznego mogą być także pomocne w kwestiach identyfikacji związanych z pochodzeniem surowca, np. dotyczących złóż rud darniowych, rud miedzi itp.

ARCHEOMETALURGIA W BADANIACH ZABYTKÓW ŻELAZNYCH

W cyklu rozwojowym społeczeństw pradziejowych metody starożytnego hutnictwa i technik kowalskich, tj. pozyskiwania surowca i wykonywania z niego przedmiotów, były stale ulepszone i rozwijane.

Można je rekonstruować m.in. wykorzystując badania metalograficzne. Wskazują one na daleko idące różnicowania technologii, np. przy wykonywaniu mieczy używanych przez świat celtycki i rzymski oraz ludy pozostające pod wpływem tych kultur.

Początki używania i rozpowszechniania żelaza datowane są rozmaicie w różnych częściach świata. Początek epoki żelaza określa na danym obszarze opanowanie dwóch podstawowych umiejętności. Pierwsza z nich to poznanie procesu wytopienia żelaza, a druga – jego kształtowanie poprzez obróbkę plastyczną (kucie). W starożytności na terenie Cesarstwa Rzymskiego, a także na obszarze europejskiego Barbaricum pozyskiwanie surowca żelaznego polegało na redukcji rozdrobnionej rudy żelaza zmieszanej z węglem drzewnym w procesie metalurgicznym prowadzonym w piecu dymarskim. Technika jego otrzymywania była związana z ówczesnym typem pieca. W Europie przyjmuje się, że były to różnego rodzaju piece do jednorazowego lub wielokrotnego użytku (Pliniusz, NH XXXIV, 144). Wytapianie przebiegało zawsze według tych samych zasad fizyko-chemicznych, bez względu na konstrukcję pieca (Radwan 1961: 779; Bielenin 1992: 79; 2002: 13). Ponieważ proces prowadzony był przy stosunkowo niskiej temperaturze, tj. znacznie poniżej 1530°C, a więc w temperaturze topnienia żelaza, w jego wyniku otrzymywano porowaty i niewielki kawałek metalu, silnie zanieczyszczony żużłami i daleko odbiegający od naszych współczesnych wyobrażeń o żelazie. W zależności od rodzaju użytej rudy oraz miejsca położenia wsadu do pieca dymarskiego w stosunku do otworów wlotowych powietrza, w pewnych jego fragmentach powstać mogło żelazo, w innych stal (nawęglone żelazo) lub surówka. Surówka to półprodukt powstały w wyniku redukcji rudy w piecu, który ma bardzo wysoką zawartość węgla i liczne zanieczyszczenia pochodzące z procesu hutniczego i jest bardzo kruchy. Otrzymana w ten sposób bryła metalu nagrzana do wysokiej temperatury dawała się stopniowo kształtować poprzez kucie na gorąco. W trakcie kucia półpłynne żużle wyciskane były z gąbczastej bryły żelaza, co poprawiało jej zwartość i umożliwiało uzyskanie własności wytrzymałościowych, niespotykanych wśród innych znanych dotąd metali, zwłaszcza miedzi oraz jej stopów (brązu i mosiądzu). W trakcie kucia zauważono, że mniejsze fragmenty metalu można łączyć ze sobą poprzez skuwanie (zgrzewanie ogniowe).

Innym zaobserwowanym zjawiskiem było utwardzanie uzyskanego metalu przez hartowanie, w wyniku najpierw rozgrzania, a następnie odpowiednio szybkiego studzenia. Ponieważ niekontrolowany proces wytapiania żelaza dawał w rezultacie metal o dużej niejednorodności chemicznej, przenosiła się ona również na wykonane z niego przedmioty. Zaskakującym zjawiskiem dla dawnych kowali było też zapewne to, że przedmioty wykonane z różnych wytopów lub różnych fragmentów jednego wytopu wykazywały odmienne własności. Jedne z nich były twarde, sprężyste, czasem kruche (stal), inne natomiast miękkie, ulegające łatwo odkształceniu (żelazo). Musiało to nieuchronnie doprowadzić do kolejnego kroku na drodze postępu technologicznego, którym stała się prawdopodobnie umiejętność wyróżniania w obrębie uzyskanego surowca żelaznego obszarów twardych i miękkich. Umiejętność ta pozwoliła na selekcję materiału w zależności od przeznaczenia wyrobów. Z obserwacji, iż duży stopień przekucia materiału prowadzi do poprawy jego własności, w sensie jednorodności chemicznej i zmniejszenia zanieczyszczenia żużlem, a także z umiejętności wstępnego oddzielania materiału twardego od miękkiego zrodzić się mogła nowa technologia wytwarzania polegająca na otrzymywaniu wyrobu końcowego poprzez łączenie (zgrzewanie ogniowe) wstępnie odkutych i ukształtowanych elementów, wykonanych z takich samych lub różnych materiałów, tj. żelaza i stali. Rozwój technologii wytwarzania przedmiotów z tych metali warunkowany był także umiejętnością zastosowania techniki zgrzewania ogniowego. Uzyskanie dobrych jakościowo zgrzein między łączonymi materiałami stawało się możliwe w miarę poznawania sposobów upłynniania zgorzeliny tworzącej się na powierzchni rozgrzanego żelaza. Dodawanie dostępnych powszechnie minerałów, jak np. piasku – SiO_2 , wchodzących w związki z tlenkami żelaza, prowadziło do powstawania płynnych żużli już przy temperaturze kucia, co ułatwiało ich wypływanie podczas zgrzewania. W zależności od zawartości węgla w łupce, temperatura kucia wahała się od 650°C do 1250°C, przy czym im większa jest jego zawartość, tym niższa jest temperatura kucia i gorsze upłynnianie żużla (por. Pleiner 2006: 53–54).

Ten podstawowy zasób doświadczeń zdobywanych stopniowo w starożytności pozwalał na otrzymywanie coraz to lepszych wyrobów z żelaza lub stali, których jakość znacznie przewyższała

dotychczas używane narzędzia i broń wykonane ze stopów miedzi, tj. brązu i mosiądzu oraz powodowała ich stopniowe zastępowanie. Przy badaniach starożytnych wyrobów z żelaza i stali zawsze pojawiają się pytania o surowiec. Jaka była mikrostruktura materiału wyjściowego, z którego wykonano dany przedmiot. Jaka była forma handlowa surowca i skąd mógł on pochodzić.

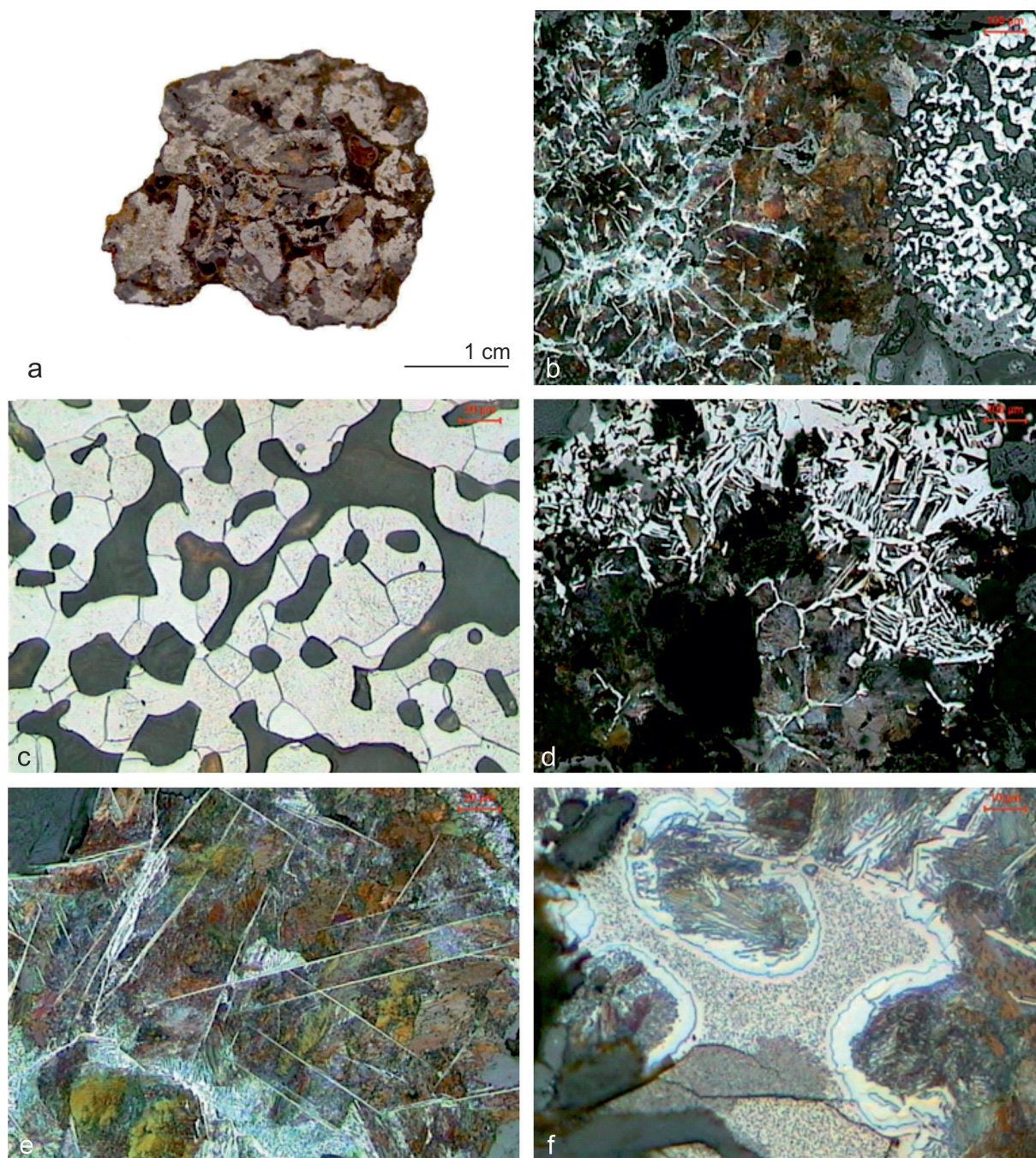
METALOGRAFICZNE BADANIA SUROWCOWE

Dobrym przykładem mogą być tutaj przeprowadzone m.in. porównawcze badania żelaznego surowca z okresu rzymskiego, w postaci grąpi (ryc. 1) (materiału odpadowego powstałego w wyniku przekuwania łupki dymarskiej, zawierającego fragmenty żelaza) znalezionych na terenie Polski oraz dwóch różnych surowców pochodzących z prowincji Cesarstwa Rzymskiego. Jeden z nich to żelazny płaskownik wydobyty z zatopionego rzymskiego statku handlowego w rejonie Saintes-Maries-de-la-Mer (Francja), u ujścia Rodanu do Morza Śródziemnego, a drugi to żelazne kęsisko z Risan (Czarnogóra), jedno z dwóch znalezionych na terenie dawnego rzymskiego emporium handlowego *Risinium*, leżącego nad Zatoką Kotorską (Biborski i Stępiński 2014).

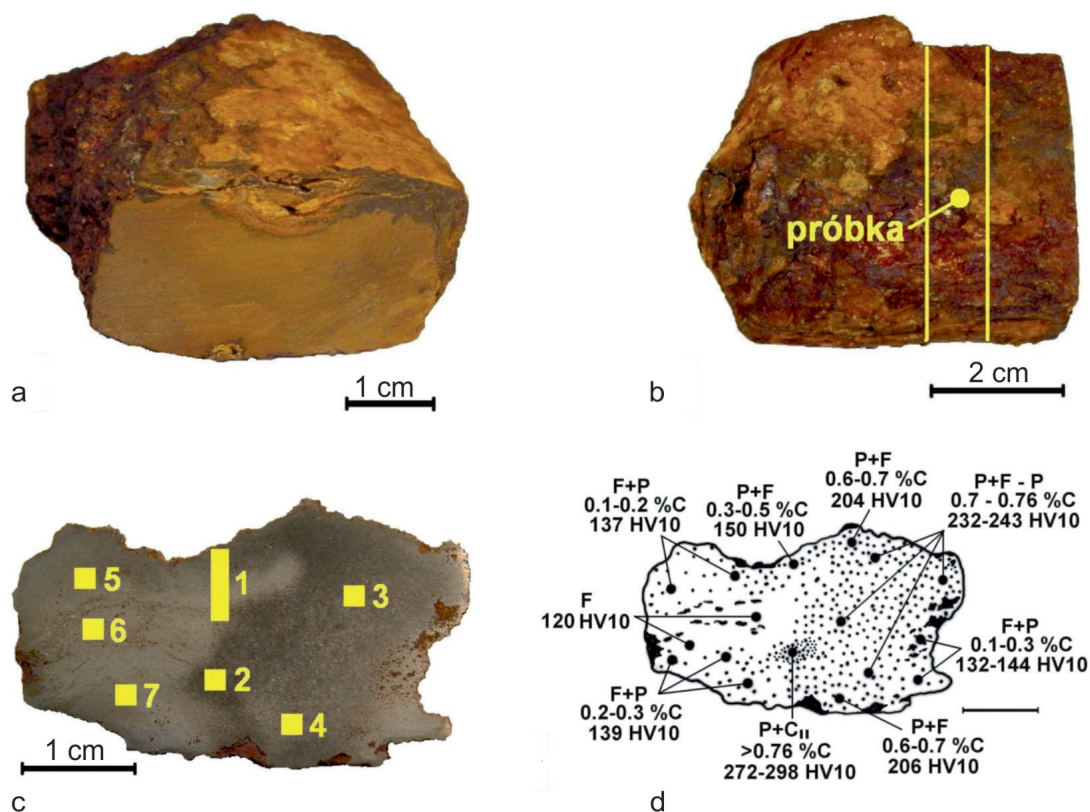
Z dotychczasowych badań metaloznawczych starożytnych wyrobów oraz przeprowadzonych wytopów doświadczalnych wiadomo, że w okresie rzymskim na terenie Europy otrzymywane w piecach dymarskich żelazo nie przechodziło przez stan ciekły, a jego nawęglenie było bardzo nierównomierne, występujące w zakresie od 0,1 do ok. 1,2% C, tj. od żelaza do stali nadeutektoidalnej (Radwan 1963: 46-80; Tylecote 1976: 53-58; Bielenin 1983: 158-159; 1992: 55-87; Pleiner 2000: 131-137 i 245-247; Kędzierski i Stępiński 2006: 192-193; Buchwald 2005: 63-69). Takie też nawęglenie występuje w badanym grąpiu ze stanowiska nr 9 na Łysej Górze (ryc. 1) oraz w płaskowniku z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer (ryc. 2, 4). Charakterystyka metalu dymarskiego byłaby jednak niepełna, gdybyśmy nie powiedzieli, że podczas procesu redukcyjnego w piecu dymarskim mogły też lokalnie tworzyć się obszary fazy ciekłej, które zwykle wysoko się nawęglają. Powstawaniu takich obszarów sprzyjał tworzący się w materiale

wsadowym do pieca dymarskiego fosforek żelaza, który stykając się z nowo powstającymi cząstkami żelaza, powodował ich topienie już przy temperaturze 1050°C (Stępiński 2012: 126-131). Dobrym przykładem takiego obszaru, wysoko nawęglonego, który wcześniej był ciekły w dymarce, jest badany grąp nr 2 ze stanowiska 9 na Łysej Górze. Trzeba też dodać, że w okresie rzymskim większość metalu otrzymywanego w procesie dymarskim była żelazem lub stalą, nisko nawęgloną w zakresie 0,1-0,3% C, które zawierały też często fosfor (Sim 1998: 2; Tylecote 1976: 56).

Z powyższych rozważań widać jednoznacznie, że na tym tle mikrostruktura żelaza z Risan wygląda zupełnie inaczej, mamy tu bowiem do czynienia z metalem wysokowęglowym, o równomierным rozmieszczeniu węgla, który przeszedł przez stan ciekły (ryc. 3, 5d). Wobec odmiennej mikrostruktury, zarówno kęsiska, jak i jego kształtu odbiegającego od znanych rzymskich półwyrobów (Buchwald 2005: 103; Pleiner 2006: 39-43) należy badane kęsisko z Risan uznać za surowiec importowany z terenów azjatyckich, najprawdopodobniej z Indii, gdzie wytwarzanie wysokowęglowej stali tygłowej, tzw. Wootzu oraz jej eksport na zachód było poświadczane już w starożytności (Belaiew 1918: 417, 435; Coghlan 1956: 156-161; Piaskowski 1974: 239-256 i 263-303; Wadsworth i Sherby 1980: 37-42; Prakash 1991: 361-364; Williams 2012: 24-31). Dodatkowo przemawia też za tym przypuszczeniem miejsce znalezienia obu kęsisk. Risan było bowiem emporium handlowym działającym na wybrzeżu Adriatyku od czasów hellenistycznych, aż po wczesne Bizancjum. Wydaje się więc bardzo prawdopodobne, że Rzymianie znali i sprowadzali stal wysokowęglową, w miarę równomierne nawęgloną, na teren cesarstwa. Trudno natomiast coś powiedzieć na temat jej wykorzystywania przez Rzymian, gdyż jak do tej pory nie natrafiono na jakiś egzemplarz miecza, czy też innego wyrobu z czasów rzymskich o takiej mikrostrukturze. Badany ostatnio przez E. Godfrey i M. van Nie wysokowęglowy przebijak z Heeten, z okresu późnorzymskiego, jest jednak wykonany z metalu otrzymanego w procesie dymarskim, jak twierdzą autorzy (Godfrey i Nie 2004: 1123-1124). Jedną z przyczyn, dla której metal wysokowęglowy nie był chętnie stosowany, był zapewne brak znajomości jego obróbki plastycznej w postaci kucia, przez kowali rzymskich. Metal wysokowęglowy wymagał



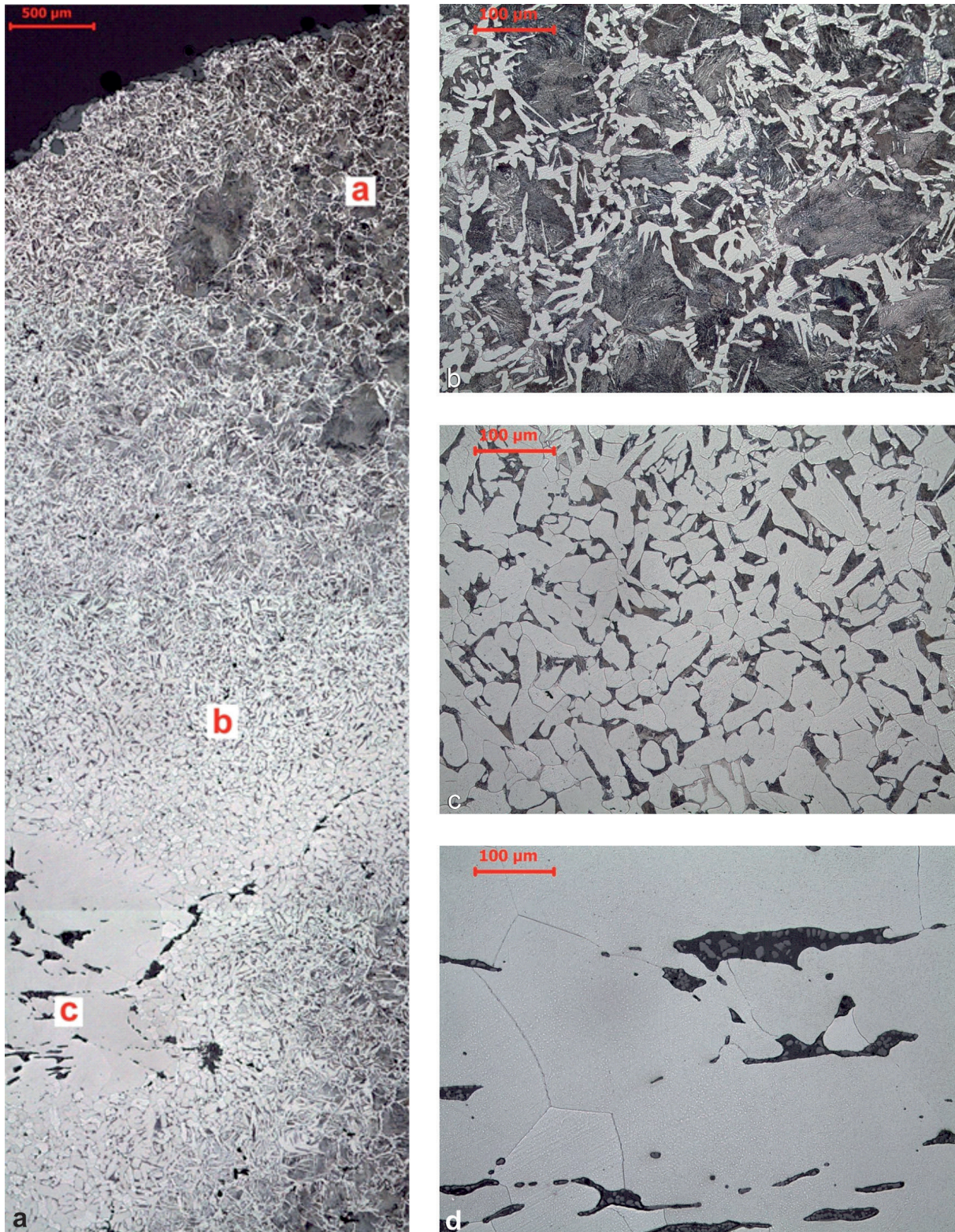
Ryc. 1. Mikrostruktura obserwowana w grąpiu ze stan. 9 na Łysej Górze: a – makroskopowy przekrój grąpia; b – obszar o dużym zróżnicowaniu zawartości węgla i mikrostruktury; c – skupisko wtrąceń żużla na tle ferrytu; d – zmiana mikrostruktury od ferrytyczno-perlitycznej do perlitycznej z siatką ferrytu; e – wydzielenia cementytu w postaci igieł i siatki na tle perlitu; f – obszar o wysokim nawęgleniu z wydzieleniami eutektyki potrójnej. Fot. J. Stępiński



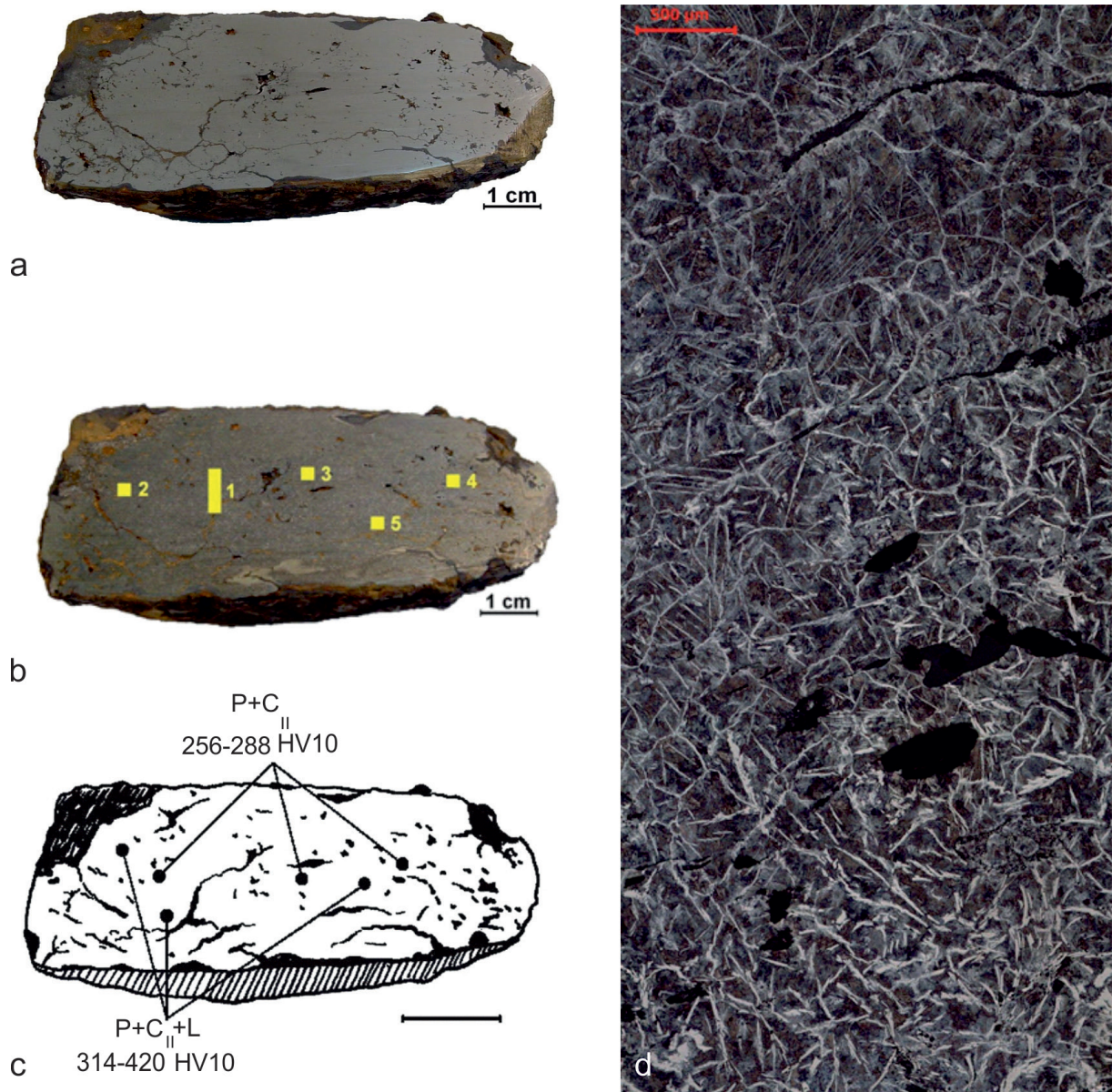
Ryc. 2. Żelazny płaskownik pochodzący z Saintes-Maries-de-la-Mer, a – wygląd badanego kawałka płaskownika; b – miejsce pobrania próbki; c – makroskopowy obraz przekroju poprzecznego próbki wraz z miejscami obserwacji mikroskopowej 1–7; d – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych na próbce oraz wyniki pomiarów twardości HV10 (F – ferryt, p – perlit, C_{II} – cementyt drugorzędowy, a kropki wskazują obecność węgla). Fot. J. Stępiński



Ryc. 3. Żelazne kęsisko płaskie z Risan, a – kształt kęsiska; b – miejsce pobrania próbki. Fot. J. Stępiński



Ryc. 4. Zróżnicowanie mikrostruktury na przekroju rzymskiego płaskownika z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer: a – zmiana mikrostruktury od powierzchni do środka płaskownika w miejscu 1 (ryc. 2c), a, b oraz c – obszary wykonania zdjęć mikrostruktury; b – mikrostruktura perlityczna z wydzieleniami ferrytu w postaci siatki i iglastej struktury Widmanstättena w obszarze „a” na ryc. 4a; c – mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna w obszarze „b” na ryc. 4a; d – ferryt oraz wtrącenia żuźla w obszarze „c” na ryc. 4a. Fot. J. Stępiński



Ryc. 5. Przekrój żelaznego kęsiska z Risan: a – obraz przekroju poprzecznego próbki, nie trawiony; b – trawiony obraz przekroju poprzecznego próbki wraz z miejscami obserwacji mikroskopowej 1–5; c – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych na próbce oraz wyniki pomiarów twardości (HV10) (P – perlit, CII – cementyt drugorzędowy, L – ledeburyt); d – mikrostruktura składająca się z perlitu, cementytu drugorzędowego w postaci siatki i igieł, niewielkich ilości ledeburytu oraz licznych wtrąceń żużla w miejscu 1 na ryc. 5b. Fot. J. Stępiński

bowiem nagrzewania do niższych temperatur kucia (poniżej 850°C) niż temperatury, przy których kuto zazwyczaj żelazo i stal niżej węglową (920-950°C) (Piaskowski 1974: 58-59; Williams 2012: 25).

Przedstawione wyniki badań mikroskopowych pokazują wyraźnie, że mikrostruktury grąpi oraz płaskownika z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer reprezentują ten sam typ metalu, niezależnie od miejsca, gdzie został on otrzymany w procesie dymarskim. Natomiast metal żelaznego kęsiska z Risan jest stałą wysokowęglową otrzymaną w stanie ciekłym, w tyglu, która została dostarczona na teren Cesarstwa Rzymskiego.

METALOGRAFICZNE BADANIA NAD TECHNOLOGIĄ NA PRZYKŁADZIE SZCZERBCA

Jeszcze innym przykładem przydatności archeometalurgii w celach identyfikacyjnych były badania przeprowadzone m.in. nad Szcerbcem (ryc. 6 i 7) – koronacyjnym mieczem królów polskich (Biborski i in. 2009; 2011; 2013). W tym przypadku podstawowym celem analizy było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy struktura metalu i technika wykonania miecza odpowiadają m.in. jego chronologii. Były bowiem takie sugestie, czy aby nasz miecz nie jest kopią z XVII w., sporządzoną na wniosek króla Jana Sobieskiego dla swojego syna. Zatem założono przeprowadzenie badań mających na celu określenie technologii wykonania głowni, przy wykorzystaniu badań metalograficznych, ale także rentgenograficznych i defektoskopowych, przy równoczesnym określeniu składu chemicznego metalu użytego do wykonania głowni (Biborski i in. 2009). Należy przy tym wspomnieć, że dodatkowo przeprowadzono również (pominięte w tym opracowaniu) badania traseologiczno-porównawcze głowni i rękojeści, w celu uzyskania informacji o skali ich zużycia oraz ustalenia, czy poszczególne elementy rękojeści pod względem stylistycznym wykonano w tym samym warsztacie, czy tą samą ręką i czy występujące na nich zniszczenia pochodzą z tego samego okresu. Ponadto celem badań nad mieczem było określenie składu chemicznego metalu użytego do wykonania rękojeści i doprecyzowanie dotychczasowej chronologii Szcerbca i jego

pochodzenia oraz ostateczne określenie typu badanego miecza.

Ze względu na stan i rangę zabytku nie było żadnych możliwości pobrania próbek metalograficznych z głowni miecza. Zatem koniecznym stało się wybranie do badań przynajmniej dwóch obszarów, oznaczonych dużymi literami alfabetu (ryc. 8). Obszar A położony był w odległości ok. 4 cm od jelca, natomiast obszar B w odległości ok. 14 cm od jelca. Do obserwacji mikroskopowych powierzchnia głowni w badanych miejscach A i B została dokładnie wypolerowana przy użyciu past diamentowych, w podobny sposób jak to się robi w przypadku zgładów metalograficznych przy użyciu specjalnego przyrządu do ręcznego polerowania (ryc. 9). Następnie w celu ujawnienia mikrostruktury, została wytrawiona za pomocą 4% „Nitalu”. Obserwacje mikrostruktury głowni Szcerbca zostały przeprowadzone przy użyciu mikroskopu optycznego Leica – DMLM, w okolicach zastawy, na wytrawionym obszarze.

Obserwacje mikrostruktury w obszarze A

Mikrostruktura, która dominowała w obszarze A, odpowiadała materiałowi wyjściowemu, z którego wykonano głownię, tj. stali półtwardej o zawartości węgla ok. 0,3-0,5% (ryc. 10). Lokalnie zmieniała się ona jednak od ferrytyczno-perlitycznej, odpowiadającej stali miękkiej o zawartości węgla ok. 0,1-0,2%, do perlityczno-ferrytycznej, odpowiadającej stali twardej o zawartości węgla mieszczącej się w granicach 0,5-0,7%. W obszarach ferrytyczno-perlitycznych występowały też pasma ferrytu o zróżnicowanej wielkości ziarna, zapewne wzbogacone w fosfor, oraz liczne wydłużone wtrącenia żużla. W mikrostrukturze obszaru A nie wykryto śladów obróbki cieplnej.

Obserwacje mikrostruktury w miejscu B

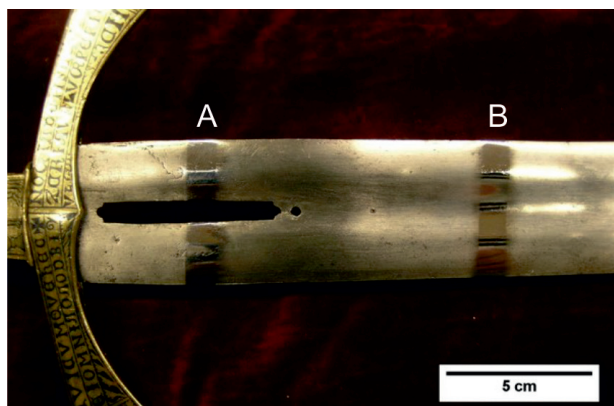
Mikrostruktura występująca w obszarze B wykazała istnienie martenzytu odpuszczonego i ujawniła, że dalsza część głowni miecza została poddana zabiegowi obróbki cieplnej, tj. hartowaniu, a następnie jej odpuszczaniu (ryc. 11). Podobnie jak w obszarze A tu również wystąpiły liczne zróżnicowane wtrącenia żużla (ryc. 12).



Ryc. 6. Szczerebiec – miecz koronacyjny królów polskich. Zamek Królewski na Wawelu. Fot. archiwum Zamku Królewskiego na Wawelu



Ryc. 7. Rękojeść Szczerebca. Fot. M.R. Biborski



Ryc. 8. Szczerebiec – głównia z zaznaczonymi miejscami badań (A, B). Fot. M.R. Biborski



Ryc. 9. Zestaw do ręcznego polerowania złądów metalograficznych. Fot. M.R. Biborski



Ryc. 10. Mikrostruktura Szczerbca w obszarze A z zawartością węgla 0,3-0,5%. Mikrostruktura składa się z perlitu (ciemna faza) i ferrytu (faza jasna). Fot. J. Stępiński



Ryc. 11. Obszar B z obszarem martenzytu odpuszczonego, które doznało obróbki cieplnej. Fot. J. Stępiński



Ryc. 12. Obszar B z widocznymi wtrąceniami żużla w martenzycie. Fot. J. Stępiński

Omówienie badań mikrostruktury głowni

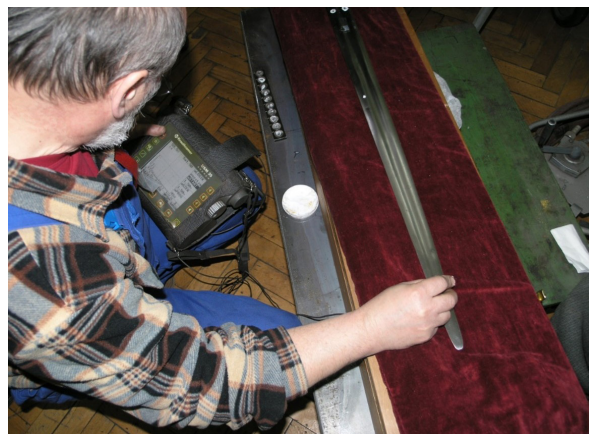
Z obserwacji mikrostruktury w obszarze A wynika, że materiał do wykucia głowni stanowiła nierównomiernie nawęglona stal półtwarda, pochodzenia dymarskiego, zawierająca dość liczne wtrącenia żużla, charakterystyczne dla ówczesnego sposobu otrzymywania żelaza.

Interesujących danych dostarczyła natomiast mikrostruktura występująca w obszarze B. Świadczy ona o tym, że surowa, wykuta ze stali dymarskiej głownia, poddana została zabiegowi obróbki cieplnej w celu utwardzenia jej powierzchni. Proces ten polegał zwykle na zanurzeniu wcześniej rozgrzanej do temperatury czerwonego żaru (dla materiału o tym stopniu nawęglenia ok. 830°C) (Pleiner 2006: 67-69; Tylecote i Gilmour 1986: 17-18; Wesołowski 1974: 269-311) głowni w hartowniczym ośrodku chłodzącym (najczęściej woda lub olej), a następnie szybkim jej wyjęciu. Dzięki temu ciepło zawarte jeszcze w rdzeniu głowni pozwalało odpuścić gwałtownie schłodzoną, a zatem zahartowaną powierzchnię. Uzyskano w ten sposób strukturę martenzytu odpuszczonego, która jest mniej twarda od struktury czysto martenzytycznej, ale za to bardziej odporna na pęknięcia i wykruszenia.

Z porównania mikrostruktur badanych w obszarach A oraz B miecza wynika jeszcze jedna ważna informacja. Wskazuje ona, że jedynie część głowni, poniżej zastawy, została obrobiona cieplnie. Nie można wykluczyć, że kowal świadomie zastosował taki sposób obróbki cieplnej, aby nie narażać miecza na ewentualne pęknięcia hartownicze w rejonie rękojeści. Takie pęknięcia, a nawet odłamania trzpień do rękojeści, obserwujemy m.in. wśród mieczy ze stanowiska bagienne w Illerup (Biborski i Ilkjaer 2006b: 118-119). Trzeba zatem stwierdzić, że sposób wykonania miecza świadczy niewątpliwie o wysokich umiejętnościach i wiedzy warsztatowej jego wykonawcy. Miecz wykazuje bowiem bardzo dobre własności użytkowe, a jego głownia nosi znamiona broni o charakterze bojowym.

Badania rentgenograficzne

Przeprowadzono także badania rentgenograficzne głowni Szczerbca. W ich wyniku uzyskano obraz

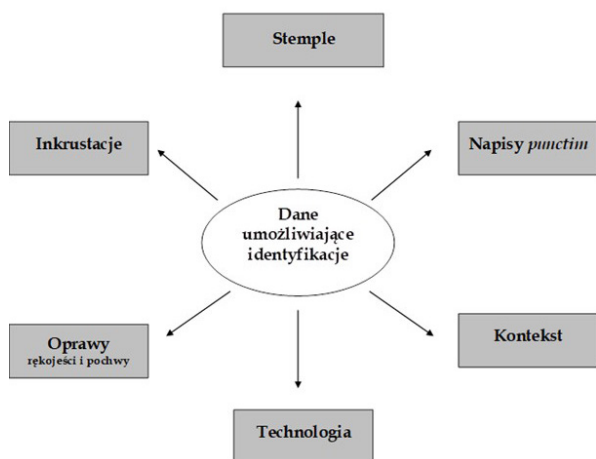


Ryc. 13. Badanie głowni Szczerbca grubościomierzem. Fot. M.R. Biborski

w miarę o jednakowym kontraście, stwierdzając przy tym istnienie niewielkich punktowych wad powierzchniowych, spowodowanych korozją metalu. Korespondują one z występującymi na powierzchni skazami spowodowanymi lokalnymi obszarami nieciągłości materiału, które charakterystyczne są dla surowca otrzymywanego na drodze procesu dymarskiego. Są one bardzo płytkie i nie wpływają też w zasadniczy sposób na jakość wyrobu.

Badania defektoskopowe

Z powodu niemożności wykonania zglądu poprzecznego głowni przeprowadzone badania defektoskopowe miały na celu uzyskanie ewentualnej informacji o sposobie wykucia głowni z jednego, bądź więcej kawałków metalu. Wykonano najpierw badania grubościomierzem typu Krautkammer DME DL, z głowicą dwuprzetwornikową 4MHz (ryc. 13). Uzyskano wskazania świadczące o braku spójności materiałowej mniej więcej w połowie grubości głowni. Wynik ten może dawać podstawy do przypuszczeń, że głownia została wykonana z materiału rozkutego na płasko, a następnie złożonego w postaci dwóch płatów skutyk ze sobą. Natomiast w badaniu defektoskopem ultradźwiękowym typu USM, z głowicą 15MHz, z linią opóźniającą, nie stwierdzono braku spójności. Prawdopodobnie może to świadczyć o bardzo dobrym zgrzaniu obu płatów, bez wyraźnej zgrzeiny.



Ryc. 14. Schemat danych umożliwiających identyfikację mieczy rzymskich. M.R.Biborski

Badania składu chemicznego

Badania składu chemicznego przeprowadzono przede wszystkim pod kątem określenia zawartości innych pierwiastków niż żelazo. Analizę składu chemicznego głowni przeprowadzono spektrometrem iskrowym FUNDRI-MASTERS w okolicach sztychu. Z analizy chemicznej miecza wynika, że głownia miecza wykonana została ze stali dymarskiej o podwyższonej zawartości fosforu – 0,092%. Stwierdzono również podwyższoną zawartość krzemu w analizie, w ilości 0,153%, co wiąże się zapewne z występującymi, licznymi wtrąceniami żużla w metalu. Natomiast zawartości pozostałych analizowanych pierwiastków występują w ilościach spotykanych w analizach innych wyrobów wykonanych z metalu dymarskiego, a pochodzących z tego samego okresu co Szczerbiec.

Konkluzja

Nie ma wątpliwości, że opierając się na przeprowadzonych badaniach archeometalurgicznych, należy przyjąć, że głownia Szczerbca wykonana została według wszelkich zasad wytwarzania mieczy bojowych z XIII i XIV w. Natomiast materiał do wykucia głowni stanowiła nierównomiernie nawęglona stal półtwarda, pochodzenia dymarskiego, zawierająca dość liczne wtrącenia żużla, charakterystyczne dla ówczesnego sposobu otrzymywania żelaza. Zatem jest pewne, że badana broń jest

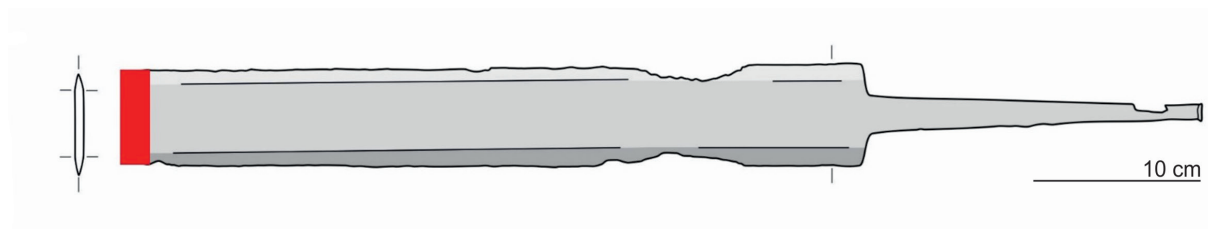
tym oryginalnym mieczem, którym począwszy od Władysława Łokietka dokonywano ceremonii koronacji kolejnych władców Polski.

BADANIA ARCHEOMETALOGRAFICZNE NAD IDENTYFIKACJĄ MIECZY Z OKRESU WPŁYWÓW RZYMSKICH

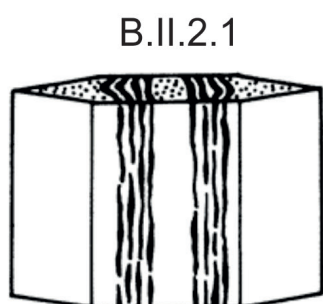
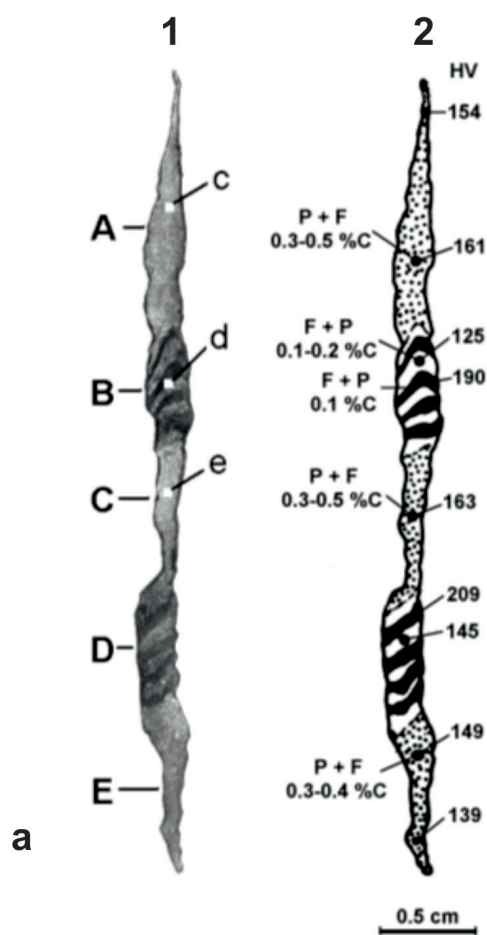
W badaniach archeologicznych do ważniejszych zagadnień należą kwestie związane z identyfikacją rzymskich mieczy używanych w okresie od I-V w. po Chr. W tym zakresie mamy kilka możliwości. Przyjmuje się, że zdecydowana większość mieczy znaleziona w granicach państwa rzymskiego, to rzeczywiście oryginalna broń rzymska. Ale oprócz miejsca znalezienia za ich rzymską proveniencją przemawiają przede wszystkim takie cechy, jak odciski na ich głowniach lub trzpieniach imienne stemple warsztatowe, inkrustacje z przedstawieniami bóstw rzymskich lub też znaki symboliczne związane z wojskiem i wojną (Biborski 1994a; 1994b; 2017). W niektórych przypadkach dodatkową wskazówką może być też morfologia wykutej głowni oraz towarzyszące jej niekiedy zachowane elementy pochew i rękojeści. Natomiast z braku wyżej wymienionych cech pozostaje jeszcze jedna możliwość dokonania identyfikacji ośrodka produkcji, tj. na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych głowni (ryc. 14). Pozwalają nam one odróżnić zaawansowane technologicznie egzemplarze rzymskie, m.in. dziwerowane (ang. *pattern welded*) lub wykute ze stali w miarę równomiernie nawęglonej, która nadawała się do obróbki cieplnej (hartowania), od ich barbarzyńskich derywatów. Te ostatnie były wykonywanych zwykle najprostszymi technikami kowalskimi, często z gorszej jakości surowców, przede wszystkim z żelaza fosforowego lub bardzo słabo i nierównomiernie nawęglonej stali (por. m.in. Biborski i in. 1982; Biborski i Kaczanowski 1989).

Dobrym przykładem metody identyfikacji mogą być przeprowadzone badania archeometalograficzne uszkodzonego miecza z cmentarzyska kultury przeworskiej z Oblina, z grobu 62 (Biborski i in. 2007: 141-143) (ryc. 15).

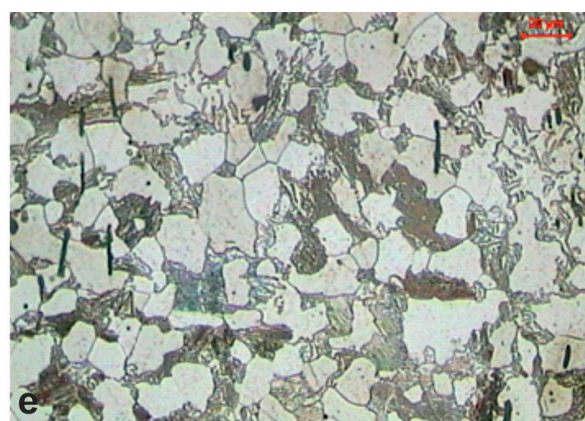
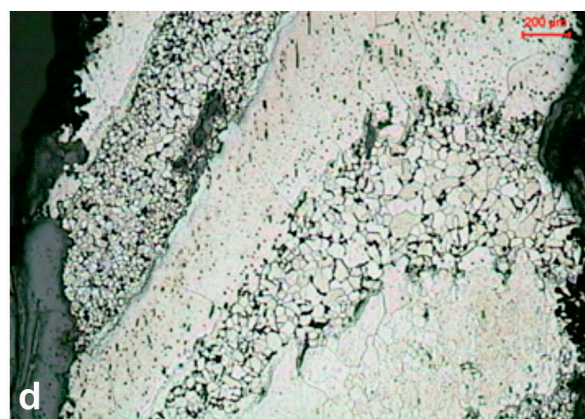
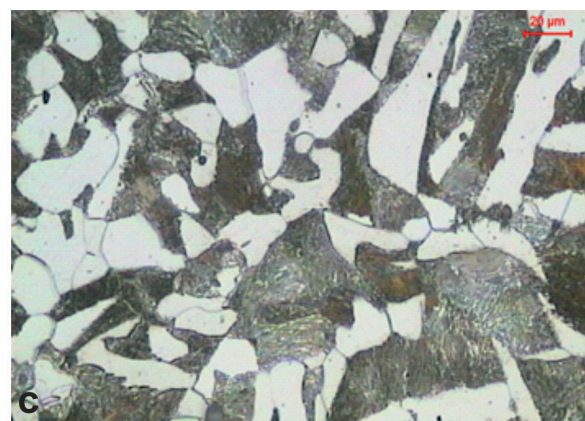
Dzięki odłamanej części głowni można było pobrać próbkę obejmującą cały jej przekrój. Następnie



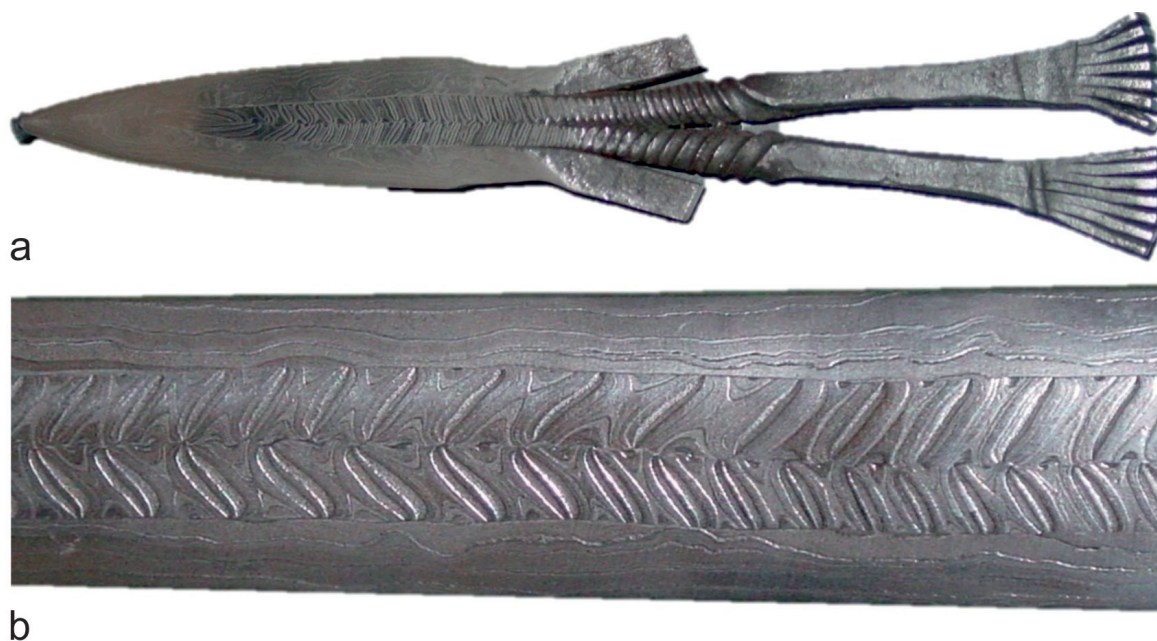
Ryc. 15. Miecz z Oblina, woj. mazowieckie, grób 62. Rys. M.J. Biborski



b



Ryc. 16. Makroskopowy obraz przekroju poprzecznego głowni: c-e miejsca obserwacji mikroskopowych; a:2 – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych i pomiarów twardości na przekroju głowni, (F – ferryt, P – perlit, A i E – ostrza, B i D – pasma dziwery oraz C – kawałek rozdzielający dziwery); b – profil i technologia miecza; c – mikrostruktura w ostrzu miecza (A), ciemny perlit z jasnym ferrytem; d – mikrostruktura w rdzeniu głowni, pasmo dziwery (B), jasne warstewki ferrytu fosforowego rozdzielone ciemniejszymi warstewkami stali miękkiej; e – mikrostruktura w rdzeniu głowni, kawałek (C), perlit częściowo zdegenerowany oraz ferryt. Fot. i rys. J. Stępiński



Ryc. 17. a – rekonstrukcja poszczególnych faz powstawania dziweru na przykładzie kopii miecza z Nydam (DK); b – kopia głowni miecza dziwerowanego z Nydam (DK) wytrawionego kwasem). Fot. M.R. Biborski

po odpowiednio przygotowanym zgładzie przystąpiono do obserwacji metalograficznych pod mikroskopem świetlnym. W próbce wyróżniono pięć zróżnicowanych obszarów: A i E – to 2 ostrza, B i D – pasma dziweru oraz obszar metalu usytuowany pomiędzy nimi – C. Zachowana powierzchnia głowni jest w znacznym stopniu uszkodzona przez korozję, ale mimo to udało się uwidocznić jej pierwotną, wykutą strukturę.

W przypadku kompletnie zachowanej głowni próbkę zwykle pozyskuje się poprzez trójkątne, prostopadłe do osi wycięcie, o powierzchni ok. 1 cm², dochodzące do osi miecza, które następnie zostaje uzupełnione odpowiednim materiałem.

Mikrostruktura

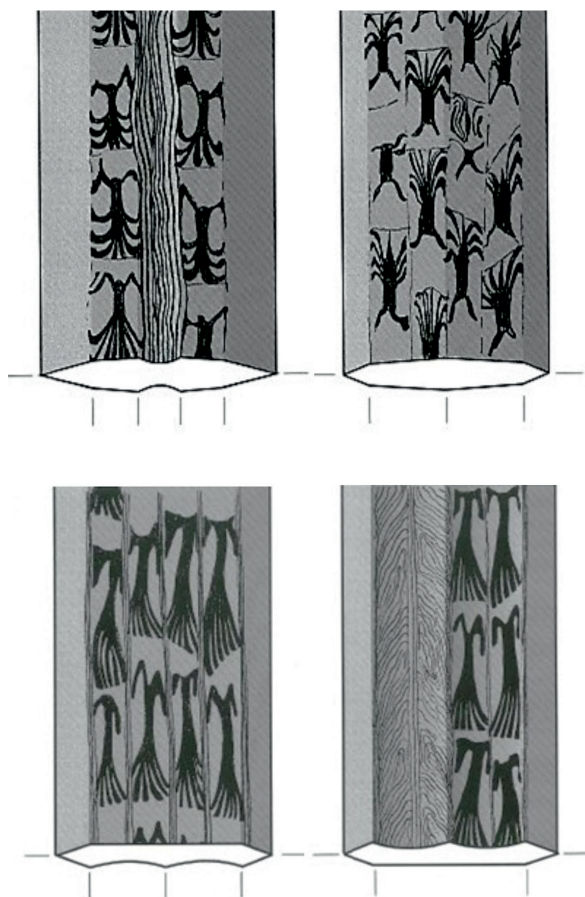
W obszarach ostrzy miecza (A i E) występuje struktura perlityczno-ferrytyczna odpowiadająca stali półtwardej, o zawartości węgla 0,3-0,5% (ryc. 16a:1). Pasma dziweru (B i D) wykonane są z czterech warstewek stali z fosforem oraz pięciu warstewek stali miękkiej ferrytyczno-perlitycznej, o zawartości węgla ok. 0,2%, umieszczonych przemienne względem siebie i tworzących pewnego rodzaju pakiet. Obszar kawałka metalu (C), rozdzielający pakiety dziweru

(B i D), wykonany został ze stali półtwardej, o strukturze perlityczno-ferrytycznej (o zawartości węgla 0,3-0,5%), takiej samej jak oba ostrza (ryc. 16a:1, 16d). W metalu potwierdzono obecność manganu w ilości 0,020% i fosforu 0,105%.

W metalu użytym do wykonania miecza występują także liczne jedno- i wielofazowe wtrącenia żużla, zróżnicowane pod względem wielkości i kształtu. W ostrzach miecza (A i E) oraz kawałku (C) wtrącenia żużla zawierają głównie takie pierwiastki, jak: Fe, Si, Mn, Ca, K oraz ślady Al. Natomiast w dziwerowanych pakietach (B i D), zależnie od miejsca analizy, wtrącenia żużla zawierają: Fe, Si, Mn, Ca, K i Al w warstewkach stalowych oraz Fe, Ca, P, Si, i Al w warstewkach stalowych z fosforem.

Twardość

Mierzona w poszczególnych obszarach głowni twardość przedstawia się następująco: ostrze (A) – 154-161 HV; pasmo dziweru (B) – warstewki stalowe z fosforem 190 HV; warstewki stalowe – 125 HV; obszar stalowy (C) – 163 HV; pasmo dziweru (D) – warstewki stalowe z fosforem – 209 HV; warstewki stalowe – 145 HV oraz ostrze (E) – 139-149 HV (ryc. 16a:2).



Ryc. 18. Przykłady dziwierowania na mieczach z Illerup (DK). Rys. U. Socha

Konkluzja

Miecz wykonany został z pięciu odpowiednio przygotowanych kawałków różnego materiału (A-E), wzajemnie zgrzanych, w procesie kucia na gorąco. I tak do dwóch ostrzy (A i E) doku- to rdzeń składający się z 2 pakietów dziwierowa- nych (B i D), rozdzielonych jednym kawałkiem stalowym (C). W efekcie zarówno na powierzch- ni płazów miecza, jak i jego przekroju powstał widoczny wzór zgrzewny, tzw. dziwer (*pattern- welded*) często niesłusznie nazywany damasceń- skim. W klasyfikacji technologicznej mieczy zo- stał zaliczony do typu B.II.1 (Biborski i Ilkjaer 2006: 165-166).

Materiał użyty do warstw dziweru był dobie- rany świadomie, tj. zwykle w postaci na prze- mian ułożonych sztab, wykutych ze stali fosfo- rowej lub żelaza fosforowego oraz stali mięk- kiej. Warstwy dziweru były rozdzielone stalą lub

żelazem i znajdowały się zawsze w części środko- wej głowni, do której później dokuwano zaharto- wane ostrza (ryc. 17a). W zależności od sposobu wykonania dziweru, tj. przez zgrzanie kilku lub więcej warstw, a następnie po ich rozcięciu i skrę- ceniu, uzyskiwano na powierzchni głowni zróż- nicowany wzór (Piaskowski 1965; 1970; 1974). Prawdopodobnie, aby był on lepiej widoczny, po wypolerowaniu głowni powierzchnie mogły być trawione roztworami o kwaśnym odczynie (np. kwasami organicznymi, jak kwas cytrynowy lub winny) (ryc. 17b). Najczęściej spotykanym wzor- em jest wzór pasmowy, jaki występuje na mie- czu z Oblina, oraz kątowy. Ponadto reprezentowa- ne są wzory tzw. perełkowe, rombowe, palmeto- we, komórkowe występujące niekiedy w różnych kombinacjach ze sobą (ryc. 18). W technice dzi- werowania, wzór na głowni był elementem waż- nym dla posiadacza broni, ale drugorzędny. Nasuwa się zatem pytanie, jaką rolę odgrywał dzi- wer w produkcji broni białej? Odpowiedź wydaje się bardzo prosta: głownie wzorzyste, a zwłaszcza te o najbardziej skomplikowanych wzorach, dają wspaniały efekt wizualny. Natomiast już pakieto- wanie i technika prętowa, ale przede wszystkim dziwer, powodowały, że w trakcie walki fala ude- rzeniowa, poprzez zjawisko interferencji powsta- łej w wyniku zróżnicowanej budowy głowni, była znacznie osłabiana, a nawet niekiedy w całości ni- welowana. To dawało znaczny komfort w utrzy- maniu miecza w bezpośrednim starciu z nacie- rającym przeciwnikiem. Ponadto kompozytowa budowa poprawiała własności techniczne w po- staci uelastycznienia głowni i mniejszą podatność na jej pękanie czy nawet złamanie hartowanych ostrzy (Biborski 2018: 83).

Wśród mieczy występują egzemplarze z dzi- werem na wskroś, w związku z czym wzór „da- masceński” widoczny jest zawsze po obu stro- nach głowni. Znane są też miecze stalowe, ale z dokutymi wkładkami dziwierowanymi, wystę- pującymi nie tylko na jednej, ale czasem na dwu stronach głowni. Ten skomplikowany sposób wy- konania wymaga odpowiedniej wiedzy i na wy- sokim poziomie postawionego i zorganizowa- nego warsztatu kowalskiego. Z tego też względu tak wykuwane miecze jak z Oblina zalicza się do wyrobów pochodzących z prowincji Cesarstwa Rzymskiego.

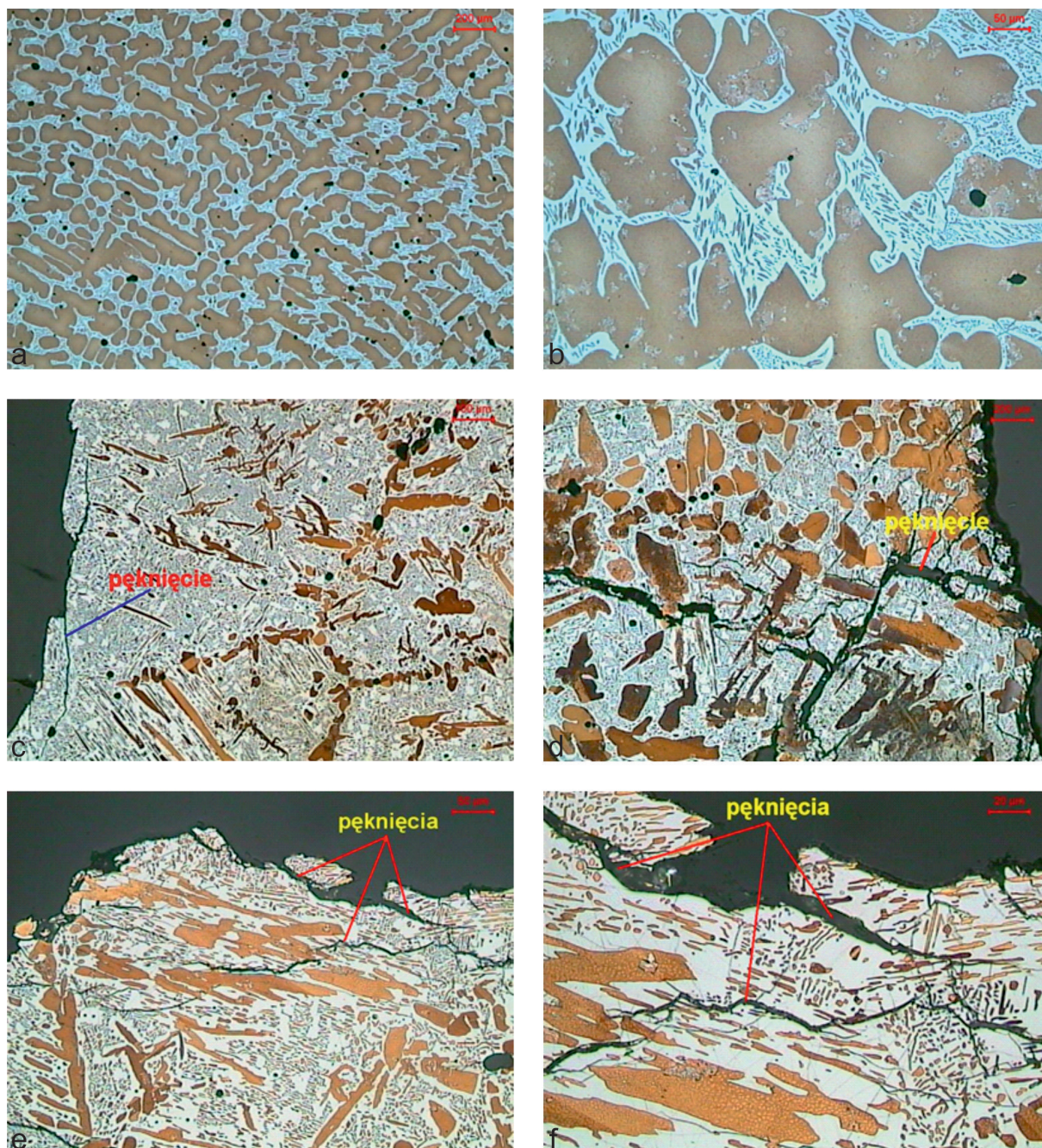


Ryc. 19. Dzwon Zygmunt. Katedra Wawelska w Krakowie.
Fot. M.J. Biborski

KONSERWATORSKIE BADANIA METALOGRAFICZNE DZWONU ZYGMUNT

Kolejnym przykładem badań archeometalograficznych, tym razem próbek z metalu kolorowego, są przeprowadzone analizy dzwonu Zygmunt na Wawelu (ryc. 19). Odlany z brązu przez ludwisarza Hansa Behema z Norymbergii w 1520 roku w Krakowie dzwon Zygmunt zamilkł pod koniec 2000 roku na ponad 3 miesiące, gdy pękło jego stalowe serce. Kilkakrotne wcześniejsze udary spowodowały, że po licznych konsultacjach i przeprowadzonych badaniach zdecydowano się na wykonanie repliki starego serca, które obecnie pracuje już od 20 lat. Stare serce spoczęło natomiast u podnóża wieży zygmuntońskiej.

Korzystając z nadarzającej się okazji, że dzwon został pozbawiony serca i nie mógł dzwonić, badaniom poddano także ważący prawie 10 ton sam kielich dzwonu. Ich celem było m.in. stwierdzenie, na ile metal w trakcie kilkusetletniego dzwonienia podlegał nie tylko procesom korozji powierzchniowej, skutkującej wytworzeniem się warstwy zielonkawej, szlachetnej patyny, ale – co znacznie ważniejsze – czy nie wykazuje on śladów korozji wewnętrznej, tzw. międzykrystalicznej. Ponadto zaplanowano wykonanie analiz składu chemicznego metalu, które miały także dać odpowiedź, czy w stopie znajdują się domieszki metali szlachetnych takich jak złoto i srebro. Zostały więc pobrane próbki z dwóch dostępnych miejsc dzwonu. Jedna z samej góry, tj. z korony, a druga z dolnej krawędzi, tj. z tzw. pierścienia odsercowego (Biborski 2021: 58-59). Mechanicznie wykonane zglądy zostały poddane obserwacjom metalograficznym pod mikroskopem świetlnym. Wykazały one, że dzwon został odlany z brązu jednostopowego tj. stopu miedzi i cyny (Cu-Sn), przy czym rozkład tych metali nie we wszystkich miejscach jest równomierny (Biborski i in. 2002: 255; Biborski 2021: 97). Obraz próbki z korony wykazuje ok. 19% cyny (faza jasna eutektoid $\alpha + \delta$) i 81% miedzi (faza ciemna α – bogata w miedź) (ryc. 20a-b). Znacznie więcej cyny zaobserwowano w próbce z dolnej części dzwonu, w eutektoidzie ($\alpha + \delta$), zwłaszcza tuż przy jego dolnej krawędzi nawet ponad 30%. Ta znacząca różnica wynika ze zjawiska tzw. likwacji, występującej podczas procesu stygnięcia odlewu. Zjawisko to, zwane też segregacją, wynika z różnicy temperatur krzepnięcia poszczególnych składników stopu, w tym przypadku brązu, w którym szybciej krzepnie miedź o wyższej temperaturze topnienia, a jeszcze płynna cyna, o niższej temperaturze topnienia, siłą grawitacji płynie ku dołowi. Zwiększona ilość cyny powoduje większą twardość stopu, ale też większą jego kruchość (ryc. 20c-f). W efekcie pierwotny ostry kształt krawędzi nowego dzwonu przy zwiększonej kruchości metalu spowodował, że pod wpływem drgań powstałych podczas dzwonienia, nastąpiły bardzo dobrze widoczne, drobne pęknięcia i wykruszenia metalu na całym obwodzie kielicha. Należy pamiętać, że proces wykruszania się krawędzi na skutek silnych drgań będzie samoistnie postępował, aż do momentu jej wyoblenia i może postępować przez kolejne setki lat. Jednak nie mają



Ryc. 20. Mikrostruktury Dzwonu Zygmunt: a-b mikrostruktura dzwonu przy koronie a – faza jasna ($\alpha + \delta$), bogata w cynę; b – faza ciemna (δ), bogata w miedź; c-f mikrostruktura przy powierzchni próbki pobranej z wieńca Dzwonu Zygmunta, z widocznymi pęknięciami. Pęknięcia powstają i rozprzestrzeniają się w fazie jasnej tj. eutektoidzie ($\alpha + \delta$), faza ta jest bardzo twarda i krucha (zawiera dużo cyny). Fot. J. Stępiński

one przy tak wielkiej masie dzwonu żadnego istotnego wpływu na jego stan i dźwięk. Podobne zjawisko występuje także w przypadku innych dzwonów (ryc. 21). Natomiast po wykonanych badaniach archeometalograficznych w strukturze metalu, poza widocznymi i nielicznymi czarnymi wtrąceniami

niemetalicznymi, które nie mają wpływu na ogólny stan metalu, nie zaobserwowano korozji, zwłaszcza wspomnianej wyżej międzykrystalicznej, co daje nam pewność, że Zygmunt w dalszym ciągu jest w bardzo dobrej kondycji i będzie grał swoim pięknym basem w tonacji Fis, w oktawie wielkiej.



Ryc. 21. Wykruszenia na krawędzi kielicha dzwonu Zygmunta. Fot. M.J. Biborski

Bardzo dokładna analiza składu chemicznego, przeprowadzona w spektrometrze fluorescencyjnym typu MIDEX wykazała także niewielką obecność w stopie metalu takich pierwiastków śladowych, jak m.in. arsen, antymon, ołów, fosfor i cynk. Nie stwierdzono natomiast domieszki w postaci srebra, a tym bardziej złota, co sugerowały liczne przekazy i legendy. Zatem wynik wykonanej analizy podważa piękne opowieści o srebrnej strunie wrzuconej do tygla z roztopionym metalem, aby dzwon pięknie dzwonił, a także o dodanych do stopu srebrach króla Zygmunta Starego. Nie ma też śladu po złotych pierścieniach ochoczo wrzucanych przez królewskie dwórki. Nie jest też prawdą, że dzwon został odlany z armat zdobytych na Wołochach pod Obertynem. Przede wszystkim bitwa ta odbyła się w 1531 r., a więc 11 lat po odlaniu dzwonu. Ponadto, jak wykazały metalograficzne badania różnych armat z XVI w., proporcje poszczególnych składników stopów, są nieco inne niż zwykle stosowane były przy odlewaniu dzwonów (Piaskowski 1981: 142-145).

PODSUMOWANIE

Z przedstawionej pokrótce problematyki dotyczącej szeroko pojętych badań archeometalurgicznych

wynika, że dziedzina ta szybko rozwija się m.in. dzięki coraz częstszym kontaktom z naukami ścisłymi, takimi jak np. fizyka, chemia, mineralogia itp. Dotyczy to zwłaszcza zastosowania nowoczesnego instrumentarium, które pozwala nam uzyskiwać szybko i w sposób precyzyjny wszelkie potrzebne do interpretacji naukowej wyniki z przeprowadzonych analiz. Ponadto uzyskane dane mogą być przetwarzane i przekazywane innym ośrodkom badawczym w celu porównania i niekiedy też weryfikacji. Dzięki temu pozyskana baza badawcza znacznie bardziej poszerza naszą wiedzę o cywilizacyjnym rozwoju i postępie technicznym społeczeństw pradziejowych. Zaprezentowane przykłady badań archeometalograficznych potwierdzają możliwości ich wykorzystania jako źródła do odtwarzania danych aspektów kultury i historii społeczności zamieszkujących w epoce żelaza nasze ziemie czy też inne obszary Europy. W tym zakresie wykazano np. daleko idące możliwości do przeprowadzenia identyfikacji ośrodków produkcji wyrobów żelaznych na podstawie wypracowanych kryteriów technologiczno-surowcowych oraz np. wykorzystanie tego rodzaju badań przy pracach konserwatorskich.

LITERATURA

- Belaiew, N.T. 1918. Damascene Steel. *The Journal of the Iron and Steel Institute* 97: 417–437.
- Biborski, M. 1994a. Römische Schwerter mit Verzierung in Form von Figürlichen Darstellungen und symbolischen Zeichen, (w:) C. von Carnap-Bornheim (red.), *Beiträge zu römischer und barbarischer Bewaffnung in den ersten vier nachchristlichen Jahrhunderten, Marburger Kolloquium 1994*. Lublin-Marburg, 109–135.
- Biborski, M. 1994b. Typologie und Chronologie der Ringknaufschwerter, (w:) J. Tejral, A. Stuppner, H. Friesinger (red.), *Markomannenkriege – Ursachen und Wirkungen*. Brno, 85–97.
- Biborski, M. 2017. Einige Bemerkungen zum Auftreten und den Identifizierungsmöglichkeiten romischer Schwerter, (w:) J. Andrzejowski, C. von Carnap-Bornheim, A. Cieśliński, B. Kontny (red.), *Orbis barbarorum. Studia ad archaeologiam Germanorum et Baltorum temporibus Imperii Romani pertinentia Adalberto Nowakowski dedicate. Monumenta archaeologica barbarica, Series Gemina VI*. Warszawa, 309–325.
- Biborski, M. 2018. Rola dziweru określanego często mianem stali damasceńskiej, w historycznej broni białej, (w:) M. Taborska (red.), *Między nauką a praktyką. Szable w dłoń! Szermierka szabłą jako polskie dziedzictwo narodowe*. Kraków, 74–87.
- Biborski, M. 2021. *Dzwoniąc Zygmuntem*. Kraków.
- Biborski, M., Ilkjaer, J. 2006a. Illerup Ådal. Die Schwerter. 11 *Textband*. Århus.
- Biborski, M., Ilkjaer, J. 2006b. Illerup Ådal. Die Schwerter. 12 *Katalog, Tafeln und Fundlisten*. Århus.
- Biborski, M., Kaczanowski, P. 1989. Zur Identifizierung römischer Schwertimporte im Lichte metallographischer Untersuchungen, (w:) R. Pleiner (red.), *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987. Symposium (Libice 1987)*. Prag, 379–385.
- Biborski, M., Kaczanowski, P., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 1982. Metallographische Untersuchungen als Kriterium einer Identifikation römischer Schwerter, (w:) *Ancient iron manufacture centres in northern central Europe. Archaeologia Interregionalis III*. Warszawa-Kraków, 65–98.
- Biborski, M., Kaczanowski, P., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2007. Metallographische Untersuchungen der zwei- und einschneidigen Schwerter vom Gräberfeld der Przeworsk-Kultur in Oblin, (w:) K. Czarnecka (red.), *Oblin. Ein Gräberfeld der Przeworsk-Kultur in Südmaschien*. Warszawa, 131–146.
- Biborski, M., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2002. Konserwatorskie analizy metalograficzne pękniętego serca dzwonu Zygmunta. *Studia Waweliana* 9/10: 251–261.
- Biborski, M., Stępiński, J. 2014. Materiały do poznania metalurgii żelaza z okresu rzymskiego, (w:) R. Madyda-Legutko, J. Rodzińska-Nowak (red.), *Honoratissimum assensus genus est armis laudare. Studia dedykowane Profesorowi Piotrowi Kaczanowskiemu z okazji siedemdziesiątej rocznicy urodzin*. Kraków, 263–276.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2009. Nowe badania nad Szczerbcem – mieczem koronacyjnym Królów Polskich. *Studia Waweliana* 14, 235–252.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2011. Szczerbiec (The Jagged Sword) – The Coronation Sword of the Kings of Poland. *Gladius* 31, 93–148.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2013. Szczerbiec-Koronacyjny mecz Polskich Koroljey (Rezultaty Issledowanija). *Istorija Orużija. Almanach* 8-9: 83–92.
- Bielenin, K. 1983. Żelazo, (w:) J. Kozłowski, S.K. Kozłowski (red.), *Człowiek i środowisko w pradziejach*. Warszawa, 153–168.
- Bielenin, K. 1992. *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*. Kielce.
- Bielenin, K. 2002. Kilka dalszych uwag dotyczących starożytnego górnictwa świętokrzyskiego, (w:) S. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnej metalurgii żelaza na ziemiach polskich*. Kielce, 11–25.
- Buchwald, V.F. 2005. *Iron and steel in ancient times*. The Royal Danish Academy of Sciences and Letters. Historisk-filosofiske Skrifter 29. Copenhagen.
- Coghlan, H.H. 1956. *Notes on Prehistoric and Early Iron in the Old World*. Oxford.
- Godfrey, E.G., van Nie, M. 2004. A Germanic ultrahigh carbon steel punch of the Late Roman-Iron Age. *Journal of Archaeological Science* 31: 1117–1125.
- Kaczanowski, P. 2006. 50 lat badań metaloznawczych zabytków kultury przeworskiej. Komentarz archeologa, (w:) M. Orzechowski, I. Szeliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*. Archeologia – Metalurgia – Edukacja. Kielce, 131–134.
- Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2006. Metaloznawstwo żelaza z okresu rzymskiego na ziemiach polskich, (w:) M. Orzechowski, I. Szeliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*. Archeologia-Metalurgia-Edukacja. Kielce, 175–195.
- Piaskowski, J. 1965. Niektóre dziwerowane miecze na ziemiach Polski. *Z Otchłani Wieków* 31(1): 36–39.
- Piaskowski, J. 1970. O pochodzeniu mieczy rzymskich występujących na ziemiach polskich. *Z Otchłani Wieków* 36(1): 60.
- Piaskowski, J. 1974. O stali damasceńskiej. *Monografie z Dziejów Nauki i Techniki* 92. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk.
- Piaskowski, J. 1981. *Technologia dawnych odlewów artystycznych*. Kraków.
- Pleiner, R. 2000. *Iron in Archaeology the European Bloomery Smelters*. Praha.
- Pleiner, R. 2006. *Iron in Archaeology. Early European Blacksmiths*. Praha.

- Pliniusz Starszy 1961. *Historia Naturalna* (wybór). Przekład i komentarz I., T. Zawadzcy. Wrocław.
- Prakash, B. 1991. Metallurgy of iron and steel making and blacksmithing in ancient India. *Indian Journal of History of Science* 26(4): 353–371.
- Radwan, M. 1961. O niektórych metodach badań nad starożytnym hutnictwem żelaza w Polsce. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 9(4), 779–795.
- Radwan, M. 1963. *Rudy, kuźnice i huty żelaza w Polsce*. Warszawa.
- Sim, D. 1998. *Beyond the Bloom. Bloom refining and iron artifact production in the Roman world*. BAR International Series 725, Oxford.
- Stępiński, J. 2012. Wpływ fosforu na mikrostrukturę starożytnych wyrobów żelaznych. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków (niepublikowana praca doktorska).
- Tylecote, R.F. 1976. *A history of Metallurgy*. London
- Tylecote, R.F., Gilmour, B.J.J. 1986. *The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons*. BAR British Series 155. Oxford.
- Wadsworth, J., Sherby, O. 1980. On the Bulat – Damascus steel Revisited. *Progress in Materials Science* 5: 35–68.
- Wendorf, Z. 1976. *Metalożnawstwo*. Warszawa.
- Wesołowski, K. 1974. *Metalożnawstwo i obróbka cieplna*. Warszawa.
- Williams, A. 2012. *The sword and the crucible*. History of Warfare 77. Leiden-Boston.

