

Analiza metaloznawczo-technologiczna przedmiotów ze skarbów odkrytych w Falejówce (skarb II), Zarszynie (skarb II), Woli Sękowej i Sanoku (Białej Górze)

Aldona Garbacz-Klempka*

Piotr Jurecki**

Wstęp

Badania składu i mikrostruktury zabytków metalowych pochodzenia archeologicznego wymagają zastosowania szeregu specjalistycznych metod badawczych, które umożliwiają ich dokładną charakterystykę. Analizy te wymagają jednak często stworzenia specjalnych, nietypowych procedur z uwagi na charakter materiału i niemożność wykorzystania standardowych instrukcji i przyjętej preparatyki (Gale, Stos-Gale 1982; Scott 1991; Pernicka 2004; Lyubomirova *et al.* 2014; Garbacz-Klempka 2018; Scott, Schwab 2019). Znajomość tworzyw i technologii wykonania zabytków ma istotne znaczenie nie tylko dla badań historii rozwoju techniki (Ciliberto, Spoto 2000; Roberts, Thornton 2014). Szczególne znaczenie badania te mają w zakresie studiów nad konserwacją i ochroną zabytków metalowych (Stuart 2007; Dillmann *et al.* 2013; Biborski 2018).

Wizualne badanie obiektu może dostarczyć ważnych informacji. Podstawową metodą badania powierzchni i mikrostruktury materiałów jest mikroskopia. Badania z zastosowaniem technik mikroskopowych nazywamy badaniami metalograficznymi (Scott 1991; 2014; Przybyłowicz 2011).

W sensie poznawczym dzięki metalografii uzyskujemy dowody na zastosowanie materiałów metalicznych oraz technologiczne i materiałowe powiązania lub różnice artefaktów w grupie. Ważne są tu nie tylko techniki wytwórcze, jak odlewanie czy przeróbka plastyczna i obróbka cieplna, które pozostawiają ślady w mikrostrukturze, ale także ślady otrzymania z rudy, które przechowuje gotowy wyrób. Do istotnych aspektów należy określenie sposobów wykończenia, w tym technik zdobienia obiektów i łączenia ze sobą różnych metali. W połączeniu z analizą składu chemicznego w makro- i mikroobszarach możliwa jest szczegółowa analiza materiałowa i technologiczna. Do najważniejszych metod badania składu chemicznego zabytków metalowych należy spektroskopia fluorescencji rentgenowskiej (XRF), przydatna również do badania śladów pierwiastków metalicznych w wyrobach ceramicznych i kamiennych (Lutz, Pernicka 1996; Bray *et al.* 2015). Obrazowanie mikrostruktury wraz z analizą składu

chemicznego w mikroobszarach zapewnia skaningowa mikroskopia elektronowa z rentgenowską analizą chemiczną (SEM-EDS). Uzyskanie obrazu struktury wewnętrznej zabytków metalowych zapewnia radiografia cyfrowa (CR).

Metodyka badań

Dla materiału historycznego, odkrytego przez przypadkowych znalazców, przeprowadzono ilościowe i jakościowe analizy chemiczne i mikrostrukturalne. Obiekty charakteryzowano pod względem budowy struktury i składu chemicznego, a także technologii wykonania. Wykonano m.in.: badania makro- i mikroskopowe w zakresie mikroskopii świetlnej i skaningowej (SEM), badania składu chemicznego metodami spektrometryczną ED-XRF i fluorescencyjnej rentgenowskiej analizy w mikroobszarze EDS.

Obserwacje makro-, mikroskopowe i submikroskopowe materiału służą do obrazowania jego powierzchni i struktury. Pozwalają na jakościową identyfikację rodzaju materiału oraz procesów, którym podlegał w toku wytwarzania. W czasie badań wykonano szereg serii obserwacji makro- i mikroskopowych przy użyciu mikroskopu optycznego i skaningowego. Mikroskopia optyczna jest podstawową metodą badania mikrostruktury materiałów. Pozwala na obserwacje składników strukturalnych próbek, ich morfologii, wielkości i lokalizacji. Metoda daje możliwość klasyfikacji badanego stopu, identyfikacji składników strukturalnych, oceny stopnia zanieczyszczenia stopu w procesach metalurgicznych, a także dostarcza dowodów pozwalających na odtworzenie historii obróbki plastycznej stopu. W realizowanych badaniach metoda mikroskopii optycznej pozwoliła na obserwację morfologii powierzchni zabytków archeologicznych i identyfikację przeobrażeń materiału w wyniku procesów technologicznych i korozyjnych. Pozwoliła także na odtworzenie kolejnych sekwencji wytwarzania i zdobienia wyrobu.

W mikroskopii elektronowej do tworzenia obrazów struktury materiałów wykorzystuje się efekty oddziaływania wiązki elektronów z materią (Barbacki 2003). Skaningowy mikroskop elektronowy pozwala na obserwację mikrostruktury materiału, w tym nie-

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Centrum Badań Nawarstwien Historycznych, e-mail: agarbacz@agh.edu.pl; ORCID 0000-0001-8417-6131.

** Badacz niezależny; e-mail: morganhenker@gmail.com.

ciągłości i wtrąceń w rozdzielczości ok. 10 nm. W pracy obserwacje przy pomocy mikroskopu skaningowego wykonano w celu określenia charakterystyki struktury i opisu składu chemicznego. Metoda ta pozwoliła na dokładną ocenę mikrostruktury, obserwacje wtrąceń metalicznych, wad i nieciągłości próbek, a także zanieczyszczeń niemetalicznych. Obserwacje prowadzono na próbkach nietrawionych.

Dokumentacja fotograficzna stanowi katalog zdjęć wykonanych z wykorzystaniem stereoskopowego mikroskopu optycznego NIKON SMZ 745T ($6,7\div 50\times$), a także zdjęć skaningowych mikroskopu elektronowego FEI 200 Quanta FEG przedstawiających szczegółowo topografię powierzchni badanych próbek (przy powiększeniach $60\div 1000\times$).

W celu przeprowadzenia charakterystyki badanego materiału dokonano analizy składu chemicznego metodą spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (ED-XRF). Spektrometria fluorescencji rentgenowskiej wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie, które padając na badaną próbkę materiału metalowego, powoduje, iż staje się ona źródłem wtórnej emisji promieni rentgenowskich, zwanej fluorescencją. Analiza opiera się na charakterystycznej zdolności każdego pierwiastka do emitowania indywidualnego widma rentgenowskiego, które po rozszczepieniu, zarejestrowane, niesie informację na temat obecności danego pierwiastka w próbce (Cygański 1993). W niniejszej pracy badania składu chemicznego próbek zostały przeprowadzone przy pomocy spektrometru fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii SPECTRO Midex.

Fluorescencyjna rentgenowska analiza w mikroobszarach (EDS) polega na wzbudzaniu widma charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego wiązką elektronów przyspieszoną do energii kilkudziesięciu keV. Proces zachodzi w kolumnie elektrooptycznej odmiany mikroskopu elektronowego (mikroskopu skaningowego). W czasie pomiaru w czasie rzeczywistym następuje odchylenie wiązki omiatającej (skanującej) próbkę i jednocześnie rejestracja sygnału elektronów wtórnych wzbudzanych w tym procesie. Analizę ilościową, czyli zawartość (stężenie) pierwiastka w próbce, wyznacza się na podstawie pomiaru natężenia linii jego promieniowania. Połączony z urządzeniem mikroskop skaningowy umożliwia rejestrację obrazu i precyzyjne wyznaczenie mikroobszaru do analizy przy powiększeniach sięgających nawet 100 000 razy.

Badania metaloznawcze zabytków brązowych pochodzących z Muzeum Historycznego w Sanoku przeprowadzono na świeżo odsłoniętych i oczyszczonych powierzchniach przedmiotów, stosując niewazyjną mikroskopię skaningową połączoną z analizą chemiczną w mikroobszarze SEM-EDS. Ich celem było określenie składu chemicznego stopów, z których zostały wykonane zabytki. Analizy prowadzono pod kątem udziałów przede wszystkim takich pierwiastków

jak Fe, Co, Ni, Cu, As, Ag, Sn, Sb, Pb i Bi, z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej ze spektrometrią dyspersji energii (SEM-EDS). Przedmioty badano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego FEI 200 Quanta FEG ze spektrometrem EDS/EDAX (FEI Company, Fremont, CA, USA), przy maksymalnym napięciu wzbudzenia 20 kV, a ciśnieniu 60 Pa (tryb niskiej próżni), bez napyłania.

Badania radiograficzne CR (Computer Radiography) należą do metod defektoskopowych, które służą do wykrywania wad wewnętrznych, jak pory i pęknięcia, oraz innych nieciągłości materiału. Metoda radiograficzna wykorzystuje zjawisko pochłaniania promieniowania rentgenowskiego γ w zależności od liczby atomowej absorbentu i jego grubości. Promieniowanie wysyłane przez anodę lampy rentgenowskiej (lub izotop promieniotwórczy) pada na obiekt usytuowany na tle kliszy fotograficznej lub ekranu fluorescencyjnego. Jeśli obiekt charakteryzuje się występowaniem pustych przestrzeni, to promieniowanie w tych przestrzeniach będzie osłabione w mniejszym stopniu niż w miejscach litej warstwy materiału. Podobnie jeśli w materiale litym znajduje się materiał o innym współczynniku osłabienia, widoczna będzie różnica intensywności promieniowania, zależna m.in. od grubości wtrącenia. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem Systemu Y.MU2000-D (YXLON), składającego się z lampy rentgenowskiej (160 kV) sprzężonej z cyfrowym detektorem panelowym o obszarze aktywnym 200 mm na 200 mm przy szybkości klatek 15 kl./s i rozmiarze piksela 200 μm . Do obrazowania danych wykorzystano system YXLON Image 2500/3500.

Techniki wytwarzania wyrobów z brązu

Wyroby metalowe wykazują ślady pozostawione na powierzchni przez określone techniki. Ślady można wykorzystać do zdefiniowania zastosowanych narzędzi i technik wytwórczych, a także sekwencji kolejnych operacji. Ślady technik rzemieślniczych dzięki badaniom naukowym, analizie porównawczej i eksperymentom są dziś coraz lepiej udokumentowane (Nørgaard 2018).

Na powierzchni zabytków zaobserwowano ślady pozostawione w czasie obróbki oraz defekty powstałe w wyniku odkształcenia i zmęczenia cieplnego podczas procesu kształtowania. Mogą one prowadzić do próby odtworzenia kolejnych operacji świadczących o zastosowanej technologii. W badanych wyrobach zastosowano dwie techniki wytwórcze: odlewanie i kształtowanie plastyczne z obróbką cieplną.

Odlewanie metali jest jedną z najczęściej używanych technik stosowanych w produkcji wyrobów metalowych epoki brązu. Dogłębna znajomość różnych technik odlewniczych, właściwości materiałów oraz wiedza o zjawiskach fizykochemicznych zachodzących w czasie procesów topienia i odlewania są niezbędne dla właściwej interpretacji śladów pracy,

pozostawionych na powierzchni odlewów m.in. w postaci obserwowanych wad odlewniczych. Technika ta jest szczególnie przydatna do tworzenia wyrobów ornamentowanych i o złożonych kształtach.

Z epoki brązu znane są formy odlewnicze kamienne, gliniane i metalowe, jednorazowe, półtrwałe i trwałe (dla zabytków z ziem polskich zob. np. Gedl 1982; Malinowski 1982; Garbacz-Klempka, Rządkosz 2014; Garbacz-Klempka *et al.* 2017; Garbacz-Klempka 2018; Kowalski *et al.* 2019a; 2019b; 2021; Dziegielewski, Garbacz-Klempka 2021). Wśród metod odlewniczych największe znaczenie miała technologia odlewania precyzyjnego zwana metodą wytapianych modeli, jak również metodą traconego wosku (Davey 2009; Rządkosz *et al.* 2015). Model woskowy odpowiadający, co do wymiarów i kształtu, odlewianemu przedmiotowi pokrywany był cienką i równomierną warstwą gliny. Modele woskowe warstwowo oklejano gliną z piaskiem i składnikami organicznymi. Zewnętrzna warstwa mogła zawierać dodatek gliny wcześniej przepalanej i pokruszonej (Garbacz-Klempka, Rządkosz 2014). Tak przygotowane formy były suszone, a następnie wypalane w temperaturze zapewniającej właściwą ogniotrwałość i trwałość formy przy kontakcie z ciekłym metalem (Garbacz-Klempka 2018). Po wysuszeniu pierwszej warstwy gliny nakładano kolejną. W czasie zalewania stop wypełniał pustkę pozostałą po wytopieniu wosku, tworząc odlew o grubej lub cienkiej ściance. Metoda ta zapewniała dużą gładkość powierzchni i dokładność odtwarzania modelu. Powtarzalność kształtów uzyskiwano przez odlewanie wosku do matryc z gliny lub kamienia albo poprzez odciskanie w formach glinianych kształtek i stempli (Garbacz-Klempka, Rządkosz 2014; Garbacz-Klempka 2018). Po zalaniu usuwano układ wlewowy, a całość poddawano obróbce wykończeniowej. W formach jednorazowych glinianych wykonywano zarówno drobne, skomplikowane w kształcie i ornamentyce ozdoby, jak i bardziej masywne proste bransolety, naszyjniki, nagolenniki lub też półprodukty (Simon 1983; Garbacz-Klempka *et al.* 2016; 2018a; 2018b). Formy te były rozbijane po zalaniu i zakończeniu procesu krystalizacji stopu. Z kolei formy używane wielokrotnie musiały cechować się szczególnie wysoką odpornością na działanie ciekłego metalu i wysokiej temperatury. Wykonywano je głównie z kamienia, wypalanej gliny, rzadziej z metalu. Najprostsze formy, które składały się z jednego elementu z wnęką i płaskiej płytki zamykającej, zwano jamowymi i odlewano w nich przedmioty płaskie z jednej strony, jak sierpy (Garbacz-Klempka *et al.* 2017; Garbacz-Klempka 2018; Kowalski, Garbacz-Klempka 2019a). Siekierki i groty z tuleją odlewano w formach dzielonych z rdzeniem, który odtwarzał wewnętrzną część odlewu. Rdzeń, najczęściej wykonany z gliny, powodował często wady odlewnicze przy kontakcie z ciekłym metalem, widoczne w odlewie m.in. w postaci porowatości i niedolewów (Garbacz-Klempka *et al.* 2017).

Po odlaniu usuwano układ wlewowy, a wady odlewnicze, jak zalewki na płaszczyźnie podziału, niwelowano w trakcie obróbki wykończeniowej lub pozostawiano.

Właściwe przeprowadzenie obróbki plastycznej brązu w pradziejach musiało iść w parze z dużą znajomością technik odlewniczych i kowalskich. Każda z operacji wymagała bowiem precyzyjnego wykonania.

Kształtowanie plastyczne brązu związane było z operacją zarówno kucia swobodnego (gięcia, prostowanie, wydłużanie, przebijanie), jak i kucia na kształtowniku (półswobodnego). Wszystkie te operacje zmieniały strukturę i właściwości materiału. Stopy miedzi poddawano kuciu na zimno. Przeróbka na zimno metali i stopów (kucie, ciągnięcie, tłoczenie) powoduje powstanie odkształceń plastycznych stopu, który zmienia swoje właściwości fizyczne i mechaniczne (wzrasta wytrzymałość, a maleje plastyczność). Zmiany te są trwałe, jeżeli szybkość procesów dyfuzyjnych jest niewielka. Im niższa temperatura procesu, tym większa jest gęstość defektów sieci krystalicznej i większa energia odkształcenia. Stopień odkształcenia jest miarą zgniotu. Zachodziła więc konieczność stosowania wyżarzania międzyoperacyjnego zwanego rekrytalizującym w celu usunięcia umocnienia stopu (twardości, wytrzymałości) i zwiększenia plastyczności, koniecznej do dalszej przeróbki plastycznej.

Jako półproduktu do wykonywania ozdób obręczowych używano odlewanych wlewek w postaci sztabek lub prętów, odlewanych w formach otwartych, dwuczęściowych lub w jednorazowych formach glinianych metodą wytapianych modeli (traconego wosku). Na bransoletach w wielu przypadkach nie zachowały się ślady układów wlewowych, ale można uznać zastosowanie tej techniki na podstawie charakterystycznych wad odlewniczych i na podstawie cech plastycznych ozdób. Na powierzchni bransolet występują porowatości gazowe, wady wynikłe z zanieczyszczenia metalu, wady spowodowane uszkodzeniem ścianki formy podczas wytapiania wosku lub wypalania formy, natomiast na ich końcach zaobserwowano jamy skurczowe i zażuzlenia. Z kolei krawędzie żeberk zdobiących bransolety są łagodnie zaokrąglone, co z technologicznego punktu widzenia wskazuje, że zostały wykonane w modelu woskowym i odlane.

Druły do wyrobu bransolet, naszyjników i tarczek spiralnych produkowano przy użyciu kształtowników lub kowadeł z rowkami, na których odlewianemu wlewki nadawano zamierzoną długość i ostatecznie doprowadzano do wymaganego kształtu (Ohlhaber 1939; Armbruster 2000; Strobin 2000). Stosowano kształtowniki odpowiadające przekrojom kolistym, owalnym, półkolistym i wklęsło-wypukłym, a także prostokątnym lub kwadratowym. Procesowi temu towarzyszyło powtarzane pośrednie wyżarzanie – w przeciwnym razie metal stawał się kruchy.

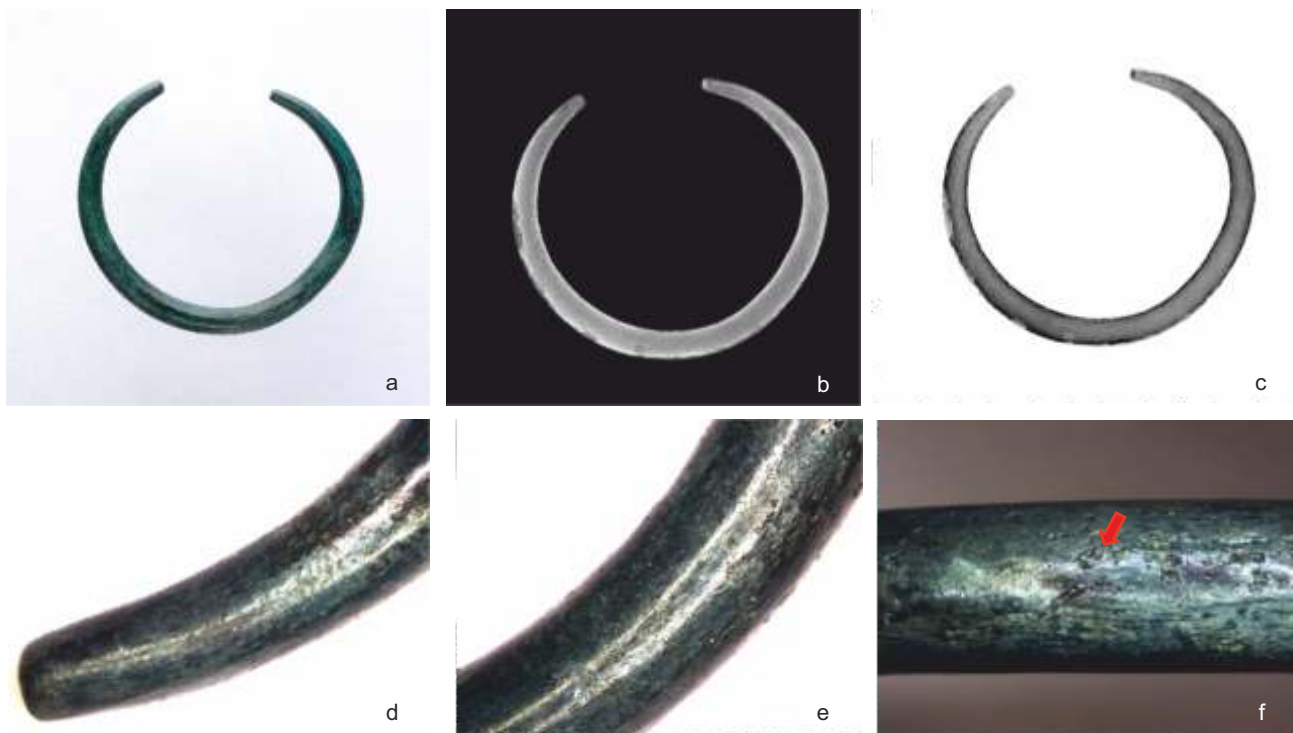
Tab. 6. Wyniki składu chemicznego zabytków ze skarbu z Falejówki na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Tab. 6. Results of the energy dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) analysis of the chemical composition of the artefacts from the hoard in Falejówka (wt %). A. Garbacz-Klempka

Nr kat.	Pierwiastek										
	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
I.13	< 0,025	0,08	0,25	92,96	0,13	0,26	0,06	5,88	0,21	0,16	0,02
I.14	0,07	0,09	0,27	92,15	0,14	0,24	0,08	6,48	0,20	0,29	0,07
I.15	0,06	0,09	0,27	92,75	0,14	0,22	0,06	5,95	0,17	0,25	0,06
I.16	0,65	0,09	0,49	84,79	0,17	1,10	0,05	12,12	0,47	0,69	0,04
I.17	< 0,025	0,08	0,48	92,48	0,13	0,34	0,02	5,92	0,21	0,31	0,03
I.38	0,90	0,18	0,59	86,20	0,53	1,82	0,24	0,31	5,80	3,31	0,13
I.3	0,11	0,13	0,33	91,83	0,12	0,73	0,06	5,95	0,32	0,38	0,04
I.4	0,20	0,09	0,20	93,95	0,16	0,48	0,09	4,39	0,15	0,24	0,06
I.5	0,13	0,08	0,26	89,19	0,15	0,60	0,06	8,88	0,30	0,32	0,02
I.11	< 0,025	0,07	0,36	88,87	0,15	0,97	0,13	8,10	0,58	0,66	0,12
I.10	< 0,025	0,07	0,14	90,59	0,16	0,18	0,05	8,52	0,06	0,19	0,02
I.12	0,04	0,08	0,25	90,95	0,14	0,78	0,06	6,58	0,43	0,61	0,09
I.6	< 0,025	0,08	0,17	92,68	0,14	0,33	0,15	5,87	0,22	0,28	0,08
I.8	< 0,025	0,10	0,36	90,09	0,14	0,26	0,05	8,66	0,15	0,17	0,02
I.7	0,21	0,12	0,21	93,38	0,13	0,62	0,07	4,58	0,17	0,45	0,07
I.18	0,55	0,09	0,55	85,25	0,14	0,71	0,04	11,50	0,62	0,50	0,05
I.1	< 0,025	0,07	0,10	93,54	0,12	0,24	0,09	5,41	0,23	0,14	0,04
I.2	< 0,025	0,07	0,48	91,61	0,13	0,31	0,03	6,76	0,42	0,17	0,03
I.9	0,04	0,09	0,37	90,08	0,16	0,41	0,04	8,18	0,28	0,31	0,03
I.19	0,08	0,09	0,51	92,42	0,14	0,65	0,05	5,44	0,24	0,19	0,20
I.36	0,04	0,08	0,27	90,55	0,11	0,44	0,04	7,91	0,29	0,21	0,08
I.37	0,06	0,08	0,14	86,73	0,13	0,61	0,10	10,91	0,35	0,77	0,12
I.32	< 0,025	0,07	0,33	90,20	0,12	0,59	0,07	7,98	0,33	0,27	0,03
I.31	0,15	0,06	0,27	84,74	0,12	0,73	0,02	11,07	2,63	0,21	0,01
I.39	0,05	0,10	0,30	83,01	0,11	0,70	0,29	11,49	1,92	1,99	0,05
I.33	0,11	0,07	0,45	89,17	0,16	0,42	0,03	9,09	0,30	0,27	0,04
I.34	0,20	0,08	0,23	85,35	0,14	0,74	0,15	12,29	0,37	0,39	0,06
I.20	0,11	0,09	0,50	84,72	0,16	0,75	0,04	12,03	0,33	1,20	0,07

Druty o małym przekroju można było przeciągać w drutownicy (Wyss 1979; Özşen 2017), druty o większym przekroju wytwarzano, stosując technikę kucia w kształtowniku o przekroju kwadratowym (Strobin 2000). Z praktycznego punktu widzenia ciągnięcie drutu o średnicy powyżej 3 mm ze stopów miedzi, bez dodatkowych urządzeń mechanicznych, jest bardzo trudne.

Wytwarzanie drutu w procesie ciągnięcia polegało na operacji, w wyniku której cylindryczny wlewek metalu w postaci pręta, po wstępnym przekuciu, był przeciągany przez matrycę o otworach w kształcie stożka, co prowadziło do zmniejszenia średnicy drutu i wyrównania jego powierzchni (Newbury, Notis 2004). Badacze zagadnienia od strony technicznej dowodzą, iż nie można podważać faktu pojawienia się drutu ciągniętego z powodu braku narzędzia do ciągnięcia drutu oraz iż możliwe jest przeciąganie drutu litego przez

matrycę z tego samego tworzywa (Thomsen, Thomsen 1976; Oddy 1977). Recyklingiem materiału drutownicy tłumaczy się brak ocalałych charakterystycznych płytek z otworami pełniącymi funkcję ciągań ręcznych z okresów i obszarów, gdzie istnieją pośrednie niepodważalne dowody na ciągnięcie drutu w postaci samych drutów z charakterystycznymi śladami (Thomsen, Thomsen 1976). Wystarczającym dowodem technologicznym na ciągnięcie drutu są charakterystyczne równoległe rysy na powierzchni (Oddy 1977). Ich brak z kolei nie jest dowodem na wykorzystanie innej techniki produkcji drutu, gdyż charakterystyczne ślady mogą zostać usunięte przez polerowanie. Obserwowane w mikrostrukturze wydłużenie ziaren może być zarówno dowodem na ciągnięcie drutu, ale ten rodzaj zniekształcenia kryształów może być również wynikiem wykonania drutu z wlewka przez młotkowanie. Należy więc przyjąć znajomość w epoce brązu różnych technik



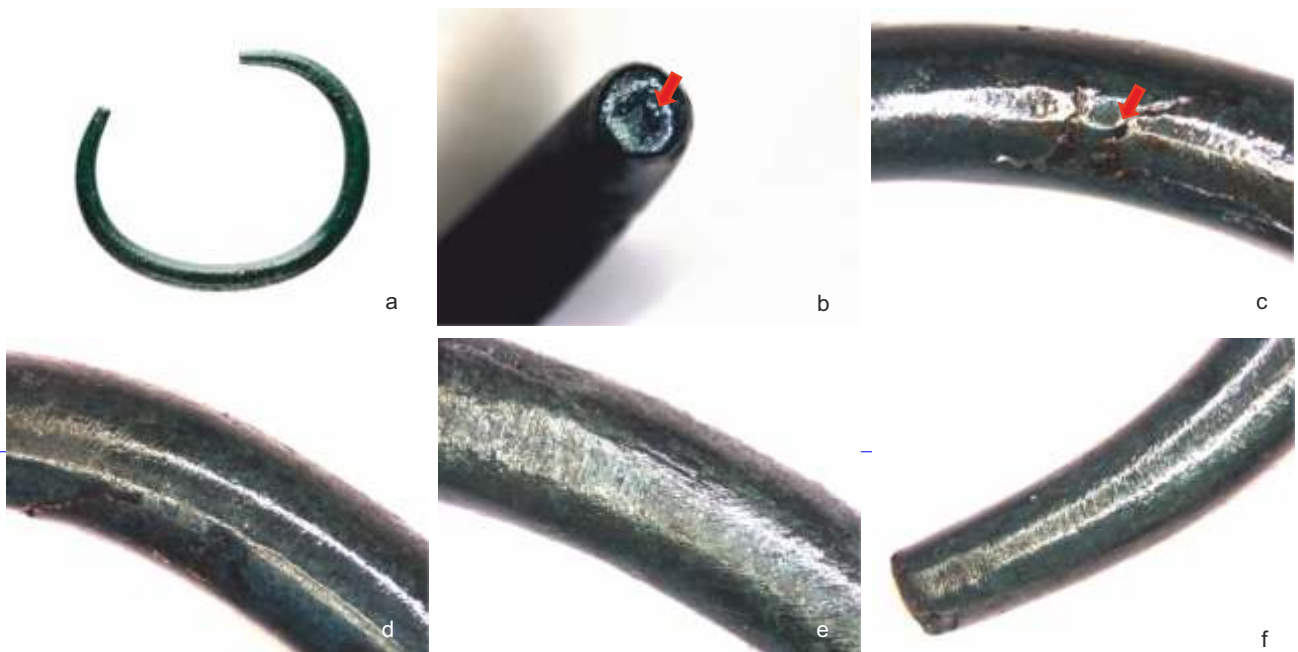
Ryc. 43. Falejówka. Bransoleta (kat. I.13): a – widok ogólny, b-c – obraz rentgenowski CR, d-e – obraz makroskopowy topografii powierzchni, f – widoczne wady odlewnicze na powierzchni w postaci porowatości gazowych. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-f)
 Fig. 43. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.13): a – general view, b-c – computer radiography (CR) image, d-e – macroscopic image of the surface's topography, f – casting defects visible as gas porosities on the surface. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-f)

wykonywania drutu. Tym bardziej że dowody na obecność drutownicy zostały potwierdzone w badaniach archeologicznych (Wyss 1971; Özşen 2017). Przy wykorzystaniu odlewanej drutownicy z otworem stożkowym stosunkowo łatwo można było wyciągnąć drut do średnicy 2 mm (Özşen 2017). Zużycie matrycy w tym procesie było jednak znaczne i pogłębiało się przy każdym przejściu w zależności od długości drutu (Newbury, Notis 2004). Potwierdzeniem intensywnej eksploatacji drutownic są narzędzia do ciągnięcia drutu znalezione wśród złomu wyrobów brązowych (Özşen 2017).

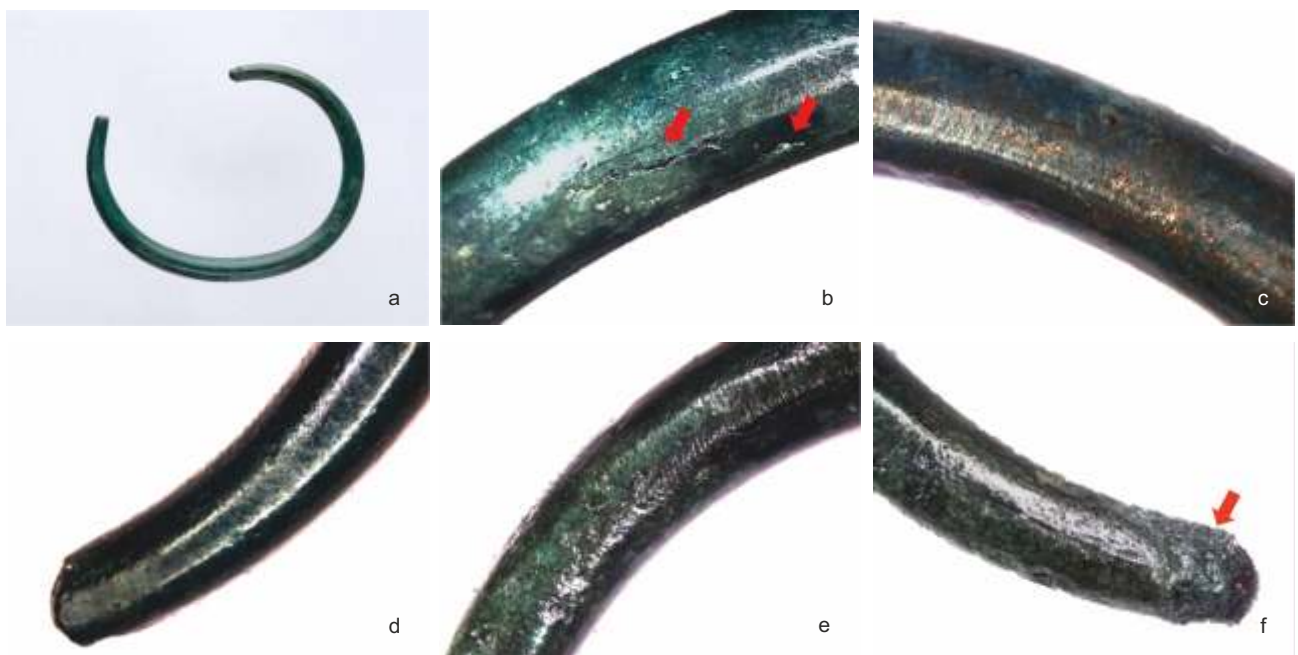
Po kolejnych operacjach kucia brązowe pręty, druty i taśmy były ponownie wyżarzane, aby uplastycznić materiał w celu dalszego przetwarzania. Na końcu pręty i taśmy były gięte na rogu kowadła lub wokół drewnianego modelu.

Techniki obróbki i zdobienia wyrobów metalowych w epoce brązu były dobrze rozwinięte (Tylecote 2002). Obróbkę wykończeniową prowadzono narzędziami metalowymi, kamiennymi, drewnianymi, kościanymi i skórzanymi (Wyss 1971; Nørgaard 2018; Natuniewicz-Sekuła, Strobin 2022). Część specjalistycznych narzędzi służyła zapewne do kształtowania woskowych modeli. Dekorację ryto oraz wycinano w modelu woskowym i na powierzchni odlewu uzyskiwano jej bezpośrednio odwzorowanie, które było często dodatkowo poprawiane i pogłębiane już na gotowym wyrobie (por. Dziegielewski *et al.* 2019; Nørgaard 2018). Stosowano brązowe punce, punktaki oraz przecinaki, dłuta, znaczniki (tysiki do trasowania),

a także narzędzia w typie rylca, które po obróbce cieplnej i plastycznej zyskiwały właściwą twardość (Armbruster 2000; Nessel 2009; 2019). Do zdobienia powierzchni stosowano przede wszystkim technikę grawerowania, która jest jedną z najstarszych znanych technik zdobienia wyrobów z brązu. Rylce służące do rytowania (grawerowania płaskiego), do wykonywania ozdobnych wzorów w postaci rowków, charakteryzowały się wąskim ostrzem w formie kąta dwuściennego, prowadzonego pod kątem i pozostawiającego wióry przed narzędziem (Tylecote 2002). Kontur dekoracji podkreślano lub pogłębiano za pomocą dłut grawerskich. Dłuta o różnych kształtach i odpowiednio zaostrzonym profilu części roboczej, wraz z pobijakiem drewnianym, służyły do wycinania lub pogłębiania rowków kształtowych, czyli grawerowania przestrzennego. Puncce z kolei to narzędzia o różnym przekroju części wybijającej, służące do cyzelowania oraz wybijania powtarzalnych elementów wzoru, a także poprawiania i pogłębiania już istniejących dekoracji (Nessel 2009; Nørgaard 2018). Właściwy wzór o założonej głębokości uzyskiwano, uderzając młotkiem w odpowiednią punce, najczęściej prostopadle w stosunku do wcześniej przygotowanej powierzchni. Narzędzia do obróbki wykonywano ze specjalnego twardego brązu bogatego w cynę (Wyss 1971), gdyż dodatek cyny w brązach cynowych zwiększa twardość stopów w sposób ciągły. Brąz z 5% zawartością cyny charakteryzuje się twardością 50 HBW, 10% zawartością cyny – 80 HBW, 15% zawartością cyny – 150 HBW (Rzadkosz 2013; Garbacz-



Ryc. 44. Falejówka. Bransoleta (kat. I.14): a – widok ogólny, b – zakończenie bransolety z widoczną jamą skurczową, c – wada powierzchni, d-f – obraz makroskopowy topografii powierzchni. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 44. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.14): a – general view, b – bracelet's terminal with a visible contraction cavity, c – surface defect, d-f – macroscopic image of the surface's topography. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)



Ryc. 45. Falejówka. Bransoleta (kat. I.15): a – widok ogólny, b-f – obraz makroskopowy topografii powierzchni. Widoczne pęknięcie wzdłużne (b) i zażuzlenie na jednym z końców (f). Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 45. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.15): a – general view, b-f – macroscopic image of the surface's topography. Longitudinal crack (b) and slagging on one terminal (f). Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

Klempka 2018). Narzędzia do grawerowania, punco-
 wania i czyszczenia znane są z wykopalisk archeologicznych (Wyss 1971, Armbruster 2000; Tylecote 2002, Nessel 2019). Ostatni etap obróbki prowadzono przy pomocy narzędzi kamiennych, o różnej twardości i ziarnistości, które były używane jako kamienie szlifierskie (Kowalski *et al.* 2021). Szlifowanie i polerowanie powierzchni wyrobu prowadzono przy pomocy miesza-

niny piasku, popiołu i innego ścierniwa, na sucho i na mokro, w zależności od oczekiwanego efektu.

Falejówka

W badaniach skarbu przedmiotów brązowych z Falejówki analizowano: 18 ozdób ramion i nóg (dla uproszczenia nazywanych dalej bransoletami) i ich fragmentów, dwa naszyjniki, ułamek ochroniacza końca szpili,



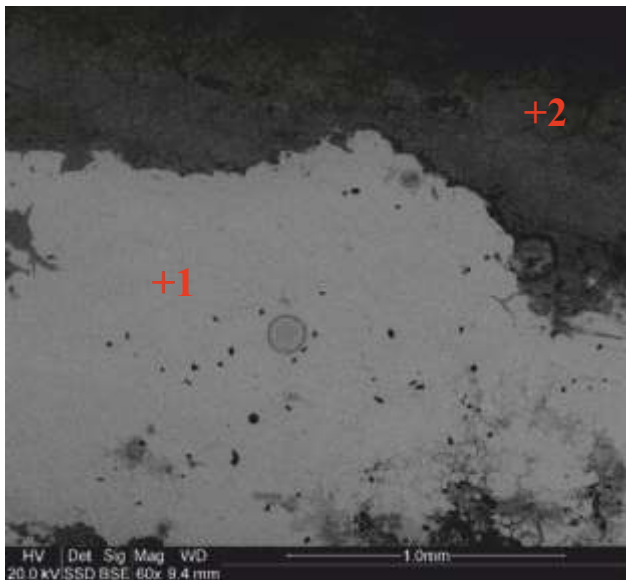
Ryc. 46. Falejówka. Bransoleta (kat. I.16): a – widok ogólny, b-c – obraz makroskopowy topografii powierzchni. Widoczne rozwarstwienie (c). Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-c)

Fig. 46. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.16): a – general view, b-c – macroscopic image of the surface's topography. Visible exfoliation (c). Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-c)

Tab. 7. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla bransolety z Falejówki (kat. I.16) (wt.%)

Tab. 7. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.16) (wt.%)

	O	As	S	Pb	Sn	Fe	Ni	Cu	Zn
1	0,00	0,55	0,00	0,56	4,19	0,36	0,88	92,56	0,9
2	30,72	1,82	0,18	1,08	28,68	0,42	0,35	35,21	0,42



Ryc. 47. Obraz mikroskopu elektronowego dla bransolety brązowej z Falejówki (kat. I.16) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 7). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

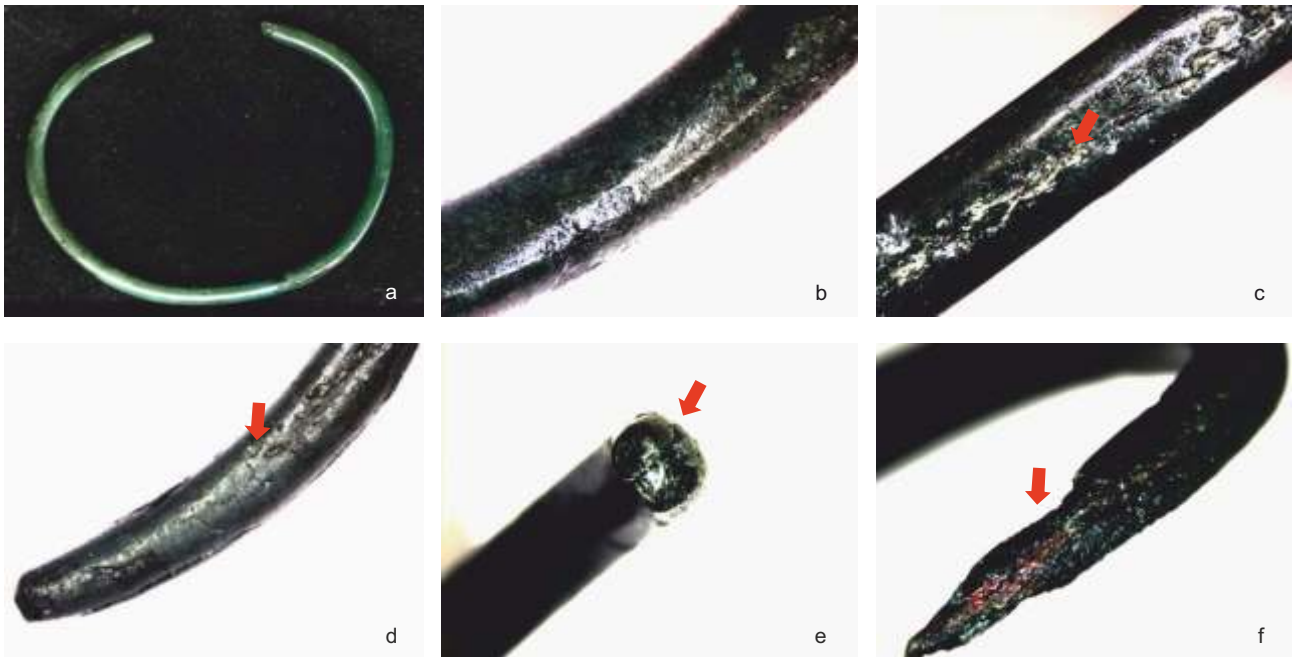
Fig. 47. Electron microscope image for the bronze bracelet from Falejówka (cat. No. I.16) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 7). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

tarczkę spiralną, dwa skręty drutu, dwa sierpy brązowe, fragment tulejki grotu i placek stopionego brązu. Istotne dla analizy skarbu są opracowania i wyniki badań opracowane dla znalezisk z epoki brązu z okolicy (Blajer 2001; 2017; 2018; Zielińska 2007; Biborski 2016).

Bransolety pod względem techniki wykonania można podzielić na kilka odrębnych grup. W pierwszej grupie uwzględniono bransolety masywne, zdobione, wykonane techniką odlewniczą jako ozdoby obręczowe odlewane i częściowo kute w końcowym etapie kształtowania wyrobu. Świadczy o tym zarówno ich

bardziej regularny kształt, intencjonalnie zróżnicowana grubość (maksymalnie 11 mm), jak też wzór wykonany częściowo na modelu woskowym. Obserwacje makroskopowe wskazują na zastosowanie do ich produkcji techniki odlewniczej z wykorzystaniem metody wytapianych modeli (traconego wosku), gdzie model woskowy określał kształt przyszłej obręczy. Model oklejano gliną, której kolejne warstwy po wysuszeniu i wypaleniu tworzyły formę. Woskowy model wytapiano z wnętrza formy. Do formy, podgrzanej do odpowiednio wysokiej temperatury, wlewano brąz o temperaturze powyżej 1000°C (przykładowo temperatura topnienia brązu cynowego o zawartości ok. 10% Sn wynosi 1020°C, por. Garbacz-Klempka 2018). Po rozbiciu formy odlew poddawano obróbce wykończeniowej w celu usunięcia defektów powierzchni i nadania ostatecznego kształtu przez szlifowanie i gładzenie kamiennymi narzędziami. W dalszym etapie pogłębiano wzory powstałe wcześniej na modelu i rytowano nowe wzory w postaci rowków na powierzchni odlewu. Zdobienia bransolet są geometryczne, poprzeczne i skośne w różnych układach. Zdobienia nacinano do 3/4 (niekiedy 2/3) obwodu pręta, pozostawiając niezdobione partie od wewnętrznej strony bransolety. Zdobienia sięgają końców bransolet, co wskazuje, że musiały powstać przed zagięciem bransolety, jeszcze na etapie modelu woskowego. Ostatnią operacją było zaginanie bransolety, aż do uzyskania zachodzących na siebie zakończeń. Do tej grupy należy sześć bransolet (kat. I.3, I.5-9), a dwie z nich (kat. I.5-6) mogą stanowić komplet, na co wskazuje podobieństwo grubości, kształtu i zdobień.

Zbliżona pod względem zastosowania zdobień w postaci poprzecznych nacięć jest kolejna bransoleta (kat. I.10), która jednak została wykonana w odmiennej technice kształtowania plastycznego z odlewanej formy. Jest spłaszczona obustronnie metodą kucia, co zniekształciło wzór wykonany wcześniej na modelu. Zniekształcenie to z technologicznego punktu widzenia nie mogło powstać w wyniku użytkowania i ścierania gotowego wyrobu, gdyż brązy cynowe posiadają dobre właściwości mechaniczne i technologiczne. Wraz ze wzrostem ilości cyny podwyższa się bowiem wytrzymałość materiału i jego odporność na ścieranie (Rząd-



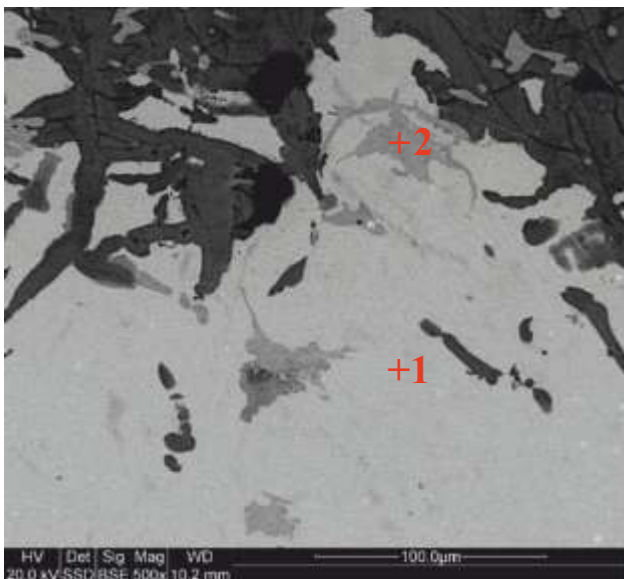
Ryc. 48. Falejówka. Bransoleta (kat. I.17): a – widok ogólny, b-c – obraz makroskopowy topografii powierzchni, d – widoczne pęknięcia, e-f – rozwarstwienia i wykruszenia jako efekt deformacji i obróbki cieplnej. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

Fig. 48. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.17): a – general view, b-c – macroscopic image of the surface's topography, d – visible cracks, e-f – exfoliations and chippings as a result of deformation and thermal treatment. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

Tab. 8. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla bransolety z Falejówki (kat. I.17) (wt.%)

Tab. 8. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.17) (wt %)

	O	As	S	Pb	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu	Zn
1	0,0	1,09	0,07	0,89	7,15	0,40	0,57	0,75	88,60	0,99
2	18,65	2,95	0,23	1,46	22,78	0,50	1,49	1,25	49,23	0,75

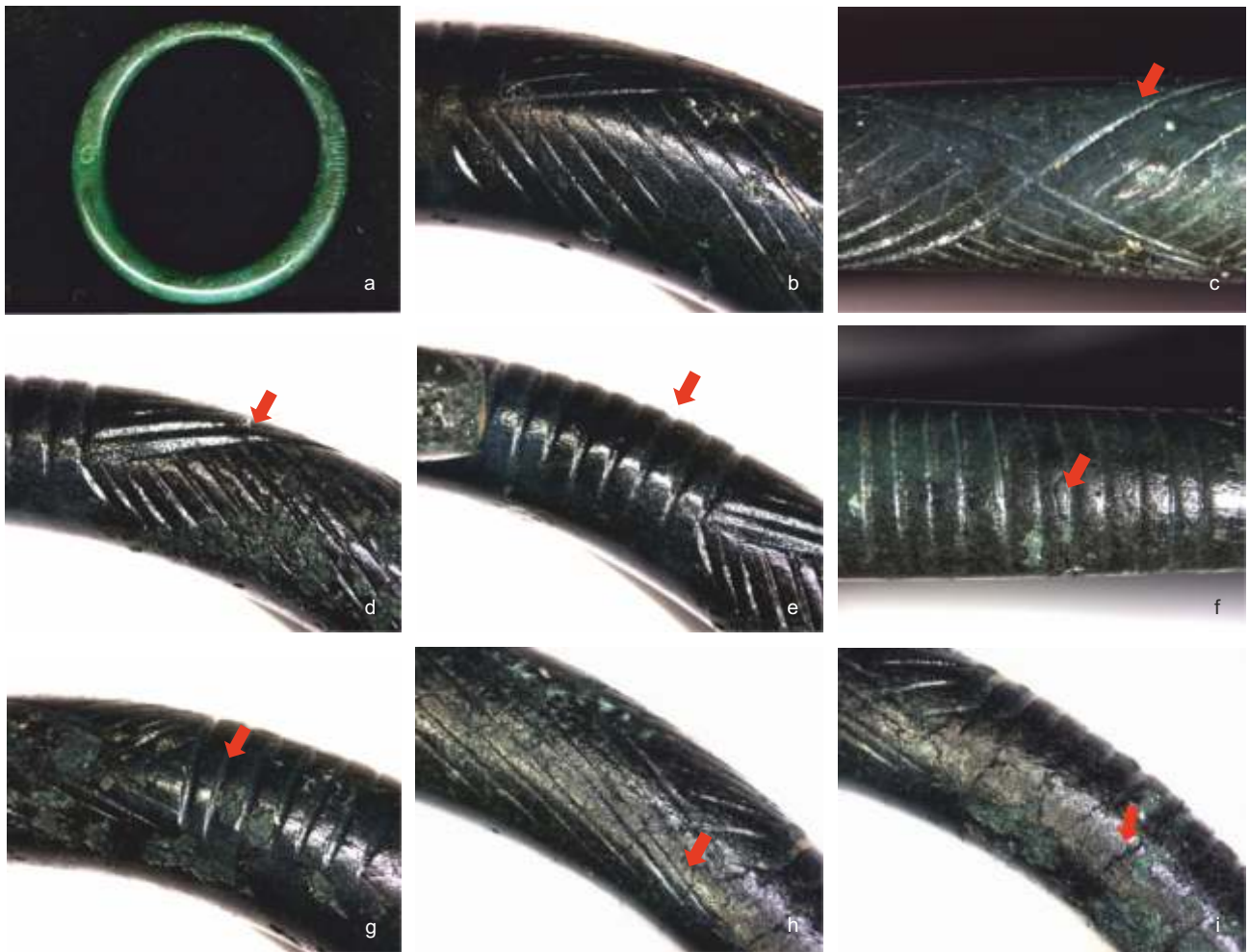


Ryc. 49. Obraz mikroskopu elektronowego dla bransolety z Falejówki (kat. I.17) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 8). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Fig. 49. Electron microscope image for the bronze bracelet from Falejówka (cat. No. I.17) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 8). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

kosz 2013; Garbacz-Klempka 2018). Przy tej zawartości cyny (8,5%, por. Tab. 6) odporność na ścieranie brązu cynowego jest bardzo dobra. Stop CuSn10 o 10% zawartości cyny charakteryzuje się jeszcze lepszymi właściwościami ślizgowymi i bardzo dobrą odpornością na ścieranie wynikającą z obecności w jego strukturze twardego eutektoidu ($\alpha+\delta$) (Górny 1992; Rzadkosz 2013; Garbacz-Klempka 2018). Współczynnik tarcia bez smaru wynosi 0,17. Dysponując charakterystyką stopów oraz w wyniku analizy możliwości zużycia ściernego odlewów z grupy brązów cynowych, należy uznać, iż nie jest możliwe zauważalne zużycie materiału poprzez oddziaływanie wspólnych powierzchni odlewów – bransolet. Warunki użytkowania tego typu odlewów – znikome obciążenie, nieznaczny ruch oddziałujących na siebie powierzchni, brak ścierniwa – nie spowodowałyby znaczących zmian w kształcie badanych odlewów w wyniku ich użytkowania.

W drugiej grupie znajdują się bransolety niezdołbione, wykonane z grubego, odlewanego wcześniej pręta lub odlane jako obręcze, o przekroju okrągłym, o średnicy zewężającej się ku końcom. Należące tu bransolety (kat. I.13-15) są niedomknięte i cieńsze niż bransolety grupy pierwszej (ich maksymalna grubość wynosi 6-7 mm). Charakteryzują się też nieregularnym kształtem obręczy, co sugeruje, iż zostały one wtórnie rozgięte. Zakończenia bransolet dowodzą zastosowania technologii odlewania, gdyż posiadają wady w postaci m.in. porowatości i jam skurczowych powstałych na skutek skurczu objętościowego, widocznego na jednym z końców (kat. I.13-14) lub zażuzlenia (kat. I.15). Dwa egzem-



Ryc. 50. Falejówka. Bransoleta (kat. I.3): a – widok ogólny, b-d,h – zdobienia rytowane na gotowym wyrobie, e-f – zdobienia odlewane wykonane na modelu, g – zdobienia odlewane i pogłębiane przez rytowanie, h-i – pęknięcia będące efektem deformacji i zmęczenia cieplnego. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-i)
 Fig. 50. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.3): a – general view, b-d,h – ornaments engraved on the ready artefact, e-f – cast ornaments made on a model, g – cast ornaments that were deepened by engraving, h-i – cracks resulting from deformation and thermal fatigue. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-i)

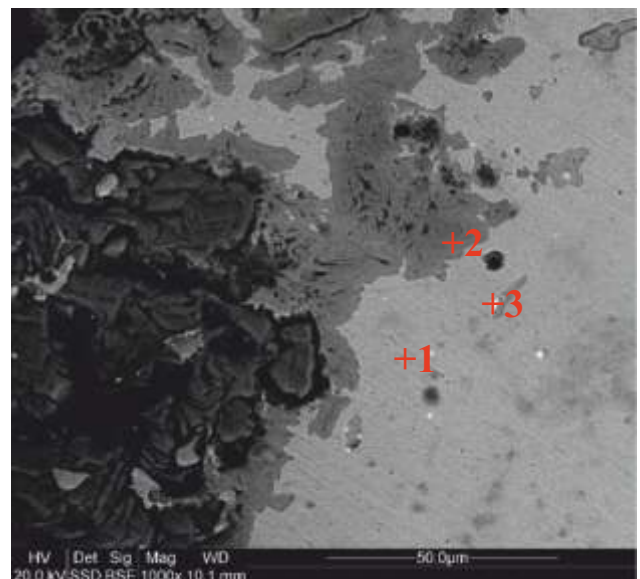
Tab. 9. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla bransolety z Falejówki (kat. I.3) (wt.%)

Tab. 9. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.3) (wt.%)

	O	As	S	Pb	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu	Zn
1	0,0	1,08	0,68	4,87	5,02	0,78	0,45	0,51	90,53	0,86
2	17,46	1,12	0,35	0,49	8,22	0,87	0,48	0,56	69,10	1,16
3	0,00	0,32	1,76	47,43	2,12	0,47	0,51	0,48	45,65	0,54

plarze (kat. I.14-15) mogą stanowić komplet. Pęknięcia poprzeczne na obwodzie po stronie zewnętrznej bransolet są efektem odkształcenia plastycznego, zachodzącego pod wpływem działania na materiał sił zewnętrznych. Pęknięcia rozwijają się prostopadle do kierunku działania siły – więc siły zewnętrzne to w tym przypadku zginanie, czyli nadanie prętom kształtu kolistego. Na skutek silnych odkształceń plastycznych (podczas gięcia) w strefie występowania wad materiałowych doszło zapewne do inicjacji i rozwoju pęknięć.

W trzeciej grupie znajdują się dwie bransolety (kat. I.16-17) wygięte z pręta. Pręt w środkowej części posiada przekrój okrągły (o średnicy ok. 4-5 mm),



Ryc. 51. Obraz mikroskopu elektronowego dla bransolety z Falejówki (kat. I.3) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 9). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Fig. 51. Electron microscope image for the bronze bracelet from Falejówka (cat. No. I.3) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 9). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka



Ryc. 52. Falejówka. Bransoleta (kat. I.4): a – widok ogólny, b-c – obrazy rentgenowskie CR, d-f-j – zakończenia bransolety, f – zdobienia odlewane wykonane na modelu, g – zdobienia odlewane i pogłębiane przez rytowanie, e-g – zdobienia rytowane, g-i – przekrój spłaszczony przez kucie swobodne. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)

Fig. 52. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.4): a – general view, b-c – computer radiography (CR) images, d-f-j – bracelet terminals, f – cast ornaments made on a model, g – cast ornaments that were deepened by engraving, e-g – engraved ornaments, g-i – cross-section flattened by free forging. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)

przechodzący w prostokątny przy końcach bransolety i zaokrąglony. Obie bransolety mają podobny kształt, nie zwężają się na długości, ta sama średnica pręta występuje na początku i na końcach, mogły więc zostać wykonane z tego samego odcinka pręta. Końce bransolet są rozwarstwione, co jest wynikiem kucia w celu zmiany kształtu zakończeń. Bransolety nie mają zdobień.

Trzy bransolety (kat. I.4, I.10-11) zostały wykonane z odlewanej pręta o podobnym przekroju, zwężonego ku końcom, zagiętego w kształt obręczy i spłaszczonego obustronnie przez kucie. W ostatniej operacji zagięcia pręta bransoleta została zamknięta z przesunięciem do uzyskania efektu założonych na siebie zakończeń. Dwa okazy (kat. I.4 i I.10) są ornamentowane przez nacięcia poprzeczne i skośne, zdobienia zostały wykonane na modelu woskowym i pogłębiane przez rytowanie przed i po operacji kucia, jak również wykonane na powierzchni gotowego wyrobu. Widoczne jest zniszczenie zdobienia w wyniku kucia, jak również rytowanie, które nachodzi na spłaszczenie.

Jedna z bransolet (kat. I.12) wykonana została z pręta okrągłego, zagiętego do kształtu obręczy. Ma przekrój regularny, okrągły, jej końcówki są wydłużone i zwężone. Zakończenia są przesunięte względem siebie. Kolejna z bransolet (kat. I.18) jest odmienna od pozostałych: kuta na kowadło z użyciem foremnik, ma kształt prostokątny. Z kolei bransoleta (kat. I.19) została wykonana z cienkiego drutu, możliwe że przeciąganego na drutownicy-ciągadle; jej końcówki są lekko spłaszczone.

Interesujące jest zjawisko zaobserwowane na powierzchni bransolety (kat. I.9), które widoczne jest jako siatka pęknięć lub rozwarstwienie materiału (Ryc. 62). Przyczyną tego zjawiska może być kruchość spowodowana obecnością faz międzymetalicznych lub tzw. kruchość na gorąco z towarzyszącym jej pękaniem o charakterze międzykrystalicznym. Kruchość na gorąco to zjawisko powstawania pęknięć na granicy wydzieleniosnowa w trakcie obróbki cieplnej lub plastycznej, w wyniku nadtapiania wtrąceń na granicach faz powyżej pewnej temperatury. Kruchość ta występuje w wyniku

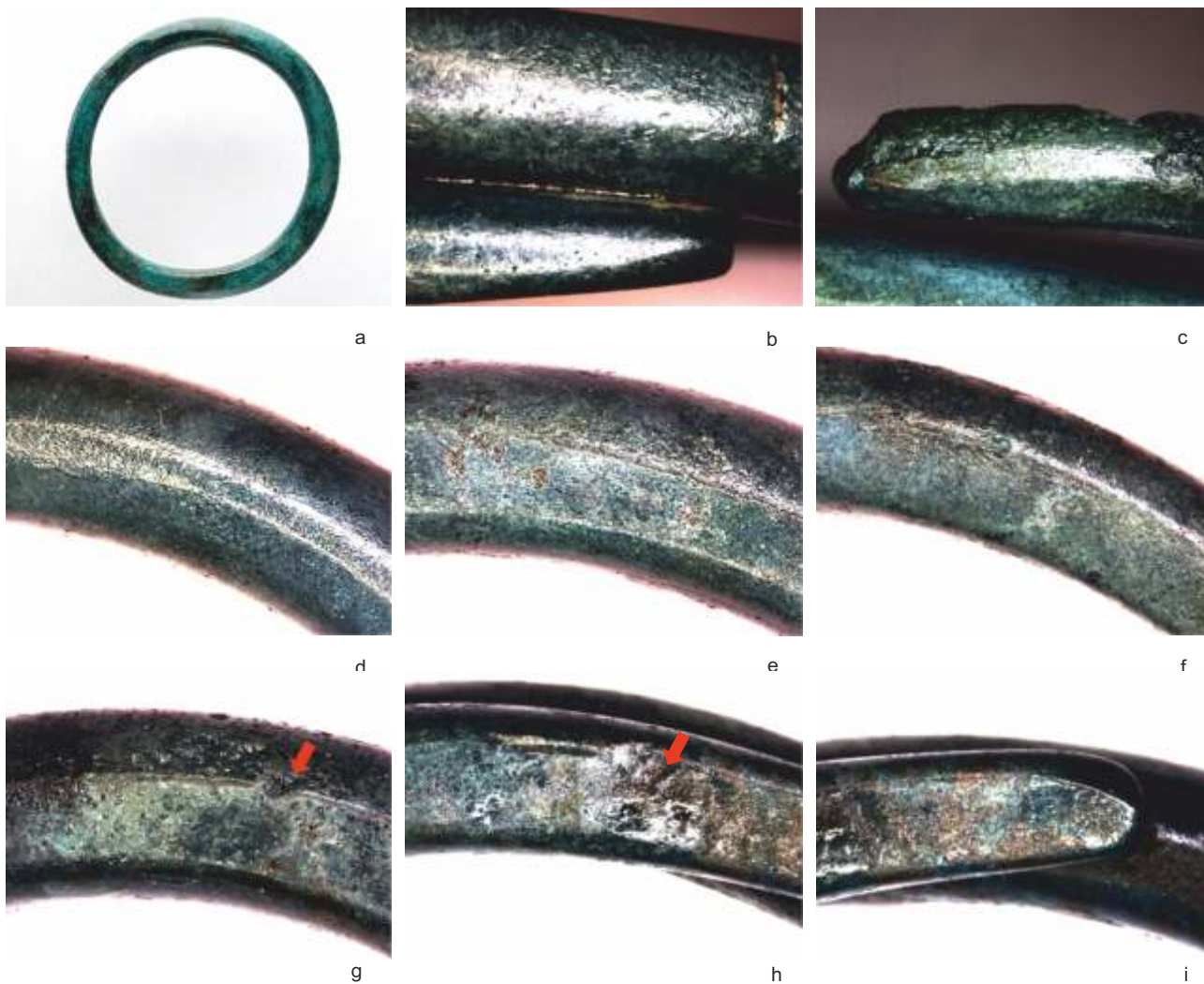


Ryc. 53. Falejówka. Bransoleta (kat. I.5): a – widok ogólny, b-c – obrazy rentgenowskie CR, d-l – zdobienia odlewane i rytowane, e-f – ślad narzędzia jako błąd w dekoracji, k-l – pęknięcia jako efekt deformacji i zmęczenia cieplnego. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)
 Fig. 53. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.5): a – general view, b-c – computer radiography (CR) images, d-l – cast and engraved ornaments, e-f – tool trace as an ornamentation error, k-l – cracks resulting from deformation and thermal fatigue. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)

przegrzania materiału lub też w wyniku powtarzających się zmian temperatury i powstających związanych z tym naprężeń. Widoczny makroskopowo efekt siatki pęknięć na powierzchni przedmiotu świadczy o przekroczeniu zakresu temperatury kruchości na gorąco. Aby uniknąć problemów wynikających z kształtowania brązów w temperaturze podwyższonej, tradycyjnie stosowano procesy przeróbki plastycznej na zimno z międzyoperacyjną obróbką cieplną. W kilku jednak przypadkach wyraźnie nastąpił efekt przegrzania materiału, prowadzący do rozwarstwienia i wyodrębnienia warstwy zewnętrznej kruchej (podatnej na korozję) i litego rdzenia.

Bransoleta o numerze kat. I.13 posiada przekrój okrągły, regularny, średnicy 6,5 mm, zwęża się ku końcom do średnicy 3 mm, końce ma prosto zakończone, zeszlifowane (Ryc. 43:a-e). Została odlana w formie z brązu cynowego Cu-Sn o zawartości miedzi – 93% i cyny – 5,9%. Udział arsenu w stopie wynosi 0,3%, natomiast antymonu – 0,2%. W składzie wykazano też niewielką zawartość niklu, ołowiu i cynku (Tab. 6). Widoczne są wady odlewnicze na powierzchni w postaci porowatości gazowych, wynikłych z kontaktu ciekłego metalu z wnętrzą formy (Ryc. 43:f).

Dwie bransolety (kat. I.14-15) są analogiczne pod względem wykonania, odlewane w postaci obręczy. Ich

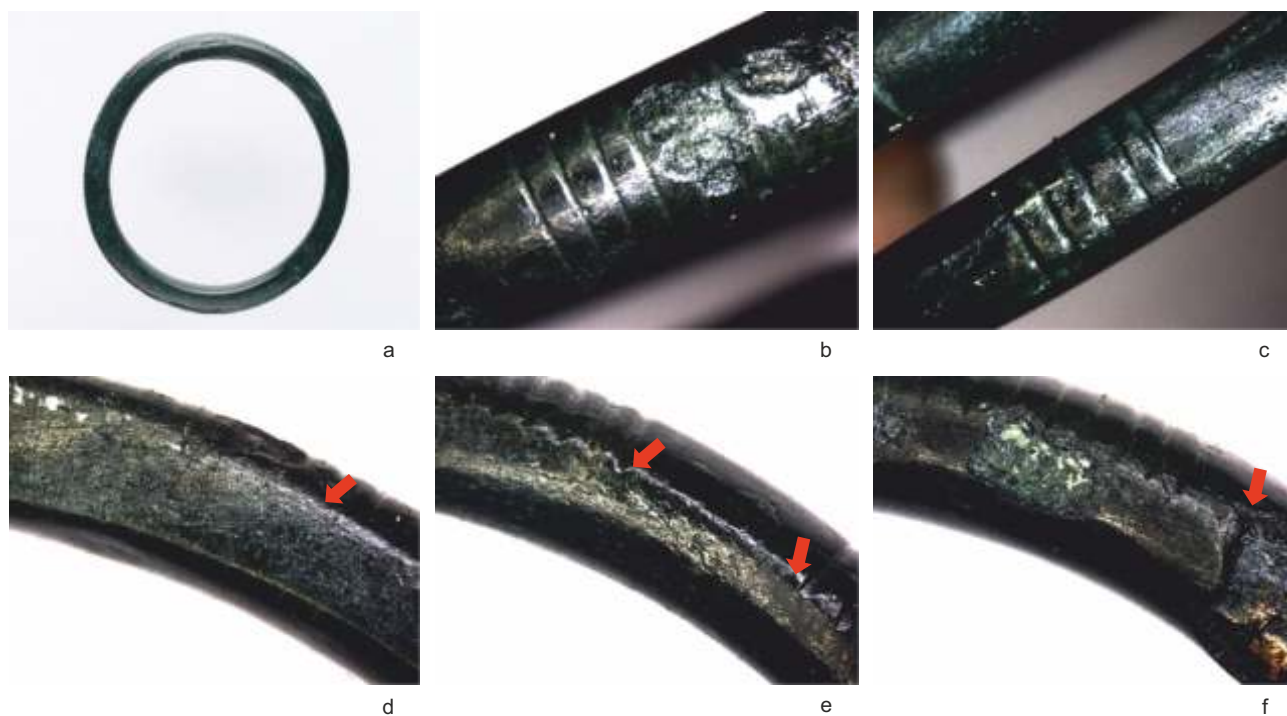


Ryc. 54. Falejówka. Bransoleta (kat. I.11): a – widok ogólny, b-c,i – zakończenia bransolety, d – przekrój okrągły, e-i – przekrój spłaszczony przez kucie swobodne, g-h – wady odlewnicze. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-i)
 Fig. 54. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.11): a – general view, b-c,i – bracelet terminals, d – round cross-section, e-i – cross-section flattened by free forging, g-h – casting defects. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-i)

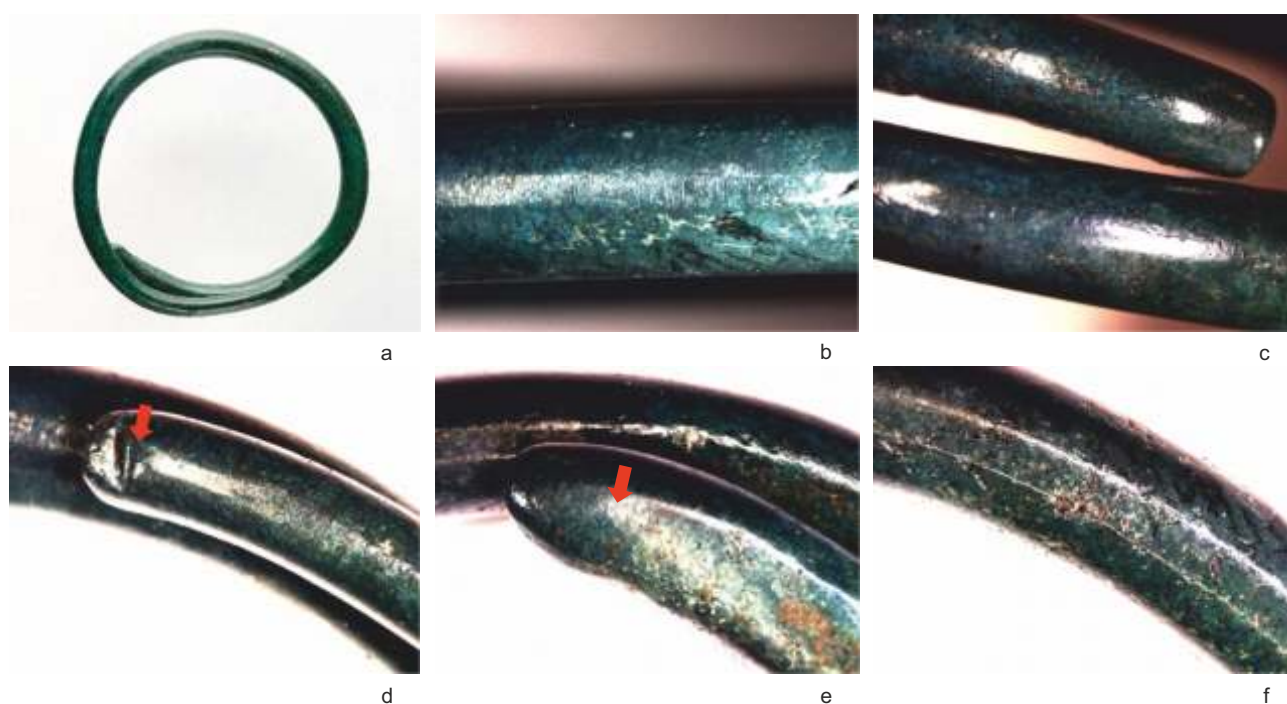
profil został zniekształcony przez rozgięcie, o czym świadczy nieregularna krzywizna bransolet. Bransoleta o numerze kat. I.14 posiada liczne wady, świadczące o zastosowaniu techniki odlewania (Ryc. 44:a-f). Jeden koniec bransolety ujawnia zjawisko skurczu objętościowego (Ryc. 44:b) oraz wskazuje na kierunek doprowadzenia metalu do formy. Wynika to stąd, że bransoleta została odlana bez układu wlewowego, a metal został doprowadzony bezpośrednio do wspomnianego końca lub układu wlewowy, który tu się znajdował, został usunięty zbyt wcześnie, przed zakrzepnięciem stopu. Zwykle zjawisko skurczu objętościowego pojawia się w wyniku zmniejszania się objętości stopu podczas stygnięcia w stanie ciekłym i krzepnięcia. Skupiona jama skurczowa, jak w tym przypadku, związana jest z kierunkowym krzepnięciem, gdyż faza stała narasta w kierunku przeciwnym do odprowadzania ciepła. Ryc. 44:c ilustruje wadę powierzchni powstałą w wyniku odlewania, a związaną z zanieczyszczeniem niemetalicznym ciekłego stopu.

Bransoleta o numerze kat. I.15 jest analogiczna do poprzednio omówionej (kat. I.14), odlana. Na jej powierzchni widoczne są wady powierzchniowe wynikające z procesu odlewniczego i pęknięcia wzdłużne jako efekt deformacji (Ryc. 45:a-e). Jeden z końców jest zażużony, czyli jest miejscem wypłynięcia zanieczyszczeń, które znajdują się w końcowej partii stopu. Koniec ten stanowi zatem miejsce doprowadzenia metalu do formy i wskazuje kierunek przepływu metalu (Ryc. 45:f). Sam fakt, że to zakończenie jest pozostawione nieobrobione i dzięki temu widocznie skośne, sugeruje odlewanie pod kątem, przy pochylonej formie, bez układu wlewowego. Bransoleta została wtórnie zniekształcona w wyniku rozgięcia.

Obie bransolety (kat. I.14-15) mają podobny profil chemiczny w zakresie zawartości cyny – 6-6,5% i pierwiastków pochodzących z rud: arsenu – 0,22-0,24%, antymonu – 0,17-0,20%, cynku – 0,14%, niklu – 0,27%, ołowiu – 0,25-0,29%, co wskazuje, że mogły zostać wykonane w ramach



Ryc. 55. Falejówka. Bransoleta (kat. I.10): a – widok ogólny, b-c – zdobienia poprzeczne odlewane z modelu woskowego, d-f – przekrój spłaszczony, e – zdobienie zniszczone przez kucie, widoczne rowki o zaokrąglonym i ostrym dnie, f – pęknięcie w wyniku odkształcenia. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 55. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.10): a – general view, b-c – transverse ornaments cast from a wax model, d-f – flattened cross-section, e – ornament destroyed by forging, grooves with rounded and sharp bottom can be seen, f – crack in result of deformation. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

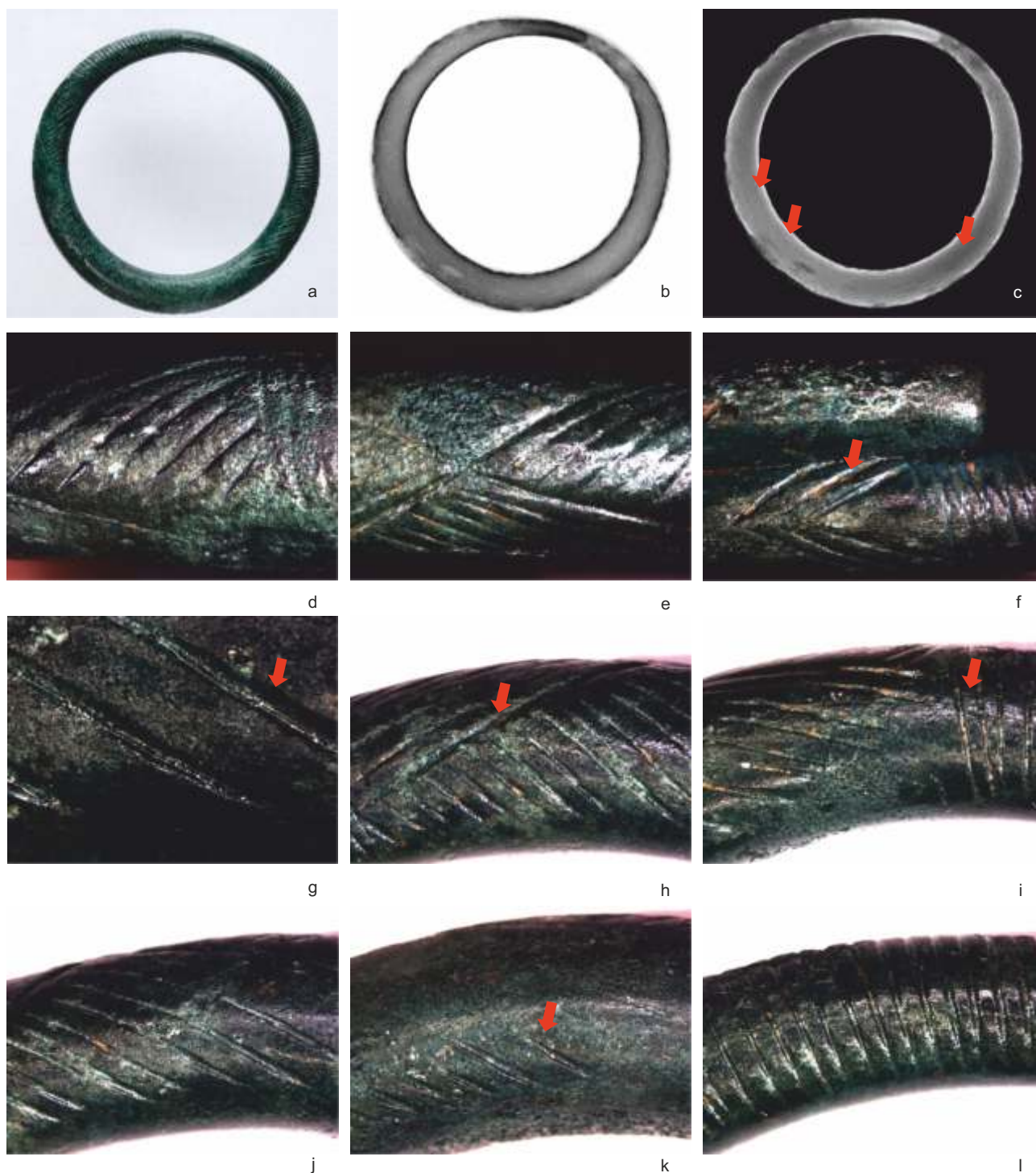


Ryc. 56. Falejówka. Bransoleta (kat. I.12): a – widok ogólny, b – zewnętrzny obwód bransolety, c-e – zakończenia bransolety, f – wady powierzchniowe. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 56. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.12): a – general view, b – external circumference of the bracelet, c-e – bracelet terminals, f – surface defects. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

wspólnego wytopu (Tab. 6). Zbliżony jest także skład stopu bransolety o numerze kat. I.13.

Następna bransoleta (kat. I.16) została wykonana na drodze przeróbki plastycznej z drutu o przekroju regularnym okrągłym o średnicy 5 mm w środkowej

części, przechodzącym na końcach w przekrój prostokątny o wymiarach $4 \times 2,5$ mm (Ryc. 46). Końce zostały przekute w kształt zbliżony do prostokąta z zaokrąglonymi krawędziami. Widoczne na obu końcach bransolety rozwarstwienie jest wynikiem ścieniania koń-

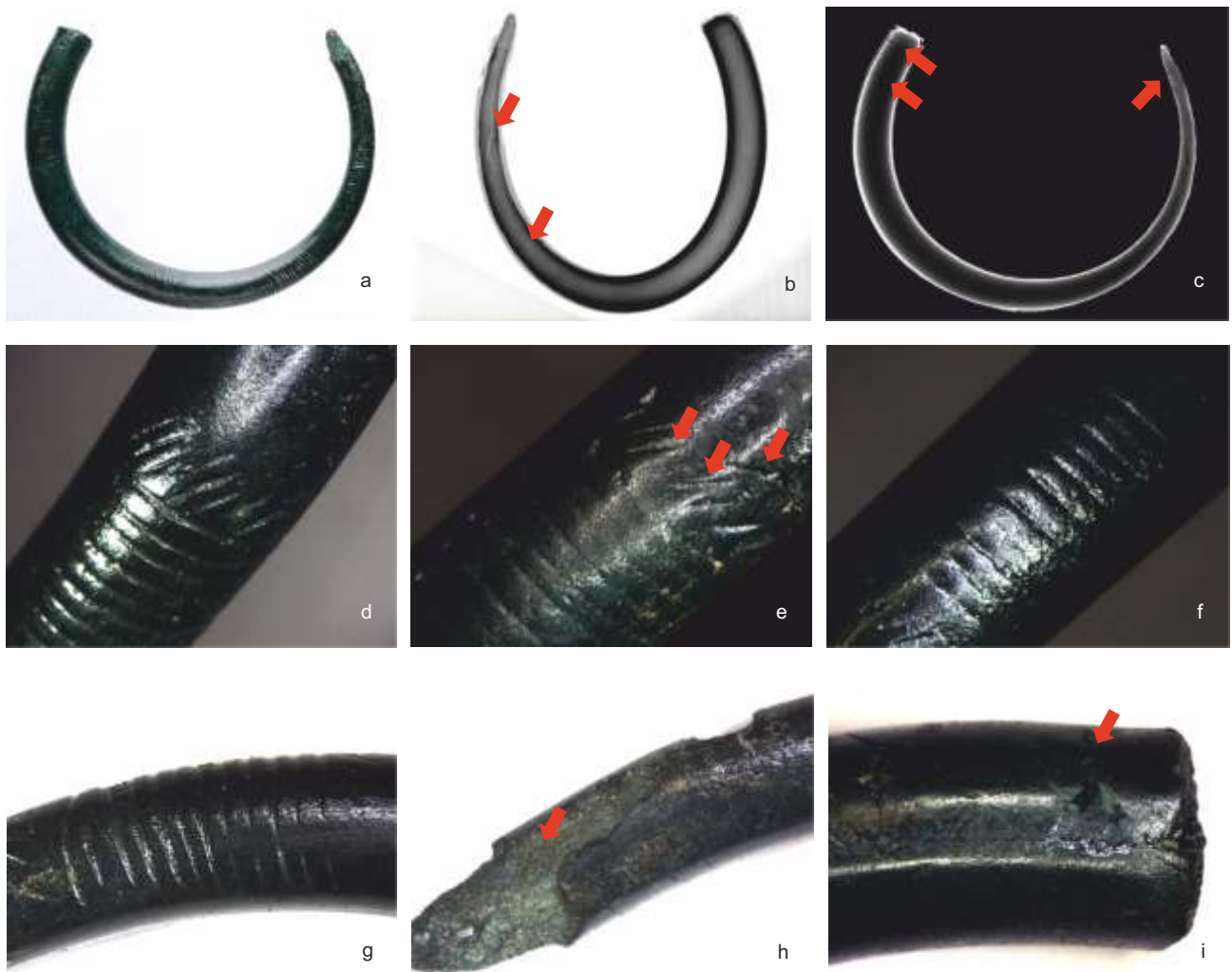


Ryc. 57. Falejówka. Bransoleta (kat. I.6): a – widok ogólny, b-c – obraz rentgenowski CR, d-l – zdobienia poprzeczne odlewane z modelu woskowego i zdobienia skośne rytowane na gotowym wyrobie. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)

Fig. 57. Falejówka. Bracelet (cat. I.6): a – general view, b-c – computer radiography (CR) image, d-l – transverse ornaments cast from a wax model and diagonal ornaments engraved on the ready artefact. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)

ców pręta i kształtowania przekroju metodą kucia swobodnego. Profil bransolety uformowany został poprzez gięcie wokół drewnianego walca lub na rogu kowadła (gięcie po promieniu). Aby uniknąć uszkodzenia powierzchni stosowano młotki drewniane, kościane, skórzane lub młotki brązowe wraz z drewnianymi przekładkami chroniącymi materiał (Wyss 1971). Bransoleta została wtórnie rozgięta.

Jak wykazała analiza składu chemicznego, bransoleta ta została wykonana z drutu brązowego typu Cu-Sn o podwyższonej zawartości cyny (12%) w stosunku do miedzi (84,8%) (Tab. 6). Uwagę zwraca też podwyższona zawartość As – 1,1%. Zawartość ołowiu sięga 0,7%, niklu – 0,49%, antymonu – 0,47%. W mikrostrukturze (Ryc. 47, Tab. 7) w punkcie 1 potwierdzono obecność cyny w osnowie miedzi. Wśród



Ryc. 58. Falejówka. Bransoleta (kat. I.8): a – widok ogólny, b-c – obraz rentgenowski CR, d-f – zdobienia poprzeczne odlewane z modelu woskowego i zdobienia skośnie rytowane na gotowym wyrobie, g – zdobienia odlewane i pogłębiane przez rytowanie, h – końcówka bransolety z widocznym rozwarstwieniem dochodzącym do rdzenia, i – pęknięcia warstwy zewnętrznej przy przelomie bransolety w wyniku odkształcenia i zmęczenia cieplnego. Fot. D. Szuwałski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)

Fig. 58. Falejówka. Bracelet (cat. I.8): a – general view, b-c – computer radiography (CR) image, d-f – transverse ornaments cast from a wax model and diagonal ornaments engraved on the ready artefact, g – cast ornaments that were deepened by engraving, h – bracelet terminal with a visible exfoliation reaching the core, i – cracks of the external layer near the bracelet's fracture resulting from deformation and thermal fatigue. Photos D. Szuwałski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)

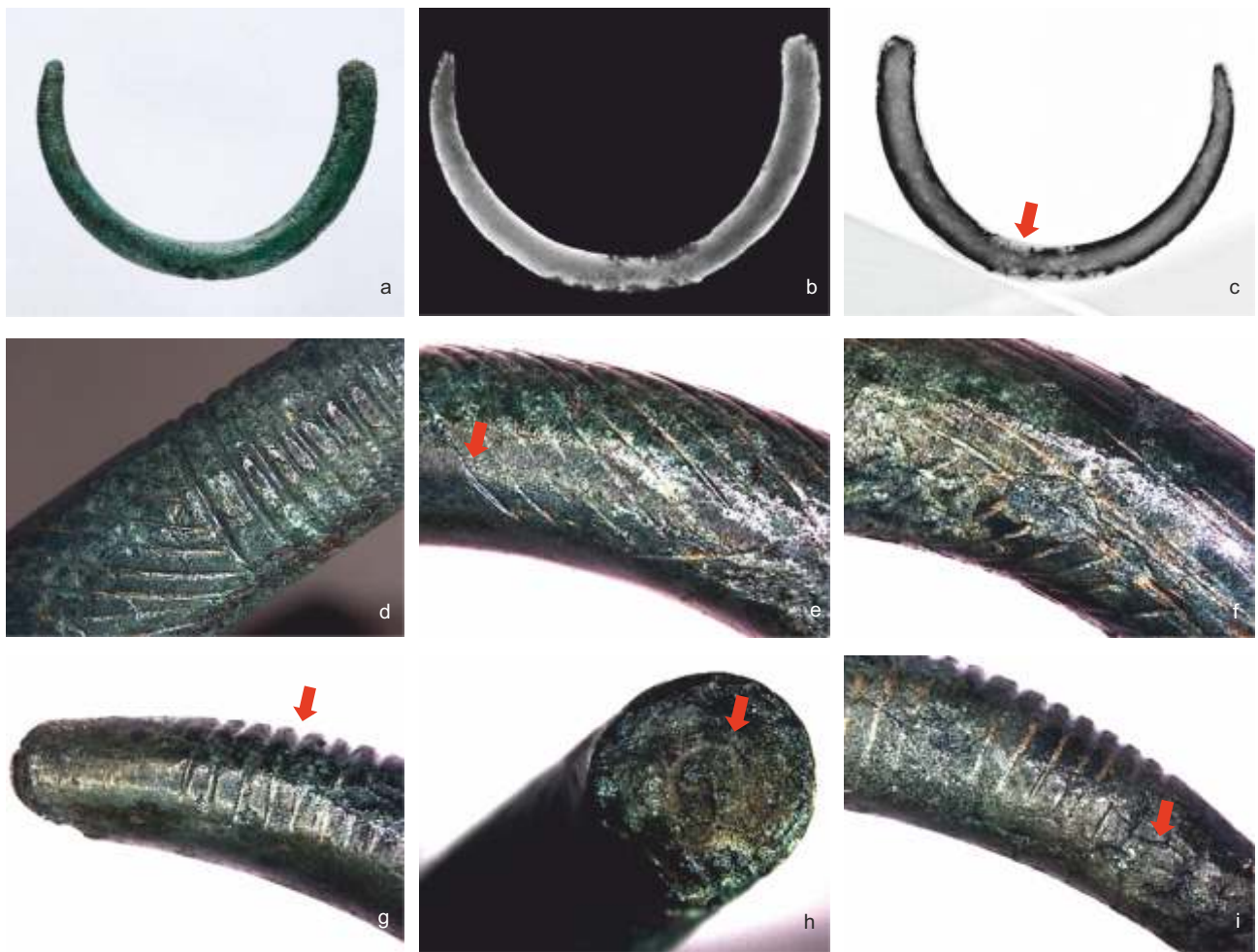
pierwiastków pochodzących z rud wykazano ołów, nikiel, cynk, arsen, żelazo. W punkcie 2 widoczne są produkty korozji o charakterze tlenków.

Bransoleta o numerze kat. I.17 została ukształtowana w wyniku przeróbki plastycznej z drutu. Jej przekrój jest w środkowej części owalny, przechodzący w D-kształtny (o średnicy 5×4 mm), przy końcach lekko spłaszczony (Ryc. 48:a-f). Zakończenia ozdoby są wyraźnie rozwarstwione, w wyniku zwięzania przez kucie w dwóch płaszczyznach oraz obróbki cieplnej (Ryc. 48:e-f). Pęknięcia rozwijają się prostopadle do kierunku działania siły, więc kucie wywołuje pęknięcie wzdłużne – odkształcenie pręta wzdłuż osi jest (prawie) swobodne, a pęknięcie poprzeczne hamowane, co powoduje powstanie naprężeń obwodowych, stycznych do zarysu zewnętrznego bransolety (Ryc. 48:c-d). Bransoleta nie posiada zdobień. Krzywizna przedmio-

tu została ukształtowana poprzez gięcie, a bransoleta została wtórnie rozgięta.

Bransoleta ta pod względem materiału wykonana jest z brązu cynowego o zawartości 95,5% miedzi, 5,9% cyny oraz 0,48% niklu, 0,31% ołowiu, 0,34% arsenu, 0,21% antymonu i 0,13% cynku (Tab. 6). Na podstawie analizy w mikroobszarach określono miejscowo zawartość: 7,15% cyny 1,09% arsenu, 0,99% cynku, 0,89% ołowiu, 0,75% niklu, 0,57% żelaza, 0,4% antymonu (Ryc. 49, Tab. 8). Wewnątrz struktury (punkt 2) widoczne są obszary dotknięte korozją, zawierające związki o charakterze tlenków.

Bransoleta o numerze kat. I.3 jest masywna, okrągła, zwięzająca się ku końcom (Ryc. 50). Wykonana została techniką odlewniczą w postaci obręczy z końcami zachodzącymi na siebie w wyniku zaginania. Grubość bransolety w środkowej części wynosi 10 mm,

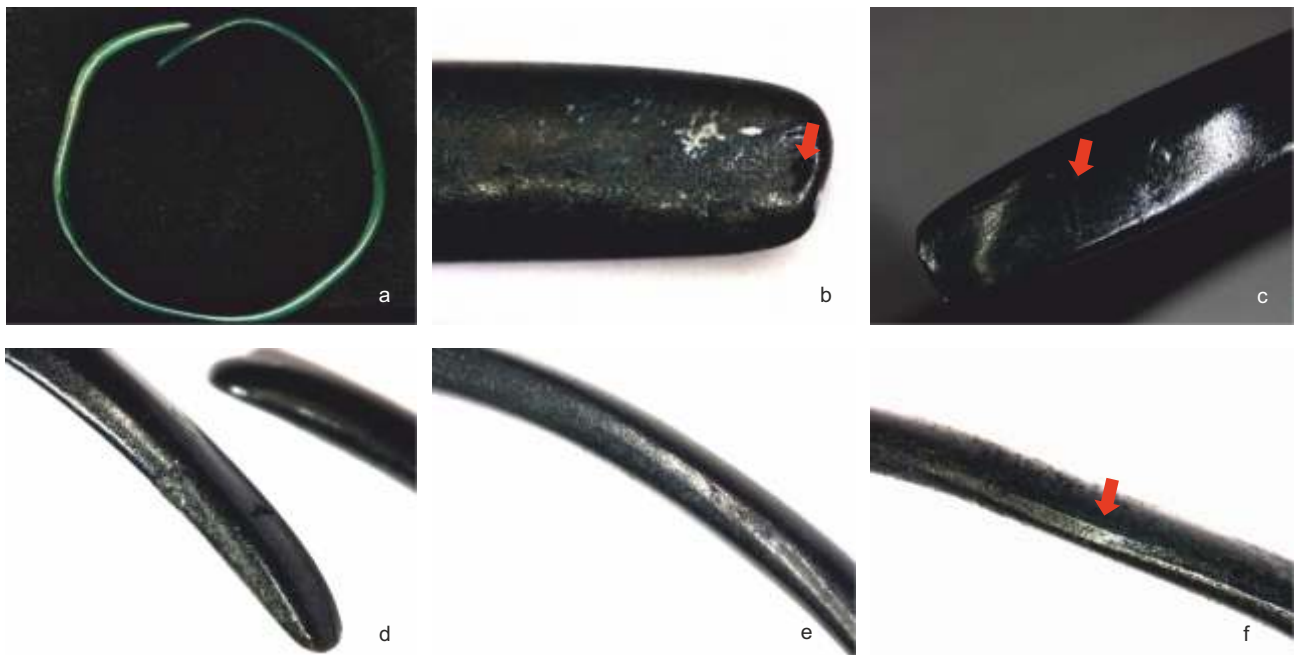


Ryc. 59. Falejówka. Bransoleta (kat. I.7): a – widok ogólny, b-c – obraz rentgenowski CR, d,g – zdobienia odlewane z modelu woskowego, e-f – zdobienia rytowane na gotowym wyrobie, h – przekrój bransolety z widocznym rozwarstwieniem dochodzącym do rdzenia, i – zdobienia odlewane i pogłębiane przez rytowanie oraz pęknięcia warstwy zewnętrznej w wyniku odkształcenia i zmęczenia cieplnego. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)
 Fig. 59. Falejówka. Bracelet (cat. I.7): a – general view, b-c – computer radiography (CR) image, d,g – ornaments cast from the wax model, e-f – engraved ornaments on the ready artefact, h – cross-section of the bracelet with a visible exfoliation reaching the core, i – cast ornaments that were deepened by engraving and cracks of the external layer resulting from deformation and thermal fatigue. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-i)

a na końcach 4,5 mm. Zdobiona jest ornamentem skośnie ułożonych nacięć w części środkowej. Zdobienia skośne mają ostre, wyraźne brzegi i zostały wryte narzędziem typu rylec na gotowym wyrobie pod kątem, aby dopasować je do układu (krzywizny) bransolety. Przy końcach widoczne są zdobienia poprzeczne, głębsze, o zaokrąglonych brzegach, wykonane na modelu woskowym i odtworzone w formie, a następnie pogłębione na gotowym wyrobie poprzez rytowanie. Łagodne, zaokrąglone brzegi jednoznacznie wskazują na wykonanie wzoru w modelu woskowym, który nawet jeśli pierwotnie był wykonany podobnym ostrym narzędziem typu rylec, to w procesie odlewniczym, poprzez pokrycie ornamentu gliną i jej wypalenie, utracił swoje ostre kontury i stał się zaokrąglony oraz nieco płytszy niż w pierwotnym zamierzeniu. Zjawisko to wynika ze specyfiki procesu odlewania w formach glinianych, które mają dobrą odtwarzalność modelu, związana jednak z zatarciem konturów w obszarze dekoracji. Wpływa na to m.in. ziarnistość gliny i piasku oraz innych składników użytych do przygotowania

formy odlewniczej. Pęknięcia poprzeczne przy końcach bransolety są efektem dużych odkształceń plastycznych w trakcie ich zaginania. Skład chemiczny wskazuje na odlanie bransolety z brązu cynowego o zawartości 91,8% miedzi, 5,95% cyny oraz 0,73% arsenu, 0,38% ołowiu, 0,32% antymonu (Tab. 6). W mikrostrukturze w osnowie miedzi potwierdzony został udział cyny, ołowiu, arsenu, antymonu, niklu, żelaza oraz stwierdzona obecność siarki (Ryc. 51; Tab. 9, punkt 1 i 3). Ołów obecny jest w mikrostrukturze w postaci drobnych kulistych wydzielań (punkt 3). Obszary pokryte korozją widoczne są w punkcie 2.

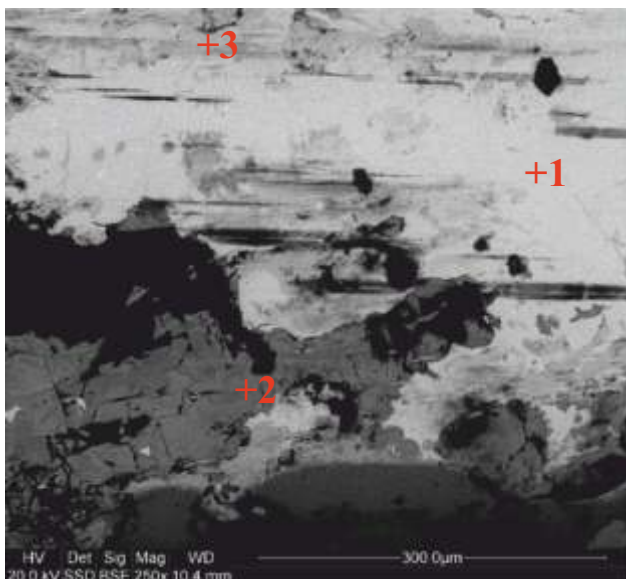
Bransoleta o numerze kat. I.4 została odlana w postaci pręta, a następnie spłaszczona obustronnie przez kucie swobodne, gięta i finalnie zwinięta w obręcz (Ryc. 52). Pokryta jest wzorem geometrycznym, ornamentem skośnie ułożonych nacięć; zdobienia poprzeczne są cienkie i gęsto rytowane na gotowym wyrobie (po spłaszczeniu), dopasowane do krzywizny bransolety; zdobienia skośne są głębsze i szersze, o zaokrąglonych krawędziach, wykonane na modelu wosko-



Ryc. 60. Falejówka. Bransoleta (kat. I.18): a – widok ogólny, b-d – zakończenia bransolety, c-d – widoczne pęknięcia, e – przekrój D-kształtny bransolety przechodzący w prostokątny, f – przekrój prostokątny. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 60. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.18): a – general view, b-d – bracelet terminals, c-d – visible crack, e – D-shaped cross-section of the bracelet, transforming into a rectangular cross-section, f – rectangular cross-section. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

Tab. 10. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla bransolety o nr. kat. I.18 z Falejówki (wt.%)
 Tab. 10. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.18) (wt %)

	O	As	S	Pb	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu	Zn
1	0,0	1,72	0,24	0,34	6,93	0,87	0,59	1,01	87,02	1,08
2	28,31	2,67	0,39	0,23	21,87	1,18	1,07	0,83	42,26	0,70
3	15,92	2,45	0,14	1,38	10,06	1,26	0,72	0,83	66,03	1,18



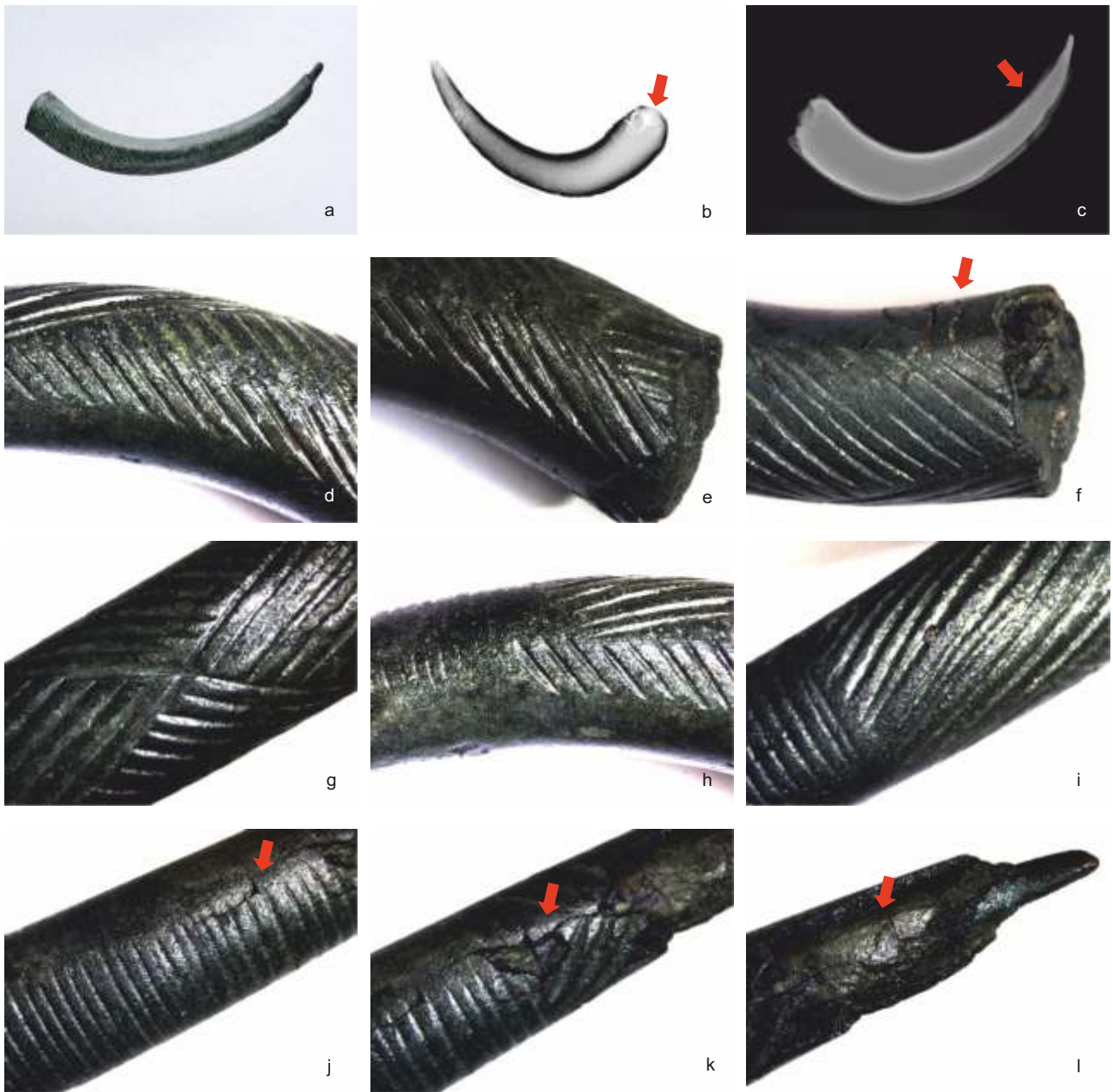
Ryc. 61. Obraz mikroskopu elektronowego dla bransolety z Falejówki (kat. I.18) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 10). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka
 Fig. 61. Electron microscope image for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.18) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 10). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

wym i odtworzone w formie. Jeden koniec zakończony prosto, drugi zaokrąglony. W przekroju poprzecznym pręta podczas zginania wystąpił stan naprężenia, który uwidocznił się w postaci pęknięć (widocznych także na zdjęciach rentgenowskich). Bransoleta wykonana z brązu cynowego o niskiej zawartości cyny (4,39%) oraz udziale 0,48% arsenu, 0,24% ołowiu, 0,20% niklu i 0,15% antymonu (Tab. 6).

Bransoleta o numerze kat. I.5 jest odlewana w postaci obręczy i zagięta z przesunięciem, o czym świadczą liczne pęknięcia poprzeczne (Ryc. 53). Zdobiona jest ornamentem skośnie ułożonych nacięć. Zdobienia poprzeczne, wykonane częściowo w modelu, częściowo ryte już na gotowym wyrobie, są dopasowane do krzywizny i występują przy końcach bransolety. Zdobienia skośnie były rytowane na gotowej bransolecie i występują w jej środkowej partii. Widoczny jest przypadkowy podłużny ślad narzędzia, zapewne błąd powstały przy obróbce wykończeniowej. Pęknięcia są efektem deformacji powstałej na skutek kształtowania plastycznego i naprężeń cieplnych. Zawartość miedzi w bransolecie wynosi 89,2%, cyny – 8,9%, arsenu – 0,6%, ołowiu – 0,3%, antymonu i niklu (Tab. 6).

Bransoleta o numerze kat. I.11 została odlana w postaci pręta i zagięta do kształtu obręczy (Ryc. 54). Przekrój bransolety, okrągły, o średnicy 8 mm, występuje na krótkim odcinku w środkowej części, stanowiąc 1/3 długości pręta. W pozostałej części została ona obustronnie spłaszczona w procesie kucia swobodnego. Ślady kucia widoczne są na obwodzie, w środkowej części.

Dwa końce zostały odmiennie opracowane: na jednym przekrój zbliżony jest do prostokąta o wymia-

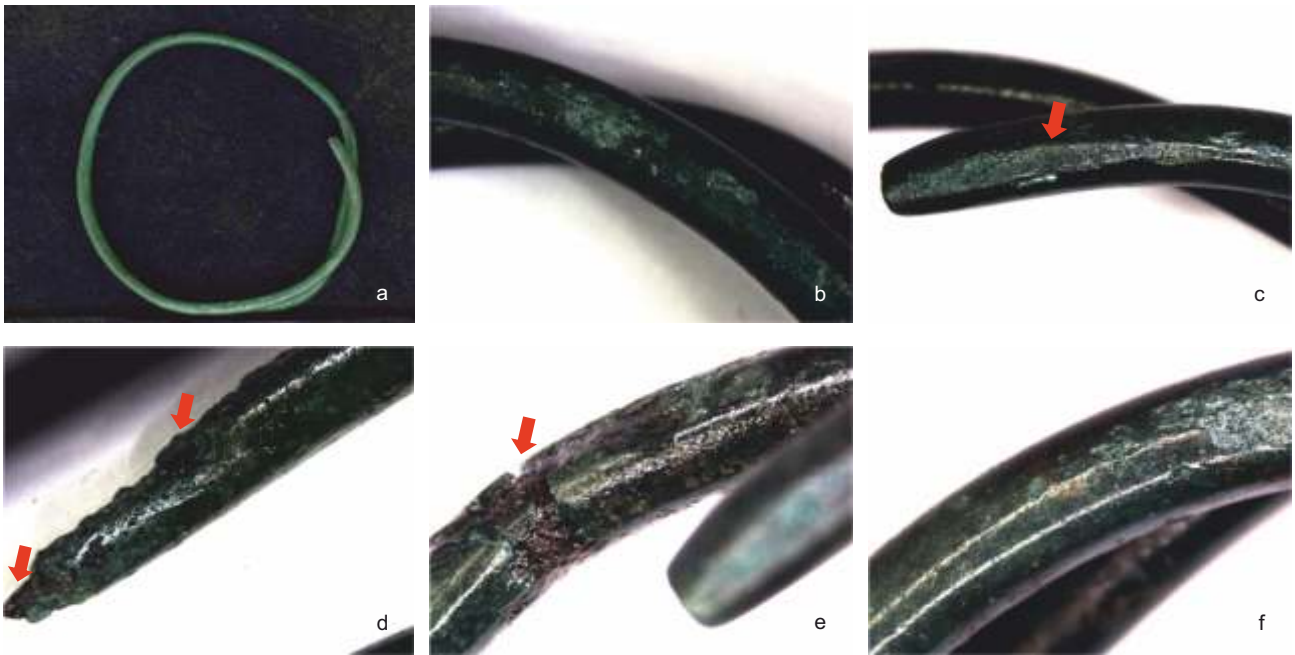


Ryc. 62. Falejówka. Bransoleta (kat. I.9): a – widok ogólny, b-c – obrazy rentgenowskie CR, d-i – dekoracja ukośnie ułożonych nacięć, j-k – zdobienia poprzeczne, f, j-l – pęknięcia i rozwarstwienie w wyniku zmęczenia cieplnego i postępującej korozji. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)
 Fig. 62. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.9): a – general view, b-c – computer radiography (CR) images, d-i – ornament of diagonally arranged incisions, j-k – transverse ornaments, f, j-l – cracks and exfoliation resulting from thermal fatigue and progressing corrosion. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-l)

rach 3×4 mm, na drugim zbliżony do trójkąta. Bransoleta nie jest zdobiona. Na powierzchni zewnętrznej przy końcu bransolety widoczne są porowatości będące wadami odlewniczymi, świadczącymi o kierunku odlewania. W składzie chemicznym wyróżniono 88,9% miedzi, 8,1% cyny, przy równoczesnym udziale 0,97% arsenu, 0,66% ołowiu, 0,58% antymonu, 0,36% niklu i innych (Tab. 6).

Bransoleta o numerze kat. I.10 została odlana w postaci pręta, zagięta po promieniu, a następnie przekuta na płasko po obwodzie do przekroju o wymiarach 7×6 mm (Ryc. 55). Końce zostały zwężone do wymiaru 3×3 mm. Zdobienia w formie poprzecz-

nych rowków, zebranych w grupy po kilka, występują jedynie na zewnętrznym obwodzie bransolety. Są one płytkie i wykonane zostały na modelu woskowym, a następnie odlane wraz z prętem. W wyniku kucia na płasko zostały uszkodzone, ale pogłębiono je przez rytowanie na gotowym wyrobie. Końce bransolety zostały rozwarstwione w wyniku kucia i nagrzewania. Widoczne wady odlewnicze na jednym z końców wskazują kierunek odlewania pręta. Profil chemiczny bransolety wskazuje na brąz cynowy zawierający 91,6% miedzi, 8,5% cyny, podobną ilość innych pierwiastków – 0,2% arsenu i ołowiu, 0,1% niklu i antymonu (Tab. 6).



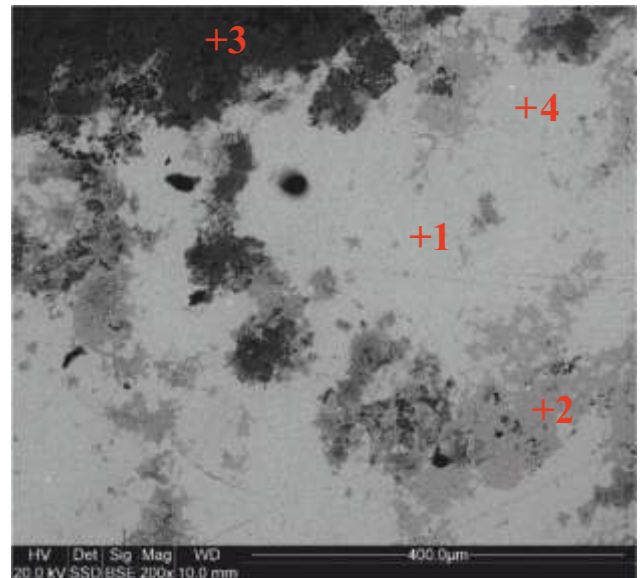
Ryc. 63. Falejówka. Bransoleta (kat. I.19): a – widok ogólny, b, e-f – drut o przekroju okrągłym, c – lekko spłaszczona końcówka, d – końcówka rozwarstwiona w wyniku zmęczenia cieplnego i w wyniku korozji. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 63. Falejówka. Bracelet (cat No. I.19): a – general view, b, e-f – wire with a round cross-section, c – slightly flattened terminal, d – terminal exfoliated in result of thermal fatigue and corrosion. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

Tab. 11. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla bransolety z Falejówki (kat. I.19) (wt.%)
 Tab. 11. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.19) (wt.%)

	O	Sn	Ni	Cu	Pb	As	Sb	Bi
1	0,0	2,66	1,20	91,09	0,50	0,98	0,53	0,00
2	0,0	3,42	0,66	93,61	0,57	1,28	0,45	0,00
3	25,2	6,72	0,58	64,22	0,64	1,38	0,18	0,00
4	0,0	1,18	0,53	32,28	39,37	12,5	0,41	13,7

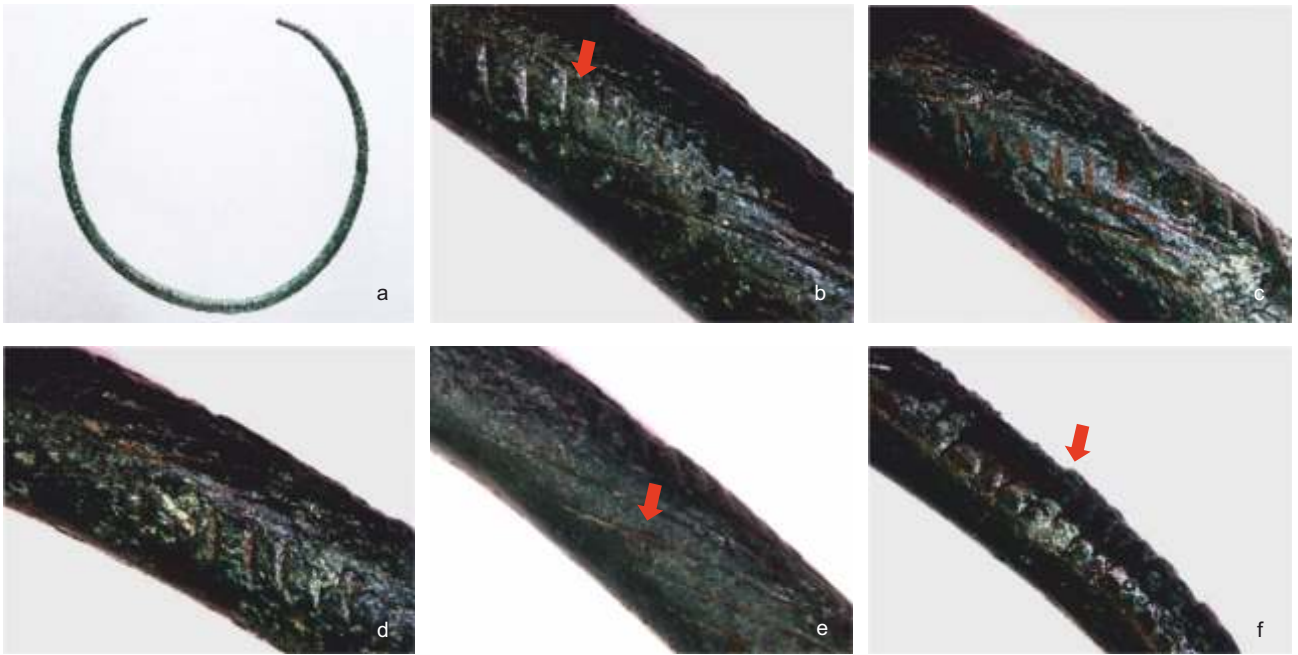
Bransoleta o numerze kat. I.12 została odlana w postaci pręta o średnicy 6,5-7 mm (4 mm na końcach) i zagięta z przesunięciem (Ryc. 56). Nie posiada zdobień. Nacięcie na końcu może świadczyć o próbie opracowania końców na płasko (Ryc. 56:d). Zgrubienie na drugiej końcówce świadczy o próbie jej zaokrąglenia w wyniku kształtowania plastycznego (Ryc. 56:e). Profil chemiczny bransolety wskazuje na zawartość cyny obniżoną do 6,6%, udział miedzi na poziomie 91%, arsenu – 0,8%, ołowiu – 0,6%, antymonu – 0,4%, niklu – 0,3% (Tab. 6).

Bransoleta o numerze kat. I.6 odlana została w postaci obręczy, a jej średnica w najgrubszym miejscu wynosi 11 mm (4 mm na końcach). Charakteryzuje się bogatym zdobieniem, ornamentem ukośnie i poprzecznie ułożonych rowków. Zdobienia na zakończeniach i w środkowej części są skośne, pomiędzy nimi występuje grupa poprzecznych kresek. Ornament jest wykonany częściowo na modelu i odlany w formie, pogłębiany przez rytowanie na gotowym wyrobie. Nie-

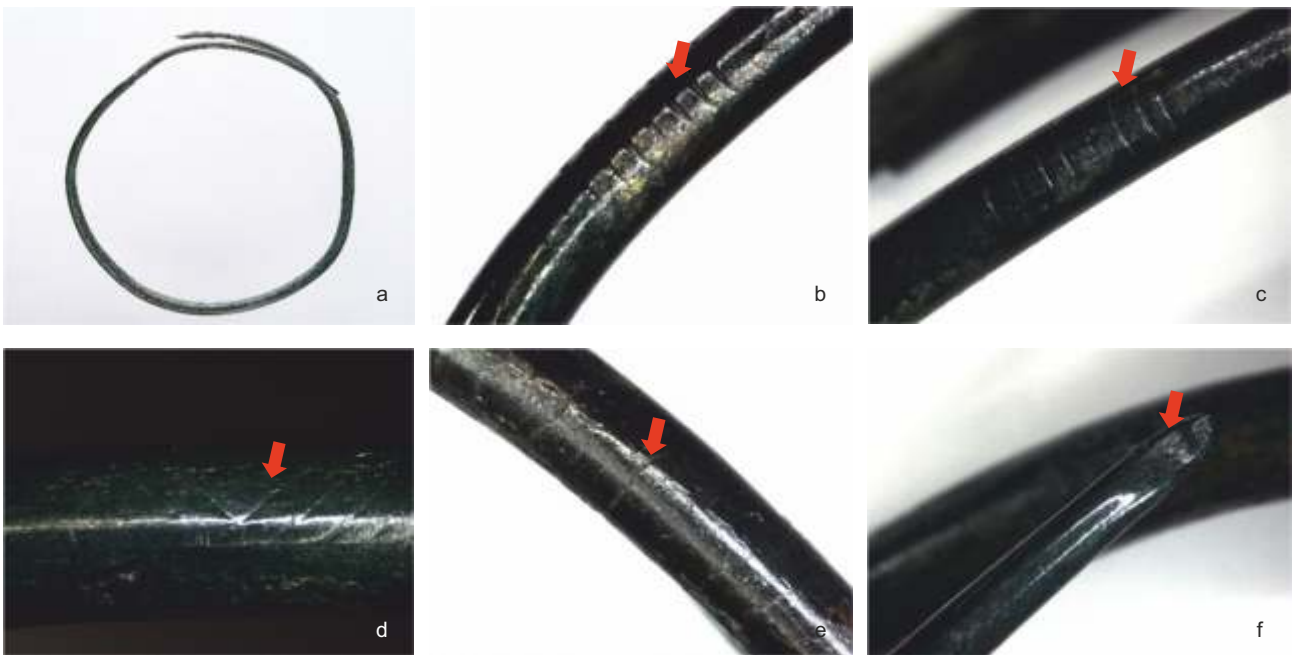


Ryc. 64. Obraz mikroskopu elektronowego dla bransolety z Falejówki (kat. I.19) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 11). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka
 Fig. 64. Electron microscope image for the bracelet from Falejówka (cat. No. I.19) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 11). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

które partie bransolety ozdobione zostały wyłącznie w wyniku rytowania. Końce ozdoby zachodzą na siebie w wyniku zaginania przedmiotu (Ryc. 57). Zawartość cyny w bransolecie jest również obniżona (podobnie jak w przypadku poprzedniego zabytku) i wynosi 5,6%, przy zawartości miedzi 92,7% i nieco niższej zawartości arsenu i ołowiu (0,3%) oraz antymonu (0,2%).



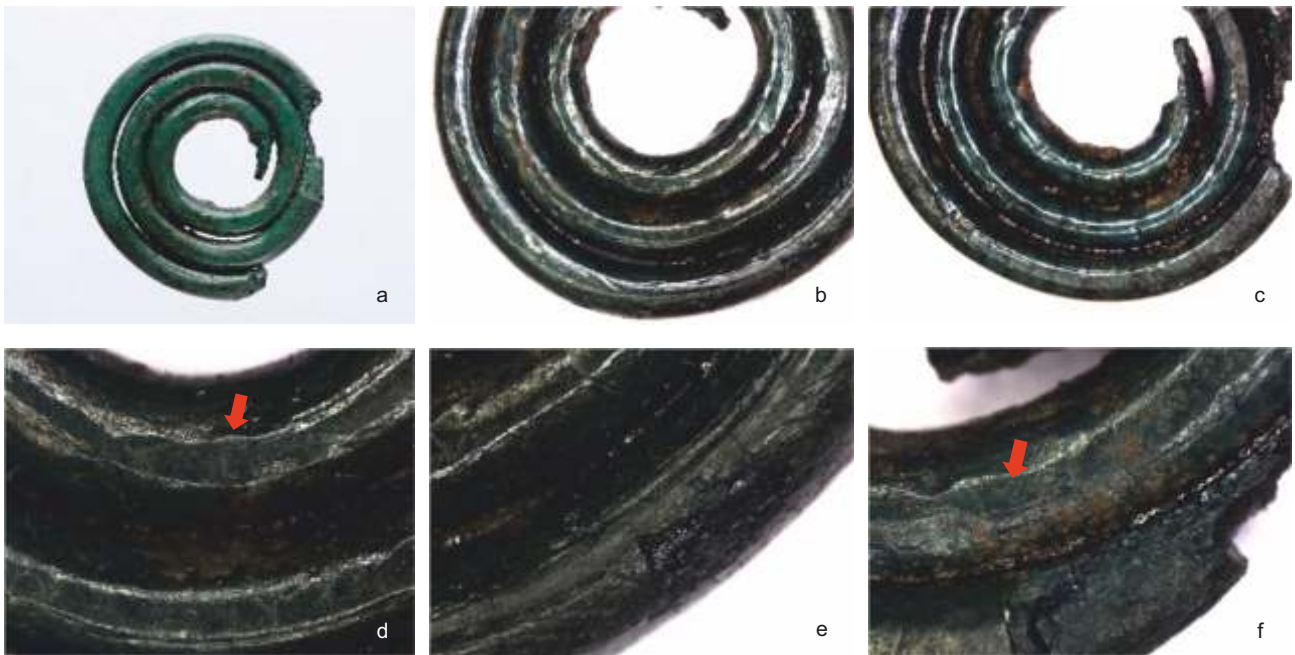
Ryc. 65. Falejówka. Naszyjnik (kat. I.1): a – widok ogólny, b-e – zdobienia skośne nacinane, f – zdobienia poprzeczne odlewane. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 65. Falejówka. Bracelet (cat. No. I.1): a – general view, b-e – diagonal incised ornaments, f – transverse cast ornaments. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)



Ryc. 66. Falejówka. Naszyjnik (kat. I.2): a – widok ogólny, b – zdobienia poprzeczne odlewane, c – zdobienia poprzeczne nacinane, e – pęknięcia poprzeczne, f – rozklepane końce. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 66. Falejówka. Necklace (cat. No. I.2): a – general view, b – transverse cast ornaments, c – diagonal incised ornaments, e – transverse cracks, f – terminals flattened by hammering. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

Bransoleta o numerze kat. I.8 wykonana została techniką odlewniczą w postaci obręczy i podobnie jak inne ozdoby tego samego typu po odlaniu zagięta z przesunięciem (Ryc. 58). Średnica bransolety wynosi maksymalnie 9 mm. Dekorowana ornamentem skośnych i poprzecznie ułożonych nacięć. Zdobienia poprzeczne zgrupowane są w kilku sekwencjach, na zakoń-

czeniu bransolet również występują krótkie, poprzeczne rowki. Zdobienia poprzeczne wykonane zostały częściowo na modelu woskowym i odlane wraz z obręczą, jak również rytowane. Widoczne jest też pogłębianie przez rytowanie rowków poprzecznych. Zdobienia skośne są krótkie, równoległe i zamykają sekwencję żłobień poprzecznych. Zostały wryte już na gotowym wyrobie.



Ryc. 67. Falejówka. Tarczka (kat. I.32): a – widok ogólny, b – zwoje o przekroju okrągłym, c-f – krawędzie spłaszczone w wyniku kucia. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 67. Falejówka. Disc (cat. No. I.32): a – general view, b – coils with a round cross-section, c-f – edges flattened in result of forging. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)



Ryc. 68. Falejówka. Skręt (kat. I.33): a – widok ogólny, b-e – widoczne pęknięcia wzdłużne, d – ślady kształtowania plastycznego na powierzchni, e-f – koniec skręta zniekształcony w wyniku kucia. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 68. Falejówka. Twist (cat. No. I.33): a – general view, b-e – visible longitudinal cracks, d – traces of plastic formation on the surface, e-f – twist terminal deformed in result of forging. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

Bransoleta została przełamana. Widoczne porowatości i pęknięcia poprzeczne występującego blisko przełomu są wynikiem odkształcenia i naprężeń cieplnych, które mogły być przyczyną przełamania bransolety. Pęknięcia poprzeczne i wzdłużne są widoczne na zdjęciach rentgenowskich (Ryc. 58:b-c). Zachowany koniec jest rozwarstwiony w wyniku zmęczenia cieplnego, które

spowodowało pęknięcie warstw powierzchniowych metalu wskutek powtarzających się zmian temperatury i związanych z tym naprężeń. Przejawia się to powstaniem siatki drobnych pęknięć na powierzchni i stopniowym wykruszaniem materiału. Bransoleta zawiera w składzie 90,1% miedzi, 8,7% cyny, 0,4% niklu, 0,3% arsenu, 0,2% antymonu i arsenu (Tab. 6).

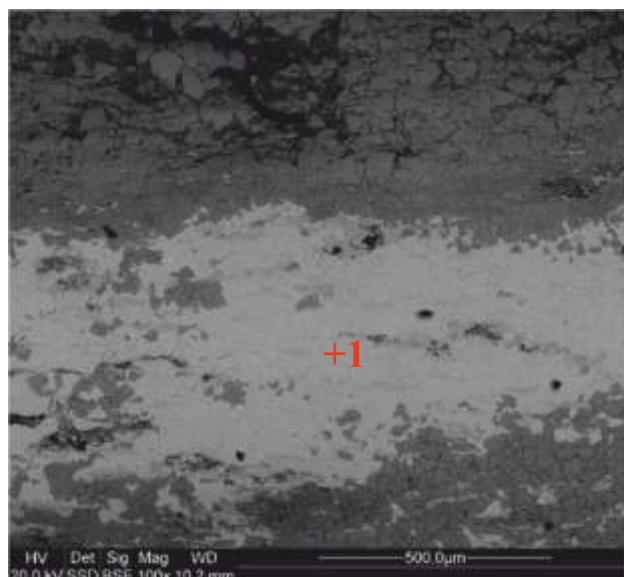
Tab. 12. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla skręta z Falejówki (kat. I.33) (% mas.)

Tab. 12. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the twist from Falejówka (cat. No. I.33) (wt %)

	S	Sn	Ni	Cu
1	0,25	7,19	0,82	91,74

Bransoleta o numerze kat. I.7 została wykonana techniką odlewniczą w postaci obręczy i zapewne zaginana z przesunięciem zakończeń. Następnie została lekko spłaszczona w środkowej części przez kucie swobodne. Zachowana jest tylko fragmentarycznie (Ryc. 59). Maksymalna grubość wynosi 9-10 mm. Bogato ornamentowana w postaci rytów skośnych w środkowej części i poprzecznych, wykonanych częściowo na modelu woskowym, pogłębianych przez rytowanie; dodatkowo też wykonano zdobienia skośne ryte. Pod względem dekoracji bransoleta jest podobna do poprzednio omówionych (kat. I.3 i I.6). Na przełomie widoczne jest rozwarstwienie materiału. Na obrazie rentgenowskim widoczne są zmiany korozyjne. Bransoleta ma profil chemiczny o obniżonej zawartości cyny (4,6%), przy zawartości miedzi (93,4%) i równoczesnym większym udziale pierwiastków pochodzących z rud: 0,6% arsenu, 0,2% antymonu i niklu, 0,5% ołowiu (Tab. 6).

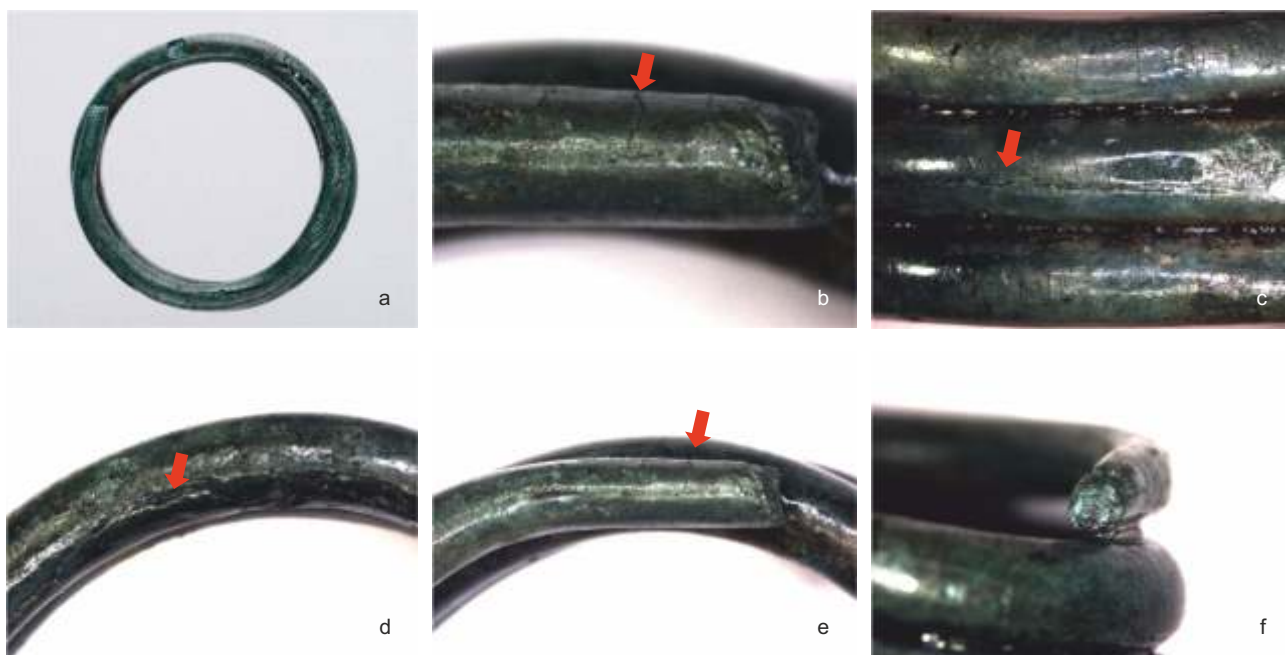
Bransoleta o numerze kat. I.18 wykonana została z drutu o przekroju D-kształtnym o grubości 5 × 2,5 mm, na końcach 4 × 2,5 mm, bez zdobień (Ryc. 60). Okrągły pierwotnie drut został ukształtowany



Ryc. 69. Obraz z mikroskopu elektronowego dla skręta z Falejówki (kat. I.33) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 12). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Fig. 69. Electron microscope image for the twist from Falejówka (cat. No. I.33) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 12). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

przez kucie w kształtowniku o profilu D-kształtnym, w środkowej części spłaszczony. Krawędź boczna w środkowej części jest nieregularna, wyrównywana przez szlifowanie. Końce bransolety zostały zwężone i ścięte również w wyniku kucia. W ostatnim etapie bransoleta nieregularnie została zagięta po promieniu z przesunięciem, do uzyskania efektu zachodzących



Ryc. 70. Falejówka. Skręt (kat. I.34): a – widok ogólny, b – widoczne pęknięcia poprzeczne, c – widoczne pęknięcia poprzeczne i wzdłużne, d – ślady kształtowania plastycznego na powierzchni, e-f – koniec skręta zniekształcony w wyniku kucia. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

Fig. 70. Falejówka. Twist (cat. No. I.34): a – general view, b – visible transverse cracks, c – visible transverse and longitudinal cross-sections, d – traces of plastic formation on the surface, e-f – twist terminal deformed in result of forging. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)



Ryc. 71. Falejówka. Skręt (kat. I.20): a – widok ogólny, b-c – widoczne rozwarstwienie w wyniku zmęczenia cieplnego. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-c)
 Fig. 71. Falejówka. Twist (cat. No. I.20): a – general view, b-c – visible exfoliation in result of thermal fatigue. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-c)

Tab. 13. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla skręta z Falejówki (kat. I.20) (% mas.)
 Tab. 13. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the twist from Falejówka (cat. No. I.20) (wt %)

	S	Sn	Ni	Cu	Pb	Fe	As	Sb	Zn
1	0,10	7,95	0,88	86,78	0,44	0,26	1,62	0,22	0,90

na siebie końców. Widoczne są poprzeczne ślady odkształcenia na obwodzie i na jednym z jej końców. W składzie chemicznym zawiera 85,3% miedzi, 11,5% cyny, 0,7% arsenu, 0,6% antymonu i niklu, 0,5% ołowiu (Tab. 6). W mikrostrukturze potwierdzono obecność w osnowie miedzi: cyny, arsenu, antymonu, żelaza, niklu, cynku i siarki (Ryc. 19; Tab. 5).

Bransoleta o numerze kat. I.9 została odlana metodą wytapianych modeli. Dekorowana jest układem zdobień skośnych i poprzecznych (Ryc. 62). W niektórych partiach zdobienia wykonane zostały na modelu woskowym, głównie jednak powstały przez rytowanie na gotowym wyrobie. Ilustracje odzwierciedlają precyzyjnie wykonany wzór z wykorzystaniem różnych technik i narzędzi: wykonany na modelu woskowym i pogłębiony przez rytowanie, wykonany przecinakiem oraz płytko rytowany przy pomocy ryłka grawerskiego. Widoczne są efekty odkształcenia plastycznego w postaci pęknięć poprzecznych i wzdłużnych oraz rozwarstwienie i wykruszenie warstwy zewnętrznej bransolety na skutek zmęczenia cieplnego powstałe w wyniku zaginania i wielokrotnego nagrzewania. Pęknięcia i rozwarstwienie dostrzegalne są także na obrazach rentgenowskich. Bransoleta została odlana z brązu cynowego, w którym zawartość miedzi wynosi 90,1%, 8,2% cyny, 0,4% arsenu i niklu, 0,3% antymonu i ołowiu (Tab. 6).

Bransoleta o numerze kat. I.19 została ukształtowana z drutu o przekroju okrągłym; drut został w środkowej części lekko obustronnie spłaszczony w wyniku kucia swobodnego. Do postaci bransolety drut został zawinięty nieregularnie po promieniu, ze znacznym przesunięciem zakończeń. Końce zostały ścięte (Ryc. 63). Bransoleta zawiera 92,4% miedzi,



Ryc. 72. Obraz mikroskopu elektronowego dla skręta brązowego z Falejówki (kat. I.20) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 13). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

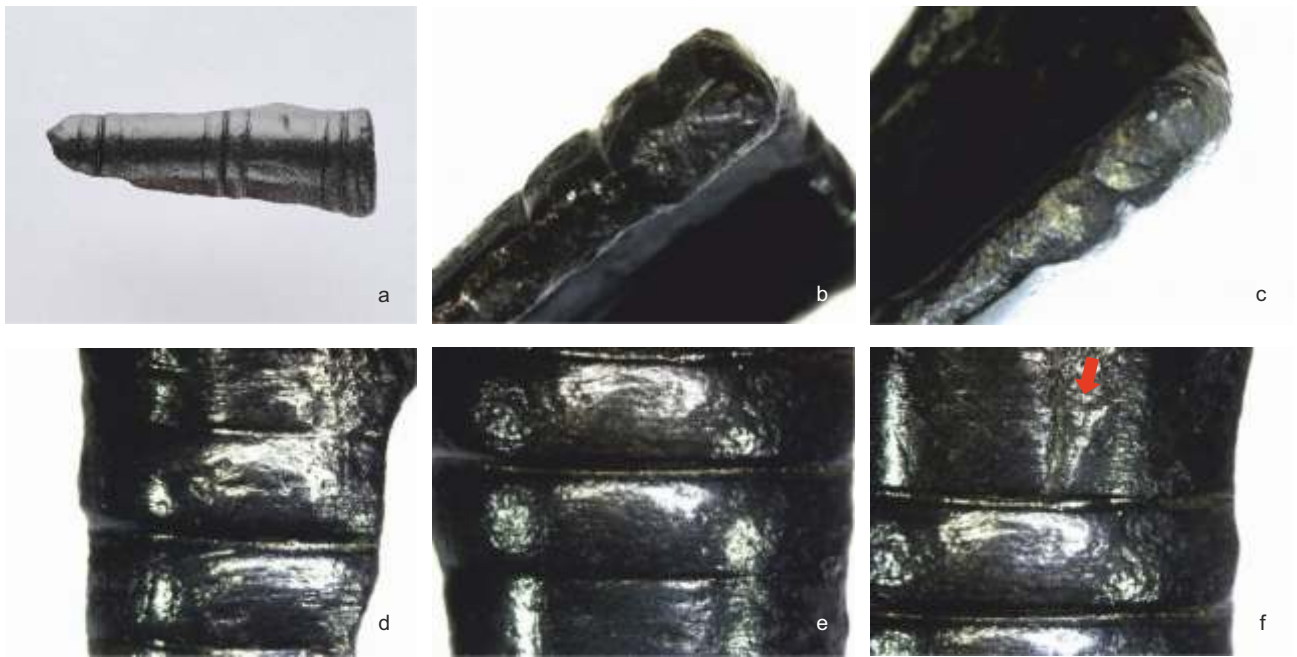
Fig. 72. Electron microscope image for the bronze twist from Falejówka (cat. No. I.20) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 13). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

5,4% cyny, 0,6% arsenu, 0,5% niklu, 0,2% antymonu, ołowiu i bizmutu (Tab. 6).

W mikrostrukturze (Ryc. 64; Tab. 11) w punktach 2 i 3 zidentyfikowano cynę w osnowie miedzi oraz dodatki w postaci arsenu, antymonu, niklu i ołowiu. Punkty 1 i 4 pokryte są produktami korozji o charakterze tlenków miedzi.

Analizie i obserwacji poddano dwa naszyjniki wykonane z pręta o przekroju okrągłym.

Naszyjnik o numerze kat. I.1 został odlany w postaci niedomkniętej obręczy o średnicy pręta 8 mm i końcach zwązających się do 3,5 mm średnicy (Ryc. 65). Zdobiony jest ornamentem skośnie ułożonych nacięć. W środkowej partii naszyjnika zdobienia skośne są gęste, naniesione przez rytowanie pod różnymi kątami po zewnętrznej stronie naszyjnika. Przy końcach zdobienia poprzeczne są równoległe, również naniesio-



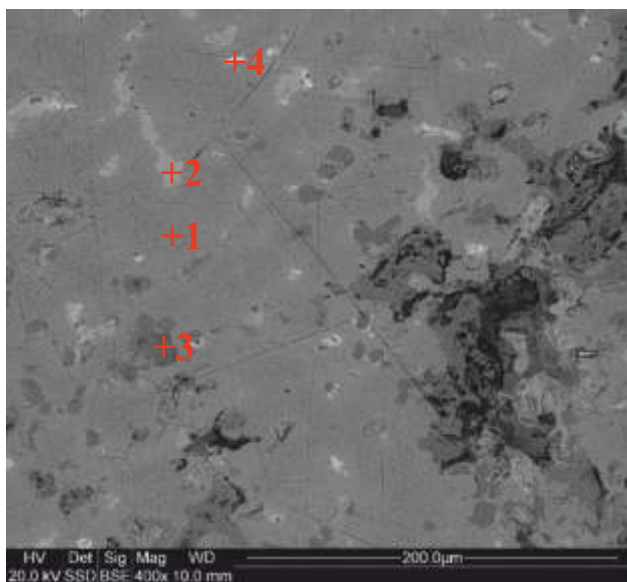
Ryc. 73. Falejówka. Fragment tutei grotu (kat. I.38): a – widok ogólny, b-e – ścianka tutei, f – powierzchnia tutei z widocznymi wadami odlewniczymi. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

Fig. 73. Falejówka. Fragment of the spearhead's socket (cat. No. I.38): a – general view, b-e – socket's wall, f – socket's surface with visible casting defects. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

Tab. 14. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla tutei grotu z Falejówki (kat. I.38) (% mas.)

Tab. 14. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the spearhead's socket from Falejówka (cat. No. I.38) (wt %)

	O	As	S	Pb	Ag	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu
1	0,0	1,60	0,27	0,69	0,27	0,00	3,14	1,85	1,12	91,05
2	0,0	1,17	0,23	0,76	1,46	0,43	2,676	1,01	2,15	66,01
3	16,40	2,48	0,68	4,25	0,00	0,28	9,42	5,60	0,70	60,20
4	0,0	0,83	1,12	65,70	0,25	0,21	1,68	1,00	0,61	28,61



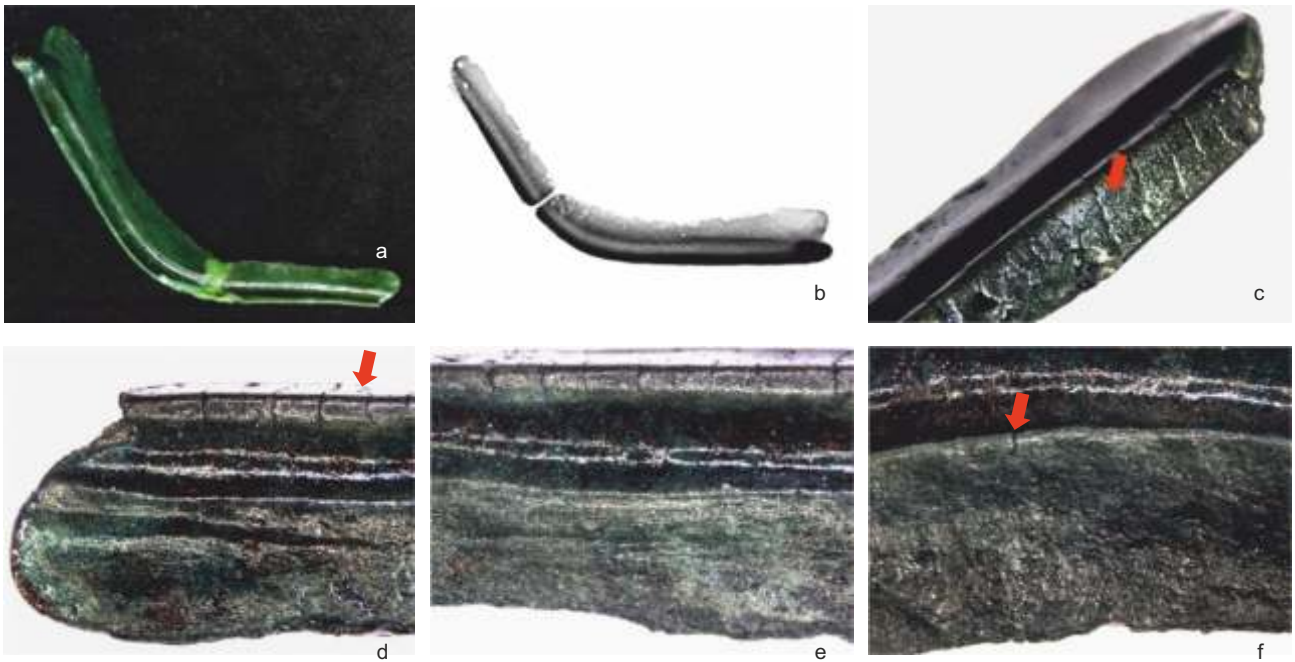
Ryc. 74. Obraz z mikroskopu elektronowego dla tutei grotu z Falejówki (kat. I.38) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 14). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Fig. 74. Electron microscope image for the spearhead's socket from Falejówka (cat. No. I.38) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 14). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

ne po zewnętrznej stronie naszyjnika. Te ostatnie wykonane zostały na modelu woskowym i odtworzone z formy na powierzchni naszyjnika. Profil chemiczny wskazuje na zastosowanie brązu cynowego o niskiej zawartości cyny (5,4%), 93,5% miedzi oraz niewielkiej ilości naturalnych dodatków: 0,2% arsenu i antymonu, 0,1% ołowiu i niklu (Tab. 6).

Naszyjnik o numerze kat. I.2 wykonany został z pręta o przekroju okrągłym o średnicy 7 mm. Końce zostały rozklepane do grubości 2 mm (Ryc. 66). Zdobienia skośne widoczne w środkowej części naszyjnika powstały przez rytowanie. Zdobienia poprzeczne, głębokie, widoczne na końcach, zostały częściowo wykonane na modelu w procesie odlewania, częściowo natomiast ryte na gotowym wyrobie. Od wewnętrznej strony widoczne są pęknięcia poprzeczne powstałe w wyniku zaginania pręta po promieniu w ostatniej operacji, aż do etapu zachodzących na siebie końców. Jeden z końców został wykruszony w wyniku odkształcenia i zmęczenia cieplnego powstałych w czasie zaginania i nadmiernego wygrzewania naszyjnika. Profil chemiczny naszyjnika wskazuje na zastosowanie brązu cynowego o zawartości: 91,6% miedzi, 6,7% cyny, 0,5% niklu, 0,4% antymonu i 0,3% arsenu, 0,2% ołowiu (Tab. 6).

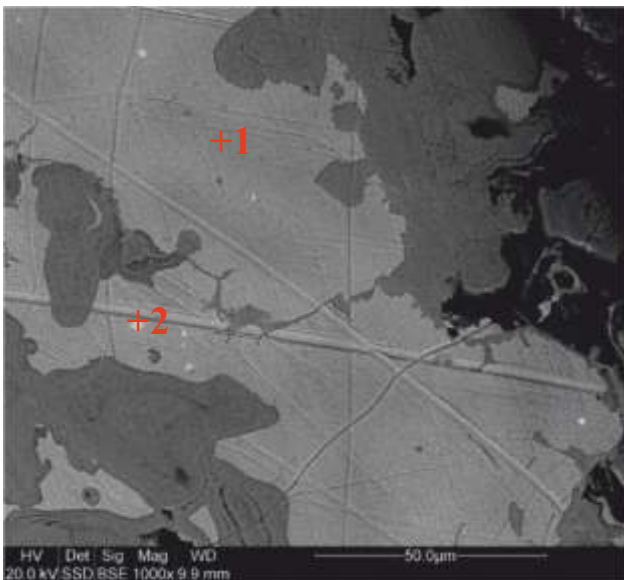
Tarczka spiralna o numerze kat. I.32 wykonana została z drutu o średnicy 2 mm, zwężającego się ku środkowi, o przekroju okrągłym. Ślimacznice tarczki wykonano poprzez zaginanie drutu wokół osi. W ostatniej operacji tarczka została obustronnie spłaszczona w wyniku kucia (Ryc. 67). Ślady tej operacji są widoczne także na powierzchni tarczki, w zwoju środkowym



Ryc. 75. Falejówka. Sierp (kat. I.36): a – widok ogólny, b – obraz rentgenowski CR, c – brzeg sierpa, d-e – przestrzennie ukształtowana strona wierzchnia wzmocniona podwójnym uźebrowaniem z widocznymi pęknięciami, f – ostrze sierpa. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Długosz (b), P. Jurecki (c-f)
 Fig. 75. Falejówka. Sickle (cat. No. I.36): a – general view, b – computer radiography (CR) image, c – sickle's edge, d-e – spatially shaped upper part reinforced with double ribbing, visible cracks are present, f – sickle's cutting edge. Photos M. Wardas-Lasoń (a), P. Długosz (b), P. Jurecki (c-f)

Tab. 15. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla sierpa z Falejówki (kat. I.36) (% mas.)
 Tab. 15. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the sickle from Falejówka (cat. No. I.36) (wt %)

	As	S	Pb	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu	Zn
1	0,44	0,23	0,51	0,25	3,97	0,29	0,35	92,54	0,48
2	0,94	0,66	39,97	4,53	0,34	0,45	0,56	52,15	0,40

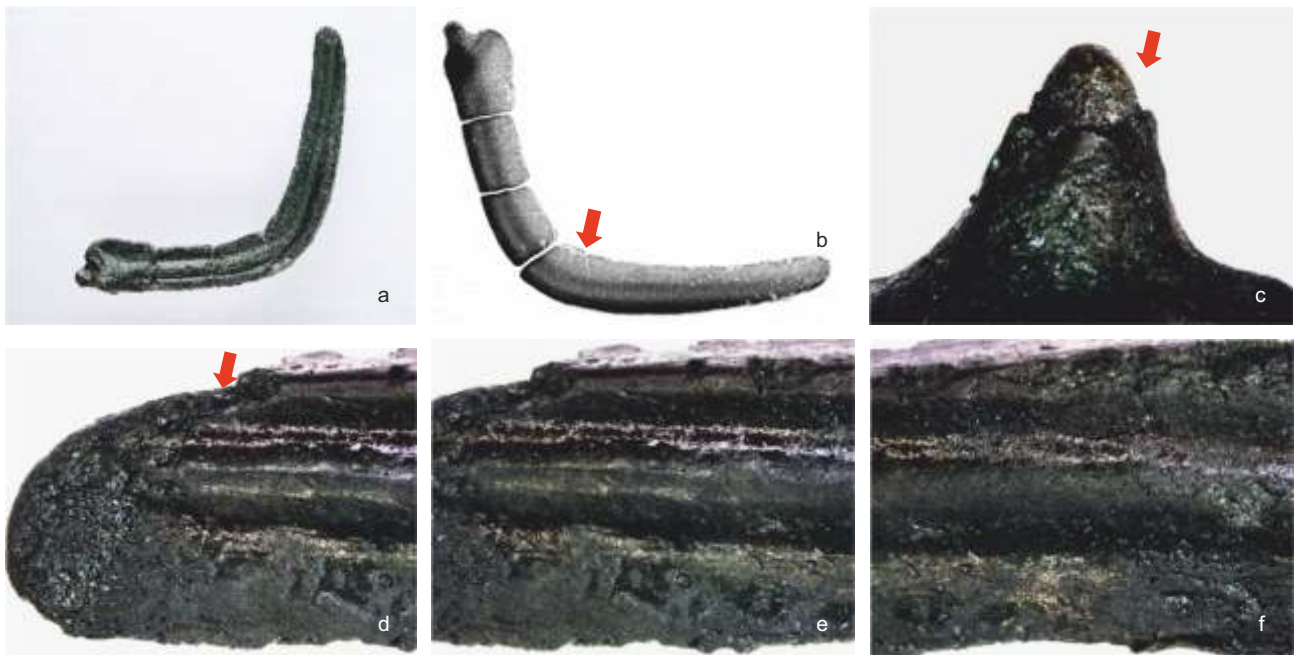


Ryc. 76. Obraz z mikroskopu elektronowego dla sierpa z guzkiem z Falejówki (kat. I.36) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 15). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka
 Fig. 76. Electron microscope image for the sickle with a knob from Falejówka (cat. No. I.36) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 15). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

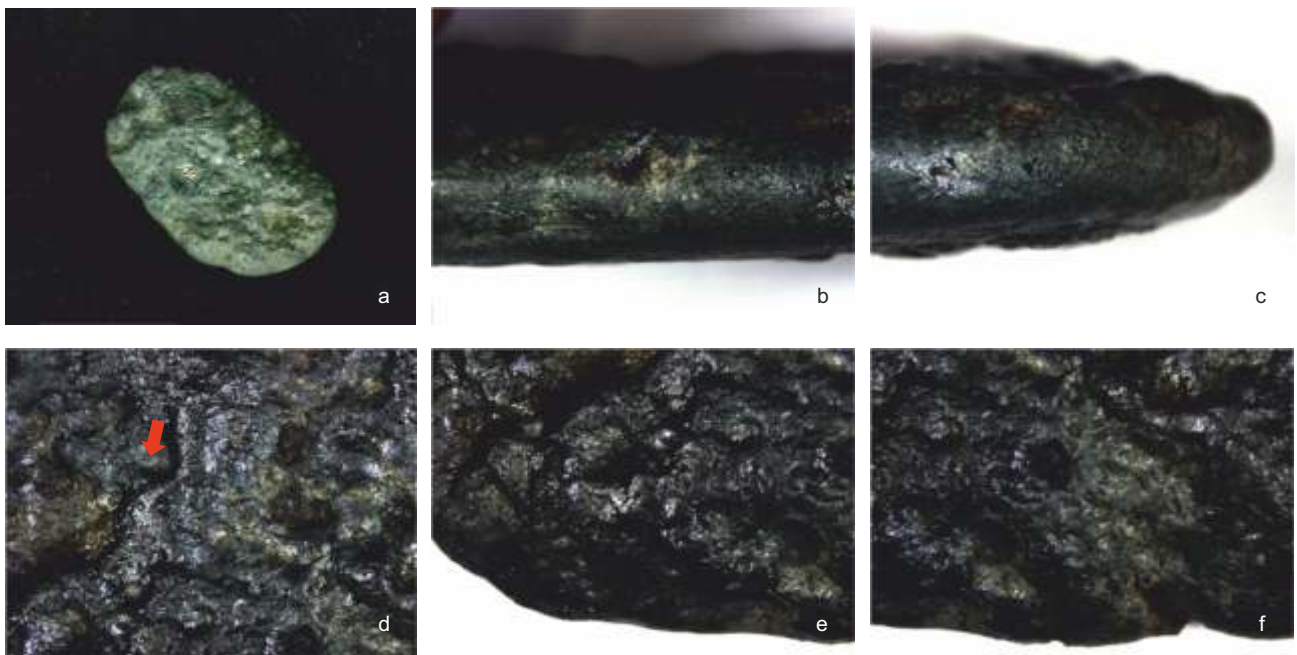
i zewnętrznym. Koniec wewnętrzny tarczki jest prosty i stanowił miejsce krępowania podczas skręcania. Skład chemiczny dowodzi zastosowania brązu cynowego o zawartości 90,2% miedzi, 8% cyny, 0,6% arsenu, 0,3% antymonu, niklu i ołowiu (Tab. 6).

Skret brązowy o numerze kat. I.33 został wykonany z drutu o przekroju płasko-wypukłym (Ryc. 68), o wymiarach $2,5 \times 4$ mm. W składzie zidentyfikowano: 89,2% miedzi, 9% cyny, 0,5% niklu, 0,4% arsenu, 0,3% antymonu i ołowiu (Tab. 6). W mikrostrukturze zidentyfikowano obecność miedzi, cyny, niklu oraz siarczków, świadczących o pochodzeniu miedzi z rud siarczkowych (Ryc. 69; Tab. 12).

Skret brązowy o numerze kat. I.34 wykonany został z drutu o przekroju okrągłym, zwężającego się ku końcowi do połowy grubości, na końcu rozwarstwowanego w procesie kucia (Ryc. 70). Rozwarstwienie może też powstać w wyniku obecności w materiale odkuwki jamy skurczowej lub porowatości. Obecne na powierzchni ślady mogą być efektem przeciągania drutu i mogą tym samym stanowić pośredni dowód na znajomość drutownicy w epoce brązu na ziemiach polskich (por. uwagi Andrzejowska *et al.* 2021). Widoczne pęknięcia poprzeczne i wzdłużne powstały w wyniku kształtowania plastycznego, w tym zwiwania skreta. Pęknięcia i rysy mogą też powstać w wyniku zbyt niskiej temperatury kucia (gdy występuje bardzo duże umocnienie materiału) oraz zbyt gwałtownego chłodzenia po rekrytalizacji, które może wywołać powstanie dużych naprężeń cieplnych w materiale i w efekcie lokalną dekohezję stopu. Miejsce krępowania na końcu skreta pozostało proste. W stopie zi-



Ryc. 77. Falejówka. Sierp (kat. I.37): a – widok ogólny, b – obraz rentgenowski CR, c – stożkowy rozwarstwiony guzek, d-f – przestrzennie ukształtowana strona wierzchnia wzmocniona uźebrowaniem. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b), P. Jurecki (c-f)
 Fig. 77. Falejówka. Sickle (cat. No. I.37): a – general view, b – computer radiography (CR) image, c – conical exfoliated knob, d-f – spatially shaped upper part reinforced with ribbing. a – photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b), P. Jurecki (c-f)



Ryc. 78. Falejówka. Placek brązowy (kat. I.39): a – widok ogólny, b-c – bok, d-f – powierzchnia swobodnego krzepnięcia. Fot. M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 78. Falejówka. Bronze clump (cat. No. I.39): a – general view, b-c – side, d-f – surface of free solidification. Photo M. Wardas-Lasoń (a), P. Jurecki (b-f)

dentyfikowano zawartość 85,4% miedzi, 12,3% cyny, 0,7% arsenu, 0,4% antymonu i ołowiu, 0,2% niklu i srebra (Tab. 6).

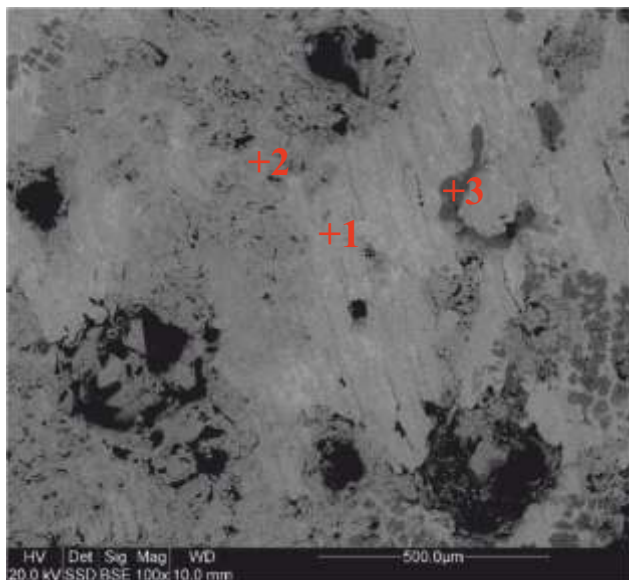
Skręt brązowy o numerze kat. I.20 wykonany został z drutu o przekroju okrągłym i płasko-wypukłym przy końcach. Widoczne rozwarstwienie, zwłaszcza przy końcach, jest wynikiem kucia i nierównomiernego nagrzewania materiału (Ryc. 71). Skręt wykonano

z brązu cynowego o zawartości 84,7% miedzi, cyny podwyższonej do 12%, 1,2% ołowiu, 0,7% arsenu, 0,5% niklu, 0,3% antymonu (Tab. 6). W mikrostrukturze zidentyfikowano cynę w osnowie miedzi w ilości ok. 8% oraz dodatki naturalne, jak nikiel, ołów, arsen, antymon, cynk oraz siarkę jako pozostałość procesów metalurgicznych przeróbki z rud siarczkowych (Ryc. 72; Tab. 13).

Tab. 16. SEM-EDS. Analiza składu chemicznego w mikroobszarach dla placka brązu z Falejówki (kat. I.39) (% mas.)

Tab. 16. SEM-EDS. Analysis of the chemical composition in micro-zones for the bronze clump from Falejówka (cat. No. I.39) (wt%)

	O	As	S	Pb	Ag	Sn	Sb	Fe	Ni	Cu
1	0,00	3,09	0,34	3,90	1,07	23,84	6,15	0,38	0,65	60,58
2	0,00	1,79	0,15	0,89	0,25	3,19	0,79	0,33	0,46	92,15
3	34,65	1,41	0,11	1,00	0,30	1,93	0,58	0,53	1,07	58,42



Ryc. 79. Obraz mikroskopu elektronowego dla placka brązu z Falejówki (kat. I.39) wraz z analizą składu chemicznego w mikroobszarach (Tab. 16). Oprac. M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Fig. 79. Electron microscope image for the bronze clump from Falejówka (cat. No. I.39) with the analysis of the chemical composition in micro-zones (Tab. 16). Processing M. Wardas-Lasoń, A. Garbacz-Klempka

Analiza fragmentu tulei grotu (kat. I.38) świadczy o zastosowaniu do jego wykonania techniki odlewniczej (Ryc. 73). Grubość ścianki tulei wynosi 2-4 mm (4 mm przy wlocie tulei). Widoczne są poprzeczne żeberka mające na celu wzmocnienie ścianek tulei. Tuleja została odlana w formie dzielonej, z rdzeniem, odtwarzającym wewnętrzną część odlewu. Skład chemiczny tulei jest nietypowy i charakteryzuje brąz wieloskładnikowy. Zawartość cyny w stopie jest niewielka – wynosi zaledwie 0,3%, natomiast udział antymonu oceniono na poziomie 5,8%, a ołowiu – 3,3%. Udział

arsenu jest również podwyższony do 1,8%. Udział niklu wynosi 0,6% i srebra – 0,3% w stosunku do zawartości miedzi – 86,2% (Tab. 6). Mikrostruktura stopu jest wielofazowa i potwierdza niewielki udział cyny na rzecz dodatków naturalnych pochodzących z rud (Ryc. 74; Tab. 14). W punkcie 1 wskazano roztwór stały o maksymalnej zawartości miedzi 91,1%. W punkcie 2 wskazano fazę międzymetaliczną ze znacznym udziałem miedzi i antymonu oraz towarzyszeniem pozostałych pierwiastków. W punkcie 4 wykazano z kolei wydzielanie ołowiu na poziomie 65,7%. Punkt 3 wskazuje obecność produktów korozji o charakterze tlenków.

Sierp z guzkiem (kat. I.36) został odlany w formie dzielonej, odtwarzając spodnią część płaską i wierzchnią przestrzennie ukształtowaną (Ryc. 75). Charakteryzuje się stosunkowo wydatną krawędzią zewnętrzną grzbietu. Podwójne żeberko wzmacniające ostrze biegnie na całej krzywiznie sierpa. Guzek pełni funkcję konstrukcyjną dla zamocowania drewnianej rękojści. Układ wlewy w pobliżu ostrza został usunięty, a miejsce po nim obrobione. Na brzegu sierpa widoczne są równoległe pęknięcia, świadczące o występującym zmęczeniu cieplnym, obecnym z racji podgrzewania w czasie operacji przekucia ostrza. Na zdjęciu rentgenowskim widoczne są drobne porowatości odlewnicze i obszary zmienione korozyjnie. Profil chemiczny wskazuje na brąz cynowy o zawartości 90,6% miedzi, 7,9% cyny, 0,4% arsenu, 0,3% antymonu i niklu, 0,2% ołowiu (Tab. 6).

W mikrostrukturze (Ryc. 76; Tab. 15) w punkcie 1 zidentyfikowano obecność 4% antymonu, 0,4% arsenu, 0,5% niklu i ołowiu, 0,3% cyny i żelaza w osnowie miedzi. Uwagę zwracają białe niewielkie wydzielania ołowiu widoczne w punkcie 2 o zawartości 40% ołowiu i podwyższonej do 4,5% ilości cyny, 0,9% arsenu, 0,6% niklu.

Sierp z guzkiem o numerze kat. I.37, z wydatną krawędzią zewnętrzną w linii dość silnie wygiętego grzbietu i z dwoma żeberkami wzmacniającymi ostrze (Ryc. 77). Płaska spodnia strona i przestrzennie ukształtowana strona wierzchnia dowodzą zastosowania technologii odlewniczej, odlewania do form dzielonych trwałych lub półtrwałych, np. kamiennych. Guzek stożkowy stanowi element konstrukcyjny przy zamocowaniu drewnianej rękojści. Specyficzny wygląd korozyjnie zmie-



Ryc. 80. Falejówka. Brązowy ochraniacz szpili (kat. I.31): a – widok ogólny; b-c – detale. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-c)

Fig. 80. Falejówka. Bronze pin protector (cat. No. I.31): a – general view; b-c – details. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-c)

nionego guzka z odsłoniętym rdzeniem może świadczyć o wielokrotnym podgrzewaniu materiału w czasie operacji przeróbki plastycznej, w celu przekucia ostrza. W pobliżu ostrza widoczna jest pozostałość układu wlewowego, doprowadzającego ciekły stop do wnętrza wneki formy. Skład chemiczny sierpa klasyfikuje go do grupy brązów cynowych, gdyż zawiera 86,7% miedzi, 11% cyny, 0,8% ołowiu, 0,6% arsenu, 0,4% antymonu, 0,1% niklu, cynku i srebra (Tab. 6). Na zdjęciu rentgenowskim widać niewielkie porowatości odlewnicze (Ryc. 77:b).

Placek brązu o numerze kat. I.39 jest tzw. odpadem produkcyjnym, niewielkim i bezkształtnym, a więc powstałym raczej przypadkowo niż celowo uformowanym (Ryc. 78). Charakteryzuje się tym, że jest płaski od spodu, natomiast od góry widoczna jest powierzchnia swobodnego krzepnięcia, co oznacza, że zastygał swobodnie na płaskiej powierzchni. Może stanowić tzw. złom własny, inaczej złom obiegowy wykorzystywany w warsztacie odlewniczym, będąc np. ostatnią porcją metalu wylaną z tygla. Zawartość cyny wynosi 11,5%, 2% ołowiu, 1,9% antymonu, 0,7% arsenu, 0,3% niklu i srebra w stosunku do 83% miedzi (Tab. 6). W mikroobszarach (Ryc. 79; Tab. 16) zidentyfikowano fazy z różną zawartością cyny: 23,8% cyny, 3,9% ołowiu, 3,1% arsenu i 6,2% antymonu (w punkcie 1) oraz 3,2% cyny, 1,8% arsenu, 0,8% antymonu, 0,5% niklu w osnowie 92,5% miedzi w punkcie 2 (Ryc. 79). W obu przypadkach widoczne są też siarczki miedzi i żelaza jako pozostałości minerałów miedzi po procesie metalurgicznym. W punkcie 3 zidentyfikowano produkty korozji miedzi o charakterze tlenków.

Ułamek ochroniacza końca szpili (kat. I.31) został odlany w formie dwuczęściowej z rdzeniem (Ryc. 80). Wskazuje na to widoczna linia podziału formy, obrobiona przez szlifowanie. Skład chemiczny wskazuje na wykorzystanie brązu cynowego o zawartości: 84,7% miedzi, 11,1% cyny, 2,6% antymonu, 0,7% arsenu, 0,3% niklu, 0,2% ołowiu (Tab. 6). Skład chemiczny zbliżony jest do placka brązu z wyjątkiem ołowiu, który w przypadku placka został wprowadzony intencjonalnie.

Stopy i zanieczyszczenia w stopach

Zestawienie wyników składu chemicznego zabytków ze skarbu z Falejówki na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.) przedstawiono w Tab. 6. Opracowanie statystyczne wyników: wartości minimalne, maksymalne, obliczoną średnią, medianę oraz odchylenie standardowe zawarto w Tab. 17. Rozkład wyników w postaci histogramów pokazuje częstotliwość występowania danej zawartości pierwiastka (Ryc. 81-90). Na wykresach osobno przedstawiono charakterystykę stopów bransolet, stanowiących największą badaną grupę, omawiając je na tle skarbu wyrobów metalowych z Falejówki.

Pod względem profilu chemicznego stopu wszystkie bransolety należą do grupy brązów cynowych dwuskładnikowych układu Cu-Sn. Podstawowym składnikiem stopu bransolet jest miedź w zakresie 84,8-94% (Ryc. 81), podczas gdy zawartość miedzi w całym skarbie zanizła placek brązu (kat. I.39) z ilością miedzi na poziomie 83% (Ryc. 82). Największą zawartość miedzi odnotowano dla jednej z bransolet (kat. I.4). Średnia zawartość miedzi wynosi 89,65%, natomiast mediana, czyli wartość środkowa zbioru, wynosi 90,37% (Tab. 17).

Zawartość cyny jako dodatku stopowego wynosi w zabytkach ze skarbu 0,3-12,3% Sn, w tym największą ilość cyny zawiera skręt brązowy (kat. I.34), a fragment grotu (kat. I.38) nie zawiera jej wcale (0,3%) (Ryc. 84). Średnia dla zawartości cyny w wyrobach z Falejówki II wynosi 7,94% i tyle samo wynosi mediana. Wśród bransolet dominują okazy z zawartością cyny 5-7% (Ryc. 83). Podwyższoną wartością cechuje się bransoleta o numerze kat. I.16 (11,5% Sn) oraz dwa pojedyncze obiekty: placek brązu (kat. I.39) (11,5% Sn) i ochroniacz końca szpili (kat. I.31) (11,1% Sn).

Arsen i antymon należą do pierwiastków charakterystycznych, obecnych w rudach miedzi. Ich poziom w badanych stopach wynosi kolejno dla arsenu 0,2÷1,8% (średnia 0,58% As i mediana, czyli wartość środkowa zbioru – 0,59% As). W bransoletach większość wartości arsenu koncentruje się w przedziale 0,2-0,5%, zauważalnie większą ilość (1,1% As) zawiera jedna z bransolet (kat. I.16) (Ryc. 85). Maksymalną zawartość arsenu (1,8% As) zarejestrowano dla tulei grotu (kat. I.38) (Tab. 17; Ryc. 86).

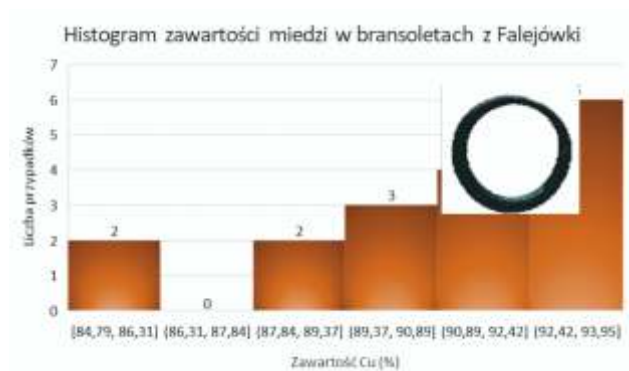
Zawartość antymonu w wyrobach w znacznej większości przypadków nie przekracza 0,5%. Stąd mediana wynosi 0,3% Sb, a średnia, uwzględniająca także pojedyncze wartości wyższe, wynosi 0,63% Sb. Największy udział antymonu wynosi aż 5,8% i jest charakterystyczny dla tulei grotu (kat. I.38) (Tab. 6 i 17; Ryc. 88). Podwyższone zawartości, kolejno 1,9% i 2,6%, odnotowano ponadto dla ochroniacza końca szpili (kat. I.31) i placka brązu (kat. I.39).

Do grupy pierwiastków śladowych pochodzących z rud miedzi należą też nikiel, cynk, srebro i żelazo. Nikiel jest obecny w wyrobach w zakresie 0,1÷0,6% (średnia 0,32%, mediana 0,29% Ni), cynk 0,11÷0,53% (średnia 0,15%, mediana 0,14% Zn). Srebro obecne jest w badanych stopach jako dodatek naturalny i zidentyfikowane w badanym skarbie na poziomie 0,02÷0,29% (średnia 0,08%, mediana 0,06% Ag). Najwięcej srebra zawiera placek brązu (kat. I.39) (0,3%) i tuleja grotu (kat. I.38) (0,24%).

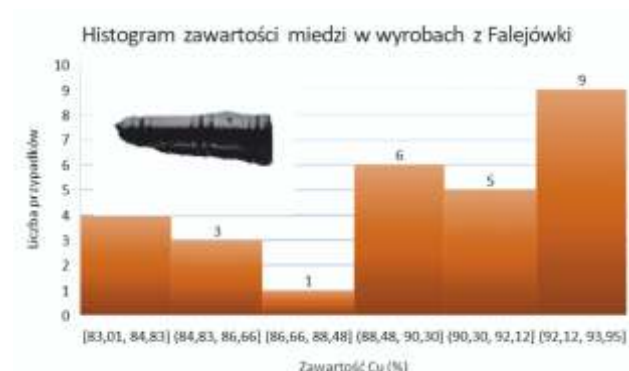
Zawartość ołowiu w wyrobach metalowych skarbu wynosi 0,14÷3,31% (średnia 0,53%, mediana 0,3% Pb) i może być uznana za intencjonalną, jeśli przyjmuje wyższe wartości. W tym przypadku jedynie wartość najwyższa 3,3% Pb w tulei grotu (kat. I.38) może być dodatkiem celowym. W pozostałych przypadkach za-

Tab. 17. Opracowanie statystyczne wyników składu chemicznego zabytków ze skarbu z Falejówki na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.): wartości minimalne, maksymalne, średnia, mediana, odchylenie standardowe. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Tab. 17. Statistical processing of the results of the chemical composition of the artefacts from the hoard in Falejówka on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) analysis (wt %): minimum and maximum values, mean, median, standard deviation. Processing A. Garbacz-Klempka

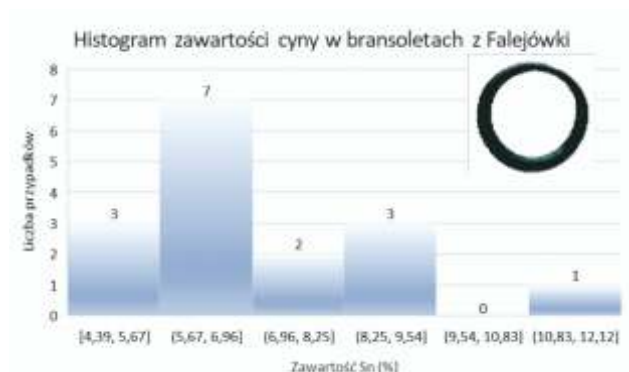
Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
min	0,00	0,06	0,10	83,01	0,11	0,18	0,02	0,31	0,06	0,14	0,01
max	0,90	0,18	0,59	93,95	0,53	1,82	0,29	12,29	5,80	3,31	0,20
średnia	0,20	0,09	0,32	89,65	0,15	0,58	0,08	7,94	0,63	0,53	0,06
mediana	0,11	0,08	0,29	90,37	0,14	0,59	0,06	7,94	0,30	0,30	0,05
odchylenie standardowe	0,23	0,02	0,13	3,49	0,07	0,33	0,06	3,11	1,13	0,65	0,04



Ryc. 81. Histogram zawartości miedzi w bransoletach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 81. Histogram of the copper contents in the bracelets from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 82. Histogram zawartości miedzi w wyrobach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 82. Histogram of the copper contents in the artefacts from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 83. Histogram zawartości cyny w bransoletach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 83. Histogram of the tin contents in the bracelets from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 84. Histogram zawartości cyny w wyrobach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 84. Histogram of the tin contents in the artefacts from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka

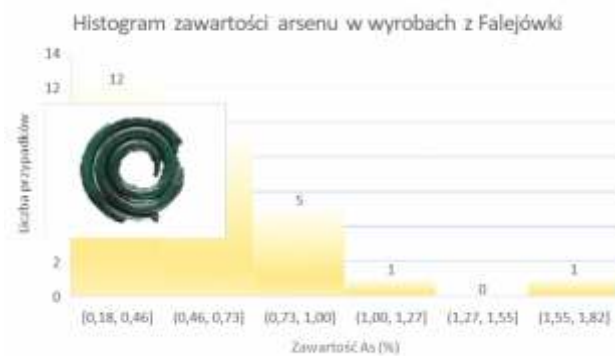
wartość ołowiu 2% dla placka brązu (kat. I.39) i 1,2% dla skrzydła brązowego (kat. I.20) wskazuje raczej na ponowny przetop wyrobów zawierających ołów (recykling) i wprowadzenie pewnych ilości tego pierwiastka wraz ze złomem wykorzystanym jako surowiec. Pozostałe wartości, jak wynika z histogramu, koncentrują się w przedziale pierwszym 0÷0,9% (Ryc. 90). W bransoletach większość wyników znajduje się w zakresie 0,16-0,3%, więc jest pochodzenia naturalnego (Ryc. 89).

Żelazo może być związane z obecnością siarczków miedzi i żelaza w stopie (siarka jest niewykry-

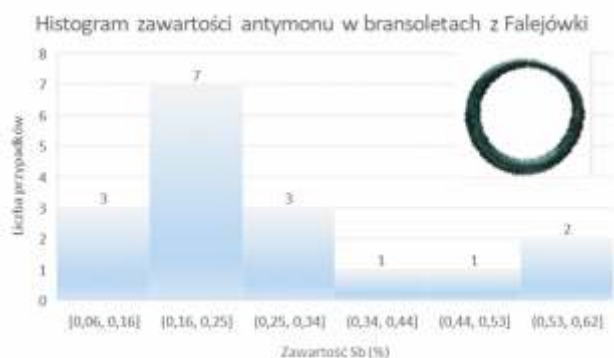
walna metodą ED-XRF) lub też być wskaźnikiem procesów korozyjnych zachodzących na powierzchni i w strukturze wyrobu. Zawartość żelaza w zabytkach ze skarbu wynosi 0,0-0,9% (Tab. 17). Podwyższony udział żelaza zarejestrowano jedynie w dwóch przypadkach – 0,9% Fe dla grotu tulei (kat. I.38) oraz 0,6% Fe dla bransolety (kat. I.16) – i biorąc pod uwagę podwyższoną obecność innych pierwiastków w tych stopach (jak nikiel, arsen, antymon, cynk), ma to związek z pochodzeniem z rud i domniemaną obecnością w stopie w postaci siarczków miedzi i żelaza.



Ryc. 85. Histogram zawartości arsenu w bransoletach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 85. Histogram of the arsenic contents in the bracelets from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



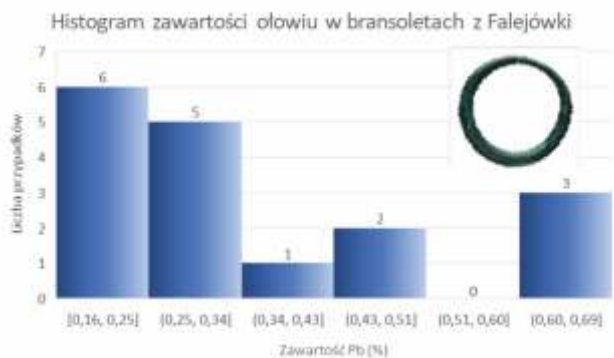
Ryc. 86. Histogram zawartości arsenu w wyrobach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 86. Histogram of the arsenic contents in the artefacts from z Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



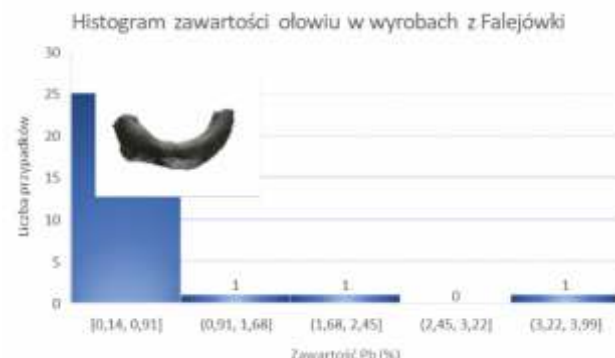
Ryc. 87. Histogram zawartości antymonu w bransoletach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 87. Histogram of the antimony contents in the bracelets from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 88. Histogram zawartości antymonu w wyrobach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 88. Histogram of the antimony contents in the artefacts from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 89. Histogram zawartości ołowiu w bransoletach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 89. Histogram of the lead contents in the bracelets from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 90. Histogram zawartości ołowiu w wyrobach z Falejówki. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 90. Histogram of the lead contents in the artefacts from Falejówka. Processing A. Garbacz-Klempka

Brązy cynowe zawierające dodatki stopowe w ilościach oznaczonych w próbkach charakteryzują się specyficznymi właściwościami, które kwalifikują te stopy jako materiał nadający się do odlewania i obróbki plastycznej (Kienlin 2013). O możliwościach wytwarzania odlewów ze stopów miedzi, oprócz walorów estetycznych, decydują przede wszystkim takie właściwości, jak lejność, czyli zdolność do wypełniania wnęki formy i dokładnego odwzorowania powierzchni modelu.

W formie zachodzi proces krystalizacji stopu, w wyniku czego powstaje specyficzna mikrostruktura, która wraz ze składem stopu znacząco wpływa na właściwości mechaniczne wyrobu. Brązy cynowe wykazują właściwości plastyczne zarówno w niskich, jak i wyższych temperaturach. Oznacza to, że odlew może być kształtowany plastycznie, co pozwala na trwałą zmianę kształtu i wymiarów przedmiotu, ale także prowadzi do przebudowy jego struktury. Wpływa to na właściwości użyt-

kowe, które zależą od rodzaju obrabianego materiału, warunków technologicznych prowadzonego procesu oraz od zabiegów cieplno-plastycznych stosowanych w trakcie i bezpośrednio po procesie kształtowania.

Brązy cynowe odznaczają się dobrą podatnością do przeróbki plastycznej na zimno i gorąco. Do kształtowania na zimno stosowano bardziej plastyczne brązy, często stopy o obniżonej zawartości cyny (o zawartości cyny mniejszej niż 7%), mające strukturę roztworu stałego. Bardzo dobre właściwości plastyczne wykazują brązy o zawartości 46% Sn. Przed procesem obróbki plastycznej na zimno materiał poddaje się wyżarzaniu ujednorodniającemu w celu usunięcia struktury silnie dendrytycznej. Brązy te odznaczają się dobrą wytrzymałością, są sprężyste oraz odporne na korozję. W zależności od stopnia umocnienia oraz przeprowadzonej obróbki cieplnej brązy cynowe mogą być w stanie wyżarzonym, twardym lub sprężystym (Garbacz-Klempka 2018).

Brązy cynowe w epoce brązu zawierają: składnik podstawowy, składniki stopowe dodane celowo do składnika podstawowego oraz naturalne zanieczyszczenia metaliczne surowca. Udział cyny i ołowiu można uznać już za celowy dodatek stopowy, wprowadzany w celu poprawy właściwości technologicznych, użytkowych i estetycznych. Wyznaczono wartości graniczne zawartości składników stopowych, powyżej których mogą one uchodzić za celowe, np. na poziomie 5%, min. 1,5-2% (Stech 1999; Garbacz-Klempka 2018). Graniczna wartość cyny na poziomie 2% została wyznaczona eksperymentalnie na podstawie zmiany właściwości stopu. Można więc uznać, że powyżej 2% dodawano cyny z pewnym prawdopodobieństwem świadomie. Poniżej tej wartości nie można stwierdzić, czy stop został wytworzony z intencjonalnym dodatkiem cyny, czy też pochodził z recyklingu, albo też z rud miedzi zawierających cynę. Biorąc pod uwagę cynę i ołów jako potencjalne dodatki stopowe, tylko w jednym przypadku cyna wynosi poniżej 2% (kat. I.38, 0,3% Sn), co oznacza, że w pozostałych przypadkach była składnikiem celowym. Odwrotnie jest w kwestii ołowiu, który w większości wyników występuje poniżej 0,6%, więc jest składnikiem niezamierzonym, a jedynie w dwóch może być uznany za dodatek celowy (kat. I.39, 2,0% Pb oraz kat. I.38, 3,3% Pb). Zatem tylko cyna może być rozpatrywana jako składnik stopowy, natomiast ołów, arsen i antymon są jedynie charakterystycznymi domieszkami naturalnymi, zwanymi też zanieczyszczeniami.

Dodatek do stopu cyny i ołowiu ma na celu poprawę właściwości technologicznych, użytkowych i estetycznych. Dodawanie do miedzi pewnych ilości cyny wpływało na zmianę właściwości technologicznych surowca, nadawało stopowi większą twardość, wytrzymałość na rozciąganie, podwyższało granicę plastyczności oraz wydłużenie i pozwalało uzyskać większą płynność w czasie odlewania. Zawartości cyny ok. 10%

zwiększa twardość do dwukrotnej wartości czystej miedzi. Dodatek cyny do stopu sprawia, iż stop krystalizuje w zakresie temperatur pomiędzy liniami likwidus i solidus, charakterystycznymi dla układu równowagi stopu Cu-Sn, co pozwala na obniżenie temperatury zalewania i utrzymanie w tym zakresie temperatur stopu w stanie ciekłym, ułatwiając w ten sposób odlewanie. I tak dla brązu cynowego o zawartości 10% cyny temperatura zalewania wynosi ok. 1020°C, tymczasem dla czystej miedzi 1083°C (Garbacz-Klempka 2018). Ołów poprawiał też lejność (Ottaway 2001; Rządkosz 2013).

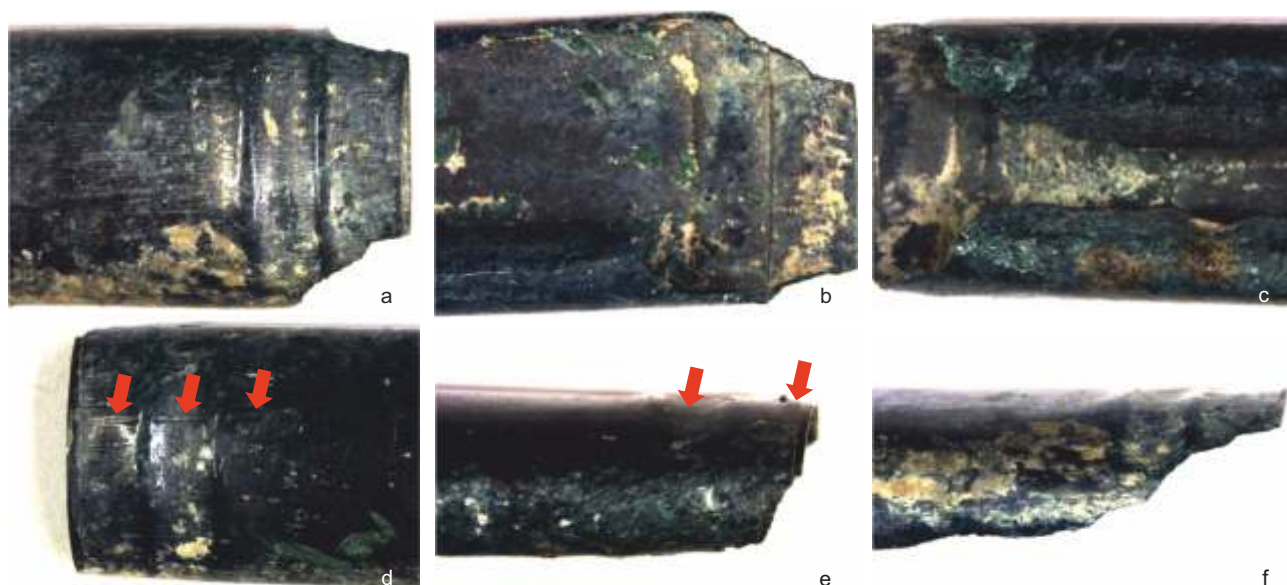
Zanieczyszczenia w stopie zależą zarówno od rodzaju rudy, jak i poziomu oraz skuteczności zabiegów hutniczych. Zanieczyszczenia w miedzi pochodzącej z rud siarczkowych mogą dochodzić nawet do kilku procent (Northover 1988; Ottaway, Roberts 2008).

Istotną kwestią jest obieg materiału w pracowni w postaci złomu obiegowego i brak możliwości kontroli składu chemicznego, a możliwa jest jedynie obserwacja właściwości stopu, jak lejność, temperatura topnienia, twardość, możliwość obróbki, kolor. W surowcu z epoki brązu występowały duże różnice, które wynikają zarówno z rodzaju złóż, parametrów technicznych wytopu metali, stopowania metali, skali i organizacji produkcji, a także obiegu surowca, w tym także intensywności jego recyklingu (Bray, Pollard 2012; Pernicka 2014; Radivojević *et al.* 2018).

Sanok (Biała Góra)

Zabytki z Białej Góry w większości zostały wykonane techniką kształtowania plastycznego poprzez kucie, klepanie i formowanie przy użyciu płyty kształtowej zwanej anką lub matrycy. Tą techniką zostały wykonane okucia (kat. III.28,351), tarczki (kat. III.1-2,4,7-8) i zawieszka (kat. III.369). Drugą techniką wytwórczą, potwierdzoną jednak w mniejszej ilości zabytków, była technika odlewnicza. Wykonano nią masywniejsze tarczki (kat. III.3,5-6) i pierścien (kat. III.370).

Okucie brązowe ze zdobieniem (kat. III.28) wykonano z cienkiej blaszki (Ryc. 91). Widoczne są efekty kształtowania plastycznego blaszki w postaci równoległych rys, będących śladami po wyrównywaniu powierzchni (ryc. 91:d-e). W dalszej kolejności wykonano zdobienia blaszki na krótszych brzegach w postaci wąskich pojedynczych rowków uzyskanych w wyniku rytowania od strony zewnętrznej (Ryc. 91:a,e). Od strony wewnętrznej wybito w technice repusowania dwie równoległe bruzdy, dające po drugiej stronie wypukły wzór (Ryc. 91:b,e-f). W ostatniej operacji zawinięto krawędzie blaszki obustronnie wzdłuż jej dłuższych boków (Ryc. 91:a-c). Skład chemiczny blaszki wskazuje na wykonanie z brązu cynowego dwuskładnikowego o zawartości ok. 88% miedzi i 11,5% cyny, przy braku innych składników stopowych. Wśród naturalnych składników stopowych występuje nikiel na poziomie 0,07% i arsen – 0,03% (Tab. 18).



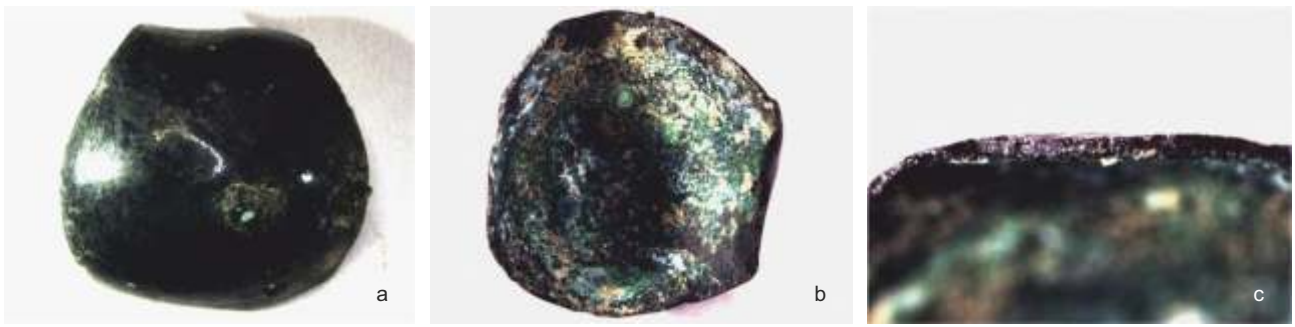
Ryc. 91. Sanok (Biała Góra). Okucie brązowe ze zdobieniem (kat. III.28): a-b – zdobienie od strony wewnętrznej, c – zawinięte obustronnie boki blaszki, d-f – blaszka z widocznym zdobieniem od strony zewnętrznej. Fot. P. Jurecki

Fig. 91. Sanok (Biała Góra). Bronze fitting with ornament (cat. No. III.28): a-b – ornament from the internal side, c – metal sheet edges folded on both sides, d-f – metal sheet with visible ornament from the external side. Photo P. Jurecki

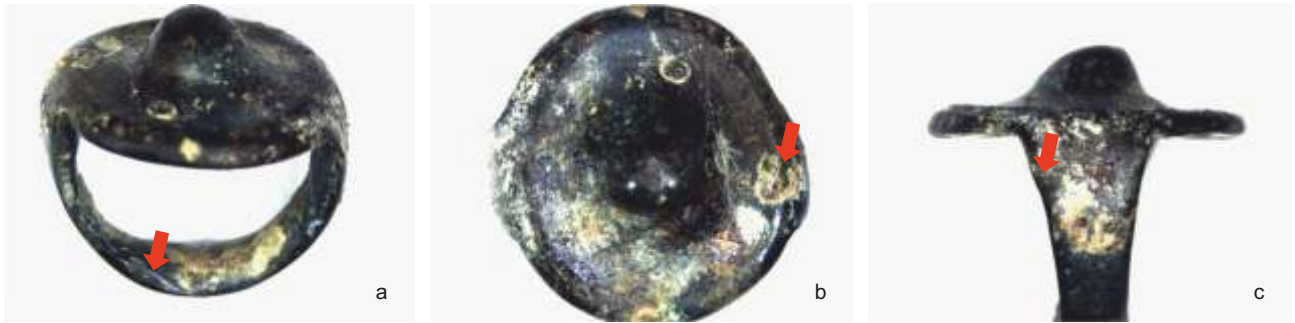
Tab. 18. Wyniki składu chemicznego zabytków ze skarbu z Sanoka (Białej Góry) na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.). Oprac. A. Garbacz-Klempka.

Tab. 18. Results of the chemical composition of the artefacts from the hoard in Sanok (Biała Góra) on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) analysis (wt %). Processing A. Garbacz-Klempka.

Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
Kat. III.369 zawieszka	0,51	0,27	0,08	88,75	0,13	0,00	0,01	10,24	< 0,051	< 0,020	0,01
Kat. III.369 uszko	0,35	0,08	0,07	87,73	0,15	0,01	0,01	11,55	< 0,051	0,04	0,02
Kat. III.372 przedmiot	94,06	0,30	< 0,015	5,64	< 0,010	< 0,0051	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,001
Kat. III.28 okucie	0,33	0,06	0,07	87,88	0,13	0,03	0,01	11,49	< 0,05	< 0,02	0,01
Kat. III.351 okucie	0,77	0,34	0,10	87,59	0,13	0,07	0,01	10,97	< 0,05	< 0,02	0,01
Kat. III.370 pierścień	0,89	0,09	0,36	88,30	< 0,010	1,33	0,39	4,99	1,05	2,54	0,06
Kat. III.4 tarczka	< 0,025	0,09	0,13	88,45	0,12	0,05	0,03	10,93	0,04	0,14	0,02
Kat. III.4 uszko	0,04	0,06	0,11	89,59	0,11	0,04	0,03	9,93	< 0,05	0,09	< 0,001
Kat. III.5 tarczka	0,15	0,09	0,34	87,42	0,13	0,09	0,09	11,67	< 0,05	< 0,02	0,02
Kat. III.5 uszko	0,19	0,10	0,34	87,52	0,13	0,08	0,07	11,56	< 0,05	< 0,02	0,02
Kat. III.7 tarczka	0,84	0,20	0,28	86,86	0,12	0,27	0,09	11,77	< 0,05	0,37	0,03
Kat. III.1 tarczka	0,75	0,09	0,07	86,37	0,11	0,98	0,17	11,05	0,20	0,17	0,04
Kat. III.1 uszko	0,38	0,08	0,08	88,60	0,13	0,02	0,01	10,62	< 0,05	0,08	0,01
Kat. III.2 uszko	0,73	0,07	0,06	87,57	0,12	< 0,000	0,01	11,43	< 0,05	< 0,02	0,02
Kat. III.2 tarczka	1,52	0,11	0,13	87,10	0,10	0,28	0,11	11,99	0,10	0,05	0,03
Kat. III.3 tarczka	0,04	0,07	0,07	86,09	0,13	0,74	0,08	12,31	0,15	0,28	0,03
Kat. III.3 uszko	0,11	0,07	0,08	91,68	0,13	0,20	0,04	7,49	0,10	0,09	0,02
Kat. III.6 tarczka	0,80	0,07	0,05	84,39	0,10	1,16	0,28	12,20	0,36	0,55	0,06
Kat. III.6 uszko	0,04	0,07	0,08	90,34	0,13	0,25	0,05	8,73	0,09	0,18	0,03
Kat. III.8 uszko	0,14	0,06	0,16	90,17	0,12	0,05	0,03	9,39	0,01	< 0,02	0,01



Ryc. 92. Sanok (Biała Góra). Okucie brązowe (kat. III.351): a – strona zewnętrzna, b – strona wewnętrzna, c – ścianka o grubości 0,5 mm. Fot. P. Jurecki
 Fig. 92. Sanok (Biała Góra). Bronze fitting (cat. No. III.351): a – external side, b – internal side, c – 0.5 mm thick wall. Photo P. Jurecki



Ryc. 93. Sanok (Biała Góra). Pierścień brązowy (kat. III.370): a-c – ślady kształtowania modelu woskowego. Fot. P. Jurecki
 Fig. 93. Sanok (Biała Góra). Bronze ring (cat. No. III.370): a-c – traces of formation of the wax model. Photo P. Jurecki



Ryc. 94. Sanok (Biała Góra). Zdobiona tarczka brązowa (kat. III.1): a-f – brzeg i zdobienie tarczki, g – przebicie tarczki od wewnątrz, h – kołnierz wokół otworu widoczny na zewnątrz, i – nit. Fot. P. Jurecki
 Fig. 94. Sanok (Biała Góra). Ornamented bronze disc (cat. No. III.1): a-f – edge and ornament of the disc, g – perforation of the disc from inside, h – flange around the opening visible from outside, i – rivet. Photo P. Jurecki



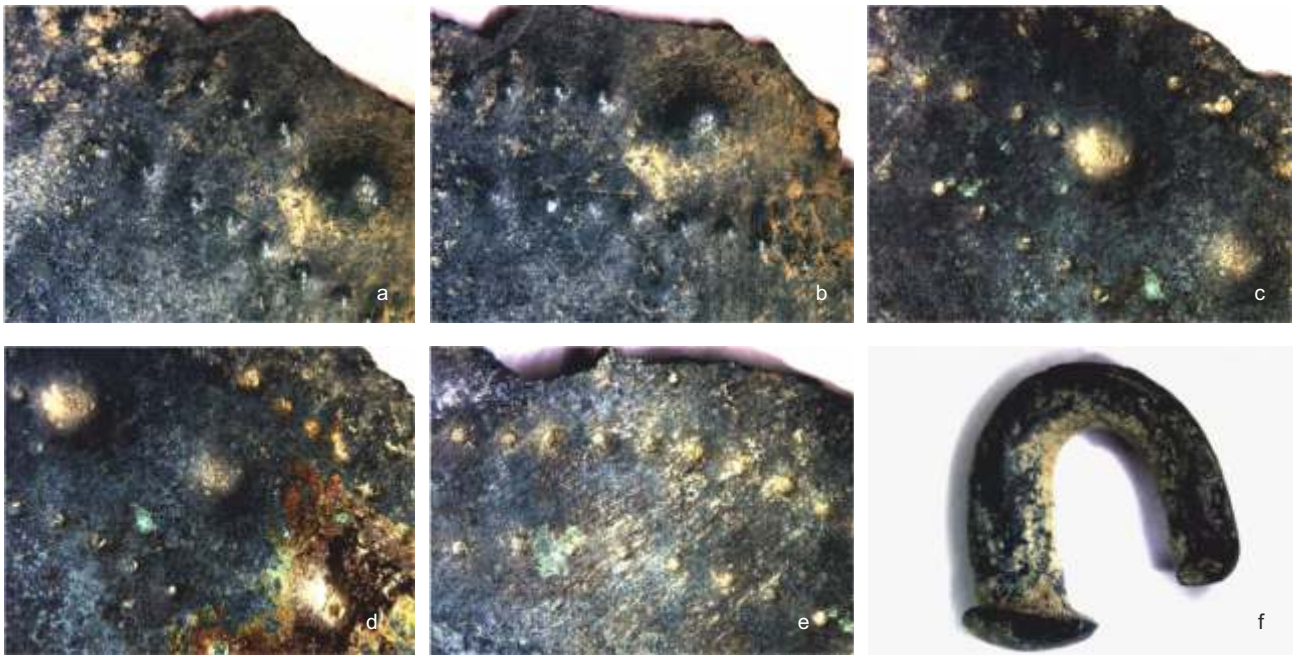
Ryc. 95. Sanok (Biała Góra). Tarczka brązowa z uszkiem (kat. III.4): a – tarczka, b-d – brzeg i zdobienie tarczki, e-f – powierzchnia tarczki, g – główka nitu h-i – uszko. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-i)
 Fig. 95. Sanok (Biała Góra). Bronze disc with a loop (cat. No. III.4): a – disc, b-d – disc edge and ornament, e-f – disc surface, g – rivet head, h-i – loop. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-i)

Kolejne okucie brązowe (kat. III.351) ukształtowane na płycie w wyżłobionych półkolistych dołkach zwanej anką lub kształtownicą. W pierwszej kolejności przygotowano blaszkę o grubości 0,5 mm i następnie nadano jej formę kopułki za pomocą wypukłego kształtownika (Ryc. 92). Okucie prawdopodobnie posiadało po obu stronach zawinięte do wewnątrz uchwyty („wąsy”), służące mocowaniu. Profil chemiczny okucia wskazuje na brąz cynowy o zawartości 87,6% miedzi i 12% cyny z niewielką ilością naturalnych zanieczyszczeń, wśród których wyróżnia się cynk i nikiel na poziomie 0,1% oraz arsen – 0,07% (Tab. 18).

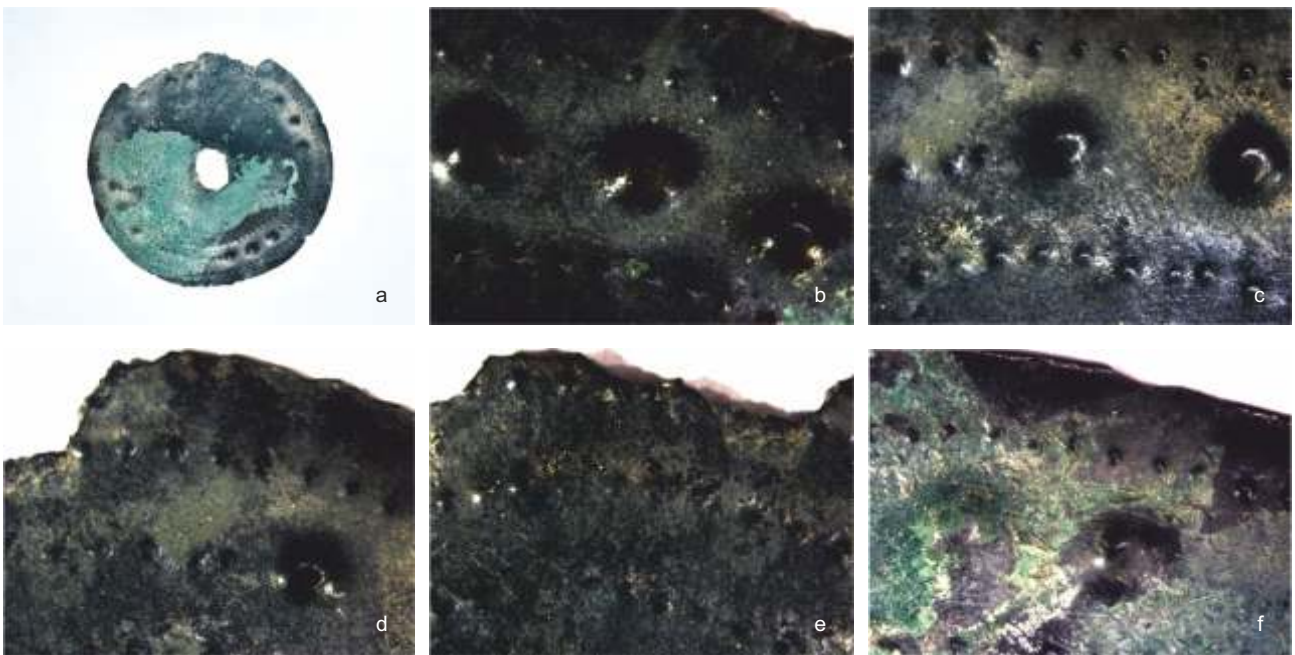
Pierścień brązowy o numerze kat. III.370 (ryc. 93) został odlany z zastosowaniem techniki wytapianych modeli w formie glinianej jednorazowej. O technice tej świadczą nieregularności odlewu i zniekształcenia powstałe na etapie pracy w modelu woskowym, widoczne m.in. na uszku, tarczce i guzku (Ryc. 93:a-c). Odlew z brązu cynowo-ołowiowego o zawartości składników stopowych: 88,3% miedzi, 5% cyny i 2,5% ołowiu. Ponadto w składzie chemicznym zidentyfikowano: 1,3% arsenu, 1% antymonu oraz 0,4% niklu i srebra (Tab. 18).

Tarczki zostały wycięte z cienkiej blachy i ukształtowane plastycznie do odpowiedniego kształtu lub odlane. Do pierwszej grupy należą tarczki cieńsze, zdobione, do drugiej natomiast tarczki masywniejsze, o grubszej ściance, nie posiadające zdobień.

Zdobiona tarczka brązowa o numerze kat. III:1 (Ryc. 94) utworzona została z koła wyciętego z blaszki, której brzegi zostały rozklepane. Grubość tarczki w środkowej części wynosi 2 mm, a przy brzegach 0,5 mm. Ugięcie blaszki zostało uformowane we wgłębieniu płyty kształtowej zwanej anką lub w sztancy, składającej się z matrycy i patrycy. Zewnętrzna krawędź została lekko podgięta do góry w wyniku obróbki wykończeniowej (Ryc. 94:a-f). Otwór w środkowej części został przebity od wewnątrz (o czym świadczy powstały kołnierz wokół otworu o średnicy 3,5 mm; Ryc. 94:g-h). Nit z półokrągłym łebkiem o średnicy 3 mm (Ryc. 94:i) wykonany został z drutu okrągłego. Nit po zagięciu pełnił funkcję uszka. Zdobienie tarczki wykonane zostało po obwodzie w trzech rzędach w technice repusowania, większe guzy powtórzone w sekwencjach po trzy z przerywnikiem w postaci



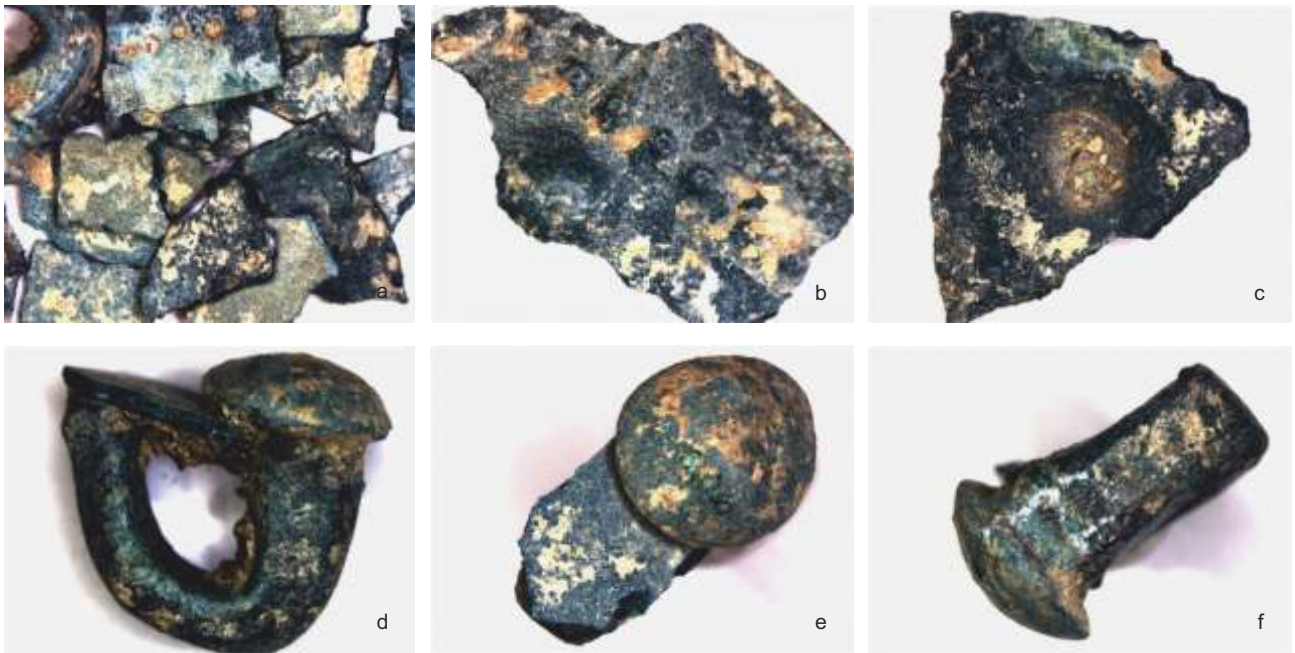
Ryc. 96. Sanok (Biała Góra). Zdobiona tarczka brązowa (kat. III.2): a-e – brzeg i zdobienie tarczki, f – nit. Fot. P. Jurecki
 Fig. 96. Sanok (Biała Góra). Ornamented bronze disc (cat. No. III.2): a-e – disc edge and ornament, f – rivet. Photo P. Jurecki



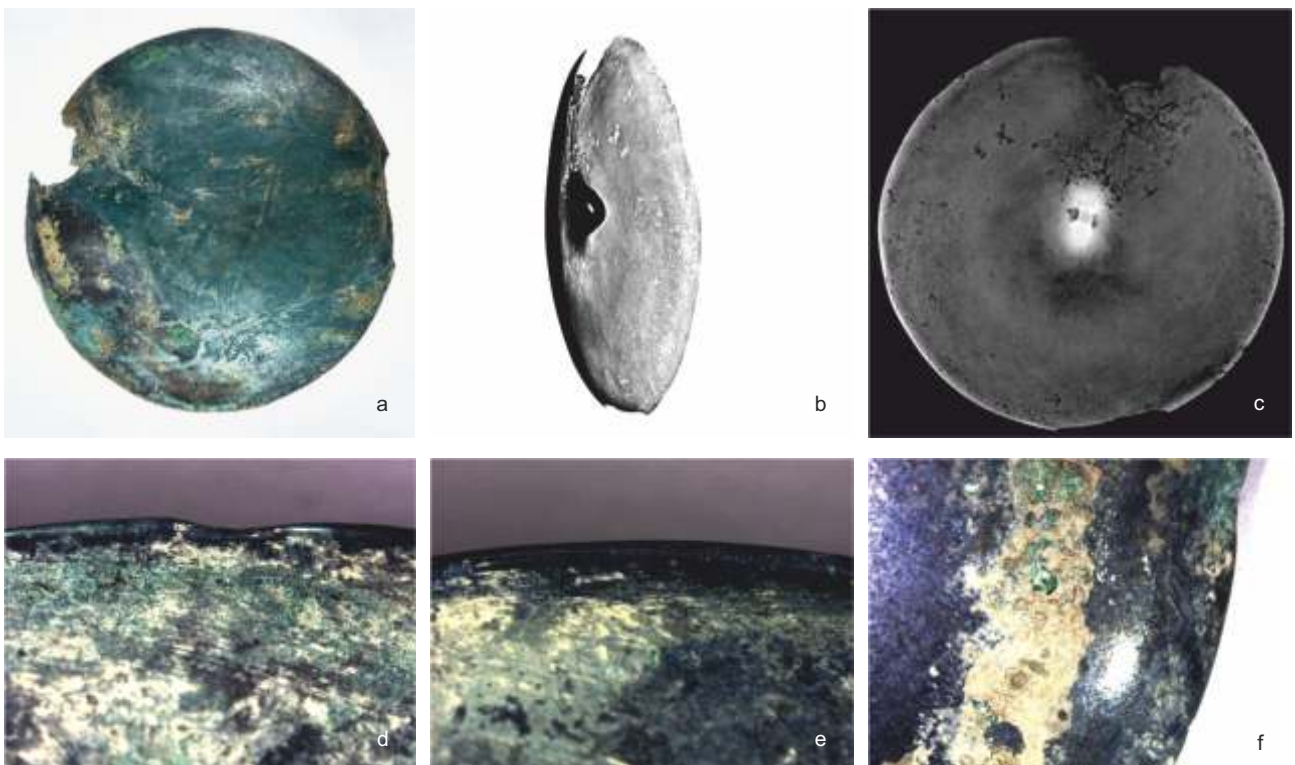
Ryc. 97. Sanok (Biała Góra). Zdobiona tarczka brązowa (kat. III.7): a – tarczka, b-f – brzeg i zdobienie tarczki. Fot. D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)
 Fig. 97. Sanok (Biała Góra). Ornamented bronze disc (cat. No. III.7): a – disc, b-f – disc edge and ornament. Photos D. Szuwalski (a), P. Jurecki (b-f)

drobnego punktowania w środkowym rzędzie. Rząd wewnętrzny i zewnętrzny wypełniają takie same zdobienia w postaci drobnych punktów wykonane w równych odstępach narzędziem w typie punktaka. W składzie chemicznym tarczki zidentyfikowano: 86% miedzi, 11% cyny, 1% arsenu, przy udziale 0,2% antymonu i ołowiu (Tab. 18). W uszku oszacowano 88,6% miedzi, 10,6% cyny przy niewielkim udziale arsenu (0,02%) i braku antymonu, co wskazuje na użycie innego materiału do wykonania uszka i tarczki.

Podobna do niej ze względu na sposób wykonania i wymiary jest tarczka brązowa z uszkiem o numerze kat. III.4 (Ryc. 95). Tarczka okrągła, wycięta z blachy o grubości 2 mm, rozklepana została na bokach do grubości 0,5 mm. Szerokość tarczki wynosi 112 mm. W środkowej części widać zaoblenie blaszki (różnica wysokości między brzegami, a środkiem), które wynosi 6 mm. Widoczne są ślady obróbki powierzchni w postaci szlifowania. Brzegi zostały wyrównane przez szlifowanie i zdobione w technice punk-



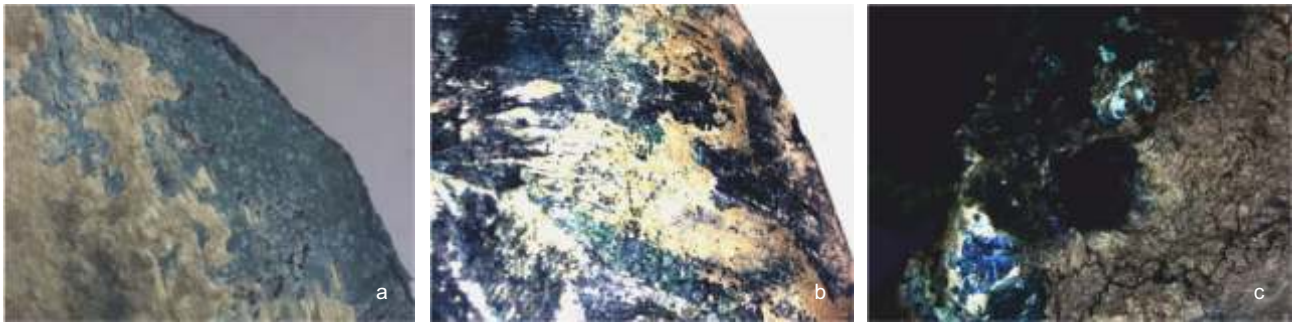
Ryc. 98. Sanok (Biała Góra). Zdobiona tarczka brązowa (kat. III.8): a-c – fragmentarycznie zachowana tarczka, d-f – nit. Fot. P. Jurecki
 Fig. 98. Sanok (Biała Góra). Ornamented bronze disc (cat. No. III.8): a-c – fragmentarily preserved disc, d-f – rivet. Photo P. Jurecki



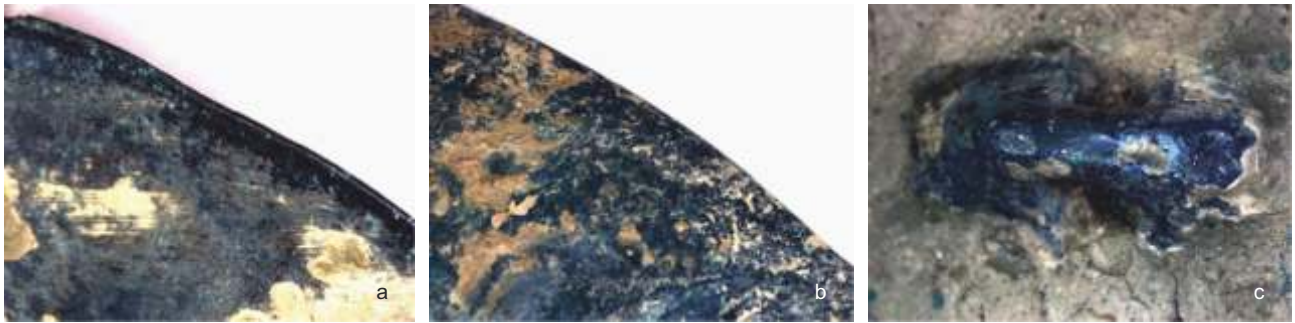
Ryc. 99. Sanok (Biała Góra). Tarczka brązowa z uszkiem (kat. III.5): a-c – tarczka, d-e – krawędź, f – brzeg profilowany. Fot. D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-f)
 Fig. 99. Sanok (Biała Góra). Bronze disc with a loop (cat. No. III.5): a-c – disc, d-e – edge, f – profiled edge. Photos D. Szuwalski (a), P. Długosz (b-c), P. Jurecki (d-f)

towania. Widoczne są trzy rzędy zdobień, przy czym rząd zewnętrzny i wewnętrzny są jednakowe i mają drobny wzór wybitny punktami o średnicy ok. 0,5 mm. Natomiast rząd środkowy jest wykonany w układzie naprzemiennym składającym się z sekwencji trzech większych guzków o średnicy ok. 4 mm i szeregu drobnych

punktów. Punkty i guzy zostały wykonane od wewnątrz tarczki techniką punktowania dwoma rodzajami puncy. Nit z główką o kształcie stożkowym wykonany został z drutu o przekroju okrągłym, przekutym do kształtu prostokątnego o wymiarach 3×1 mm i zagiętym w celu utworzenia uszka. Prawdopodobne jest też przeciągnięcie



Ryc. 100. Sanok (Biała Góra). Tarczka brązowa (kat. III.3): a-b – brzeg tarczki, c – uszko. Fot. P. Jurecki
 Fig. 100. Sanok (Biała Góra). Bronze disc (cat. No. III.3): a-b – disc edge, c – loop. Photo P. Jurecki



Ryc. 101. Sanok (Biała Góra). Tarczka brązowa (kat. III.6): a-b – brzeg tarczki, c – uszko. Fot. P. Jurecki
 Fig. 101. Sanok (Biała Góra). Bronze disc (cat. No. III.6): a-b – disc edge, c – loop. Photo P. Jurecki



Ryc. 102. Sanok (Biała Góra). Zawieszka brązowa (kat. III.369): a – zawieszka z otworem, b – wzór i wykruszenie materiału, c – uszko. Fot. P. Jurecki
 Fig. 102. Sanok (Biała Góra). Bronze pendant (cat. No. III.369): a – pendant with an opening, b – pattern and material chipping c – loop. Photo P. Jurecki



Ryc. 103. Sanok (Biała Góra). Paciorek żelazny w otulinie (kat. III.372): a – produkty korozji miedzi wewnątrz paciorka żelaznego, b-c – paciorek żelazny. Fot. P. Jurecki
 Fig. 103. Sanok (Biała Góra). Iron bead in a mount (cat. No. III.372): a – copper corrosion products inside the iron bead, b-c – iron bead. Photo P. Jurecki

drutu przez otwór o prostokątnym kształcie, o czym świadczą wyraźne wzdłużne ślady na powierzchni nitu. W składzie tarczki zidentyfikowano 88,5% miedzi, 11% cyny i 0,14% ołowiu, 0,13% niklu i 0,12% cynku przy niewielkim udziale arsenu, antymonu i srebra (Tab. 18).

Widoczna jest różnica pomiędzy tarczkami o numerach kat. III.1 i III.4, głównie w zawartości arsenu.

Zdobiona, brązowa tarczka o numerze kat. III.2 (Ryc. 96) została wycięta z blachy. Średnica tarczki wynosi 53 mm, grubość tarczki na brzegach to 0,5 mm.

Dekoracja występuje w układzie trzech rzędów zaznaczonych punktowaniem i większymi guzami (analogicznie jak w przypadku kat. III.1 i III.4). Nit o przekroju okrągłym o średnicy 2-3 mm z łebkiem półokrągłym tworzył uszko (Ryc. 96:f). Skład chemiczny tarczki jest charakterystyczny dla brązu cynowego i zawiera: 87,1% miedzi, 12% cyny z udziałem 0,3% arsenu oraz niklu, antymonu, cynku i srebra na poziomie 0,1% (Tab. 18). Uszko zawiera 87,6% miedzi i 11,4% cyny przy mniejszym niż w tarczce udziale dodatków naturalnych, pochodzących z rud.

Zdobiona, brązowa tarczka o numerze kat. III.7 (Ryc. 97) ma średnicę 64 mm, a grubość przy krawędziach zewnętrznych wynosi 0,3 mm, zaś w środku 0,5 mm. Średnica wybitego guza wynosi 4 mm, natomiast średnica punktu zaledwie 0,5 mm (Ryc. 97:b-f). W środkowej części widoczne jest uszkodzenie wynikające z wykruszenia tarczki razem z nitami tworzącym uszko. W składzie chemicznym tarczki zidentyfikowano miedź w ilości ok. 87%, cynę w ilości 11,8% oraz ołów – 0,4%. Wśród dodatków świadczących o pochodzeniu z rud wyróżnia się arsen i nikiel w ilości 0,3% oraz cynk i srebro o zawartości 0,1% (Tab. 18).

Do grupy tarczek zdobionych należy także okaz o numerze kat. III.8 (Ryc. 98) Tarczka wykazuje duży stopień destrukcji. Została wycięta z blaszki i rozklepana do grubości 0,7-0,5 mm. Zdobienie złożone jest z guzów i drobnych punktów, ułożonych w trzech rzędach (Ryc. 98:a-c), analogicznie jak w pozostałych zdobionych tarczках (kat. III.1-2,4,7). Dobrze zachowane jest uszko o przekroju okrągłym, przechodzącym w przekrój prostokątny (Ryc. 98:d-f). Profil chemiczny uszka wskazuje na brąz cynowy o zawartości 90,2% miedzi, 9,4% cyny i niewielkiej ilości naturalnych dodatków (Tab. 18). Ze względu na znaczne zniszczenie skład chemiczny tarczki był niemożliwy do uzyskania.

Tarczka brązowa z uszkiem o numerze kat. III.5 (Ryc. 99) wykonana została techniką odlewniczą wraz z uszkiem. Grubość przy krawędzi wynosi 0,8 mm, natomiast w środkowej części – 3 mm. Średnica tarczki wynosi 86 mm, przy długości uszka 12 mm i szerokości 3,5-4 mm (prześwit uszka wynosi 2 mm). Uszko jest ułożone niesymetrycznie. O zastosowaniu metody odlewniczej świadczą nieregularność obwodu (Ryc. 99:a-d), asymetria uszka (Ryc. 99:c) oraz grubość ścianki tarczki (Ryc. 99:d-e) i zawinięte do wewnątrz brzegi (Ryc. 99:f). Po wykonaniu odlewu brzegi zostały wyrównane, a całość wygładzona i wypolerowana. Tarczka nie posiada zdobień. Skład chemiczny jest tożsamy na uszku oraz tarczce i wskazuje na brąz cynowy o zawartości 87,5% miedzi, 11,6% cyny, 0,3% niklu oraz cynk, arsen i srebro na poziomie ok. 0,1% (Tab. 18).

Tarczka brązowa o numerze kat. III.3 (Ryc. 100) została wykonana w technice odlewu. Średnica tarczki wynosi 87 mm, krzywizna (wysokość) – 15 mm, grubość ścianki – 0,5 mm. Uszko jest węższe w środku i szersze

przy tarczce, odlewane osobno i lutowane (średnica przekroju uszka – 3,5-4 mm). Prześwit oczka wynosi 2,5 mm. Profil chemiczny tarczki jest charakterystyczny dla brązu cynowego dwuskładnikowego o zawartości 86,1% miedzi, 12,3% cyny, 0,7% arsenu, 0,3% ołowiu, 0,2% antymonu (Tab. 18). Uszko zawiera znacznie mniej cyny – 7,5%, przy równocześnie mniejszej ilości naturalnych dodatków miedzi: 0,2% arsenu i 0,1% antymonu.

Tarczka brązowa z uszkiem o numerze kat. III.6 (Ryc. 101), odlewana, ma średnicę 91 mm i grubość 0,7 mm, a uszko średnicę 3 mm. Nie posiada zdobień (Ryc. 101:a-b). Tarczka ze stopu o zawartości: 84,4% miedzi, 12,2% cyny, 1,2% arsenu, 0,6% ołowiu, 0,4% antymonu, 0,3% srebra (Tab. 18). Uszko (Ryc. 101:c) zawiera natomiast: 90,3% miedzi i mniej cyny niż tarczka (8,7%) oraz także mniej dodatków naturalnych, jak arsen (0,3%), ołów (0,2%) i antymon (0,1%), więc musiało być wykonane osobno.

Zawieszka brązowa o numerze kat. III.369 (Ryc. 102) została wycięta z blaszki. Krawędzie blaszki zostały następnie obrobione przez szlifowanie. W blaszce wycięto otwór owalny (Ryc. 102:a) i ozdobiono punktowaniem wzdłuż brzegów (Ryc. 102:b). Widoczne są ślady pęknięcia i ubytków materiału powstałe wskutek korozji związanej również z osłabieniem materiału w wyniku wybijania wzoru (Ryc. 102:b). Uszko zostało wykonane z drutu o przekroju okrągłym, o widocznych śladach przeciągania przez oczko drutownicy i przelamania powstałego w procesie zaginania drutu w ogniu (Ryc. 102:c). Zawieszka została wykonana z brązu cynowego o składzie: 88,8% miedzi i 10,2% cyny z niewielkim udziałem niklu (0,08%), przy braku innych składników (Tab. 18). Samo uszko wykonano z drutu brązowego o składzie 87,7% miedzi i 11,6% cyny z udziałem niklu na poziomie 0,07% i ołowiu 0,04%.

Paciorek żelazny o numerze kat. III.372 pokryty był przed konserwacją grubą warstwą produktów korozji (Ryc. 103). Na podstawie obserwacji makroskopowych zauważono produkty korozji miedzi wewnątrz paciorka, a na zewnątrz produkty korozji żelaza. W badaniach składu chemicznego paciorka również potwierdzono udział żelaza i niewielkich ilości miedzi, z czego może wynikać, iż żelazny paciorek osadzony został na miedzianym lub brązowym rdzeniu (zachowanym jedynie w postaci produktów korozji, widocznych na ryc. 103:a). Zabytek ten uległ znacznej destrukcji w wyniku korozji kontaktowej, która nastąpiła ze względu na dużą różnicę potencjałów stykających się metali, w tym przypadku żelaza i miedzi w obecności wilgoci (różnica potencjałów wynosi 0,81 V). Ze względu na obecność kilku podobnych paciorków w skarbie można przyjąć, iż tworzyły komplet.

Ze skarbu z Sanoka (Białej Góry) zbadano okucia (kat. III.28 i III.351), zawieszki (kat. III.369), pierścienie (kat. III.370), przedmiot w otulinie (kat. III.372) oraz tarczki zdobione i gładkie (kat. III.1-8). Wszystkie obiekty zostały wykonane z brązu cynowego typu

Tab. 19. Opracowanie statystyczne wyników składu chemicznego zabytków ze skarbu z Sanoka (Białej Góry) na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.): wartości minimalne, maksymalne, średnia, mediana, odchylenie standardowe. Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Tab. 19. Statistical processing of the results of the chemical composition of the artefacts from the hoard in Sanok (Biała Góra) on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) (wt %): minimum and maximum values, mean, median, standard deviation. Processing A. Garbacz-Klempka

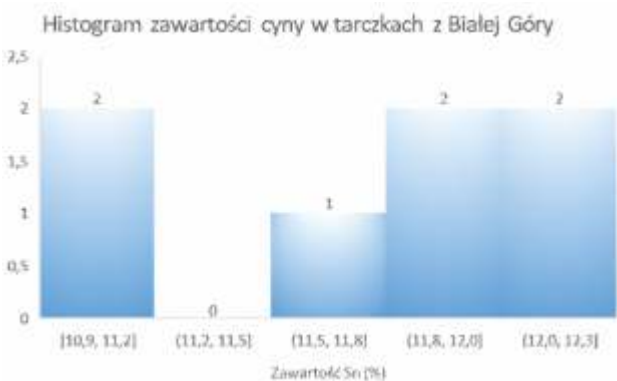
Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
średnia	0,44	0,09	0,14	87,90	0,12	0,32	0,08	10,86	0,11	0,15	0,02
min	< 0,025	0,06	< 0,015	84,39	< 0,010	< 0,00051	< 0,020	4,99	< 0,051	< 0,020	< 0,0010
max	1,52	0,20	0,34	91,68	0,13	1,16	0,28	12,31	0,36	0,55	0,06
mediana	0,19	0,07	0,08	87,52	0,12	0,20	0,07	11,56	0,10	0,09	0,02
odchylenie stan.	0,44	0,04	0,10	1,93	0,01	0,37	0,07	1,44	0,10	0,16	0,01



Ryc. 104. Histogram zawartości miedzi w tarczach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 104. Histogram of the copper contents in the discs from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



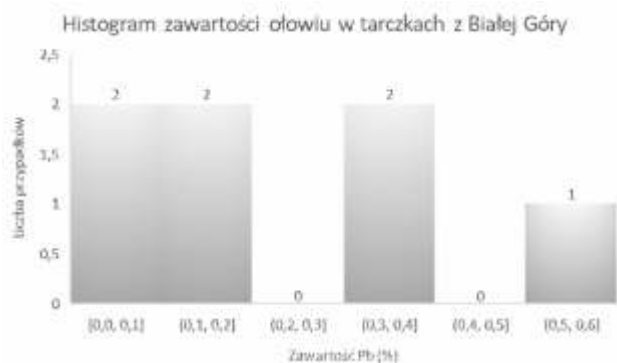
Ryc. 105. Histogram zawartości miedzi we wszystkich badanych wyrobach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 105. Histogram of the copper contents in all the examined artefacts from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



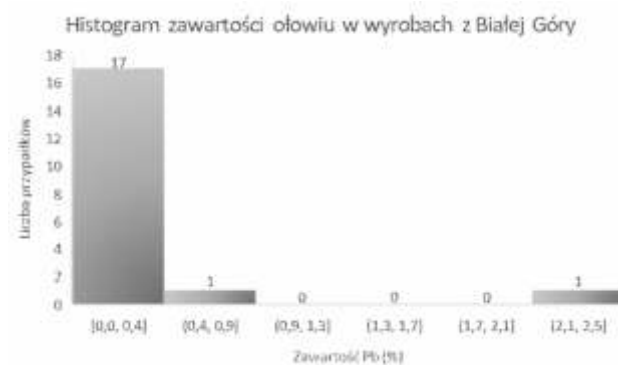
Ryc. 106. Histogram zawartości cyny w tarczach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 106. Histogram of the tin contents in the discs from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 107. Histogram zawartości cyny we wszystkich badanych wyrobach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 107. Histogram of the tin contents in all the examined artefacts from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 108. Histogram zawartości ołowiu w tarczach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 108. Histogram of the lead contents in the discs from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 109. Histogram zawartości ołowiu we wszystkich badanych wyrobach z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 109. Histogram of the lead contents in all the examined artefacts from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 110. Histogramm der Arsenkonzentration in Discs z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 110. Histogram of the arsenic contents in the discs from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 111. Histogramm der Arsenkonzentration in allen untersuchten Artefakten z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 111. Histogram of the arsenic contents in all the examined artefacts from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



Ryc. 112. Histogramm der Nickelkonzentration in Discs z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 112. Histogram of the nickel contents in the discs from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka



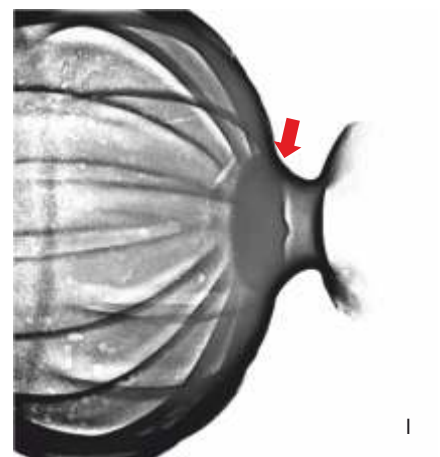
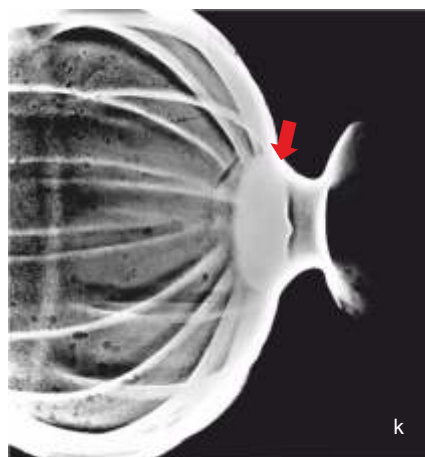
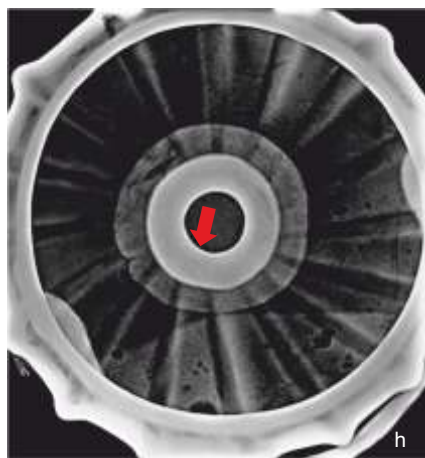
Ryc. 113. Histogramm der Nickelkonzentration in allen untersuchten Artefakten z Sanoka (Białej Góry). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Fig. 113. Histogram of the nickel contents in all the examined artefacts from Sanok (Biała Góra). Processing A. Garbacz-Klempka

Cu-Sn, z wyjątkiem pierścienia, który zawierał oprócz cyny intencjonalny dodatek ołowiu. Wyniki opracowano statystycznie i przedstawiono w postaci tabeli i rysunków (Tab. 19, Ryc. 104-113). Wynika stąd, iż średnia zawartość miedzi w skarbie wynosi 87,9%; najmniejsza zawartość to 84,4% Cu (dla tarczki o numerze kat. III.6), natomiast największa wynosi 91,7% Cu (dla uszka tarczki o numerze kat. III.3). Wyniki zawartości miedzi w większości (dziewięć przypadków) koncentrują się w pobliżu wartości średnich, w przedziale widocznym na wykresie o zakresie 87,3-88,8% (Ryc. 105). Mediana, czyli wartość środkowa, dla miedzi wynosi 87,5% (Tab. 19). Obecność cyny w skarbie wyrobów brązowych osiąga średnio 10,86%, mediana wynosi 11,6%, przy minimalnej wartości 5% Sn (dla pierścienia o numerze kat. III.370) i maksymalnej 12,3% Sn (dla tarczki o numerze kat. III.3) (Tab. 19). Na wykresie widoczna jest wyraźna koncentracja cyny w ostatnim przedziale, o zakresie 11,0-12,6% Sn, wyznaczona aż dla 11 przypadków wyników składu chemicznego wyrobów ze skarbu (Ryc. 107).

Ołów może występować jako intencjonalny dodatek stopowy i taki przypadek pojawia się w skarbie z Sanoka (Białej Góry) tylko raz w przypadku pierścienia o numerze kat. III.370, gdzie zawartość ołowiu

jest równa 2,54% (Tab. 19; Ryc. 109). W pozostałych przypadkach większość wyników koncentruje się w przedziale 0-0,1% (Tab. 19), a jedynie pięć wyników zawiera ołów podwyższony w niewielkim stopniu, co może świadczyć o wtórnym użyciu stopu pochodzącego z przetopienia brązu zawierającego ołów. W tej grupie znajdują się tylko tarczki i uszka: tarczka zdobiona o numerze kat. III.4 (0,14% Pb), tarczka zdobiona o numerze kat. III.1 (0,17% Pb), odlewane uszko tarczki o numerze kat. III.6 (0,18% Pb), tarczka zdobiona o numerze kat. III.7 (0,37% Pb), a szczególnie odlewana tarczka o numerze kat. III.6 (0,55% Pb).

Pośrednim wskaźnikiem pochodzenia mogą być dodatki zwane naturalnymi obecne w rudach miedzi. Należą do nich m.in. arsen, antymon, nikiel, cynk, srebro, żelazo. W badanym skarbie spośród tych pierwiastków wybrano do analizy arsen i nikiel. W większości przypadków (13 wyników) zawartość arsenu przyjmuje wartości minimalne, znajdując się w przedziale 0-0,3% (Tab. 19; Ryc. 111). Zaledwie w czterech przypadkach udział arsenu jest większy od wartości 0,5%, a maksymalną zawartość osiąga dla tarczki o numerze kat. III.6 (1,2% As) i pierścienia o numerze kat. III.370 (1,3% As). Podobnie w przypadku niklu – większość wyników odnotowano na histogramie w przedziale pierwszym



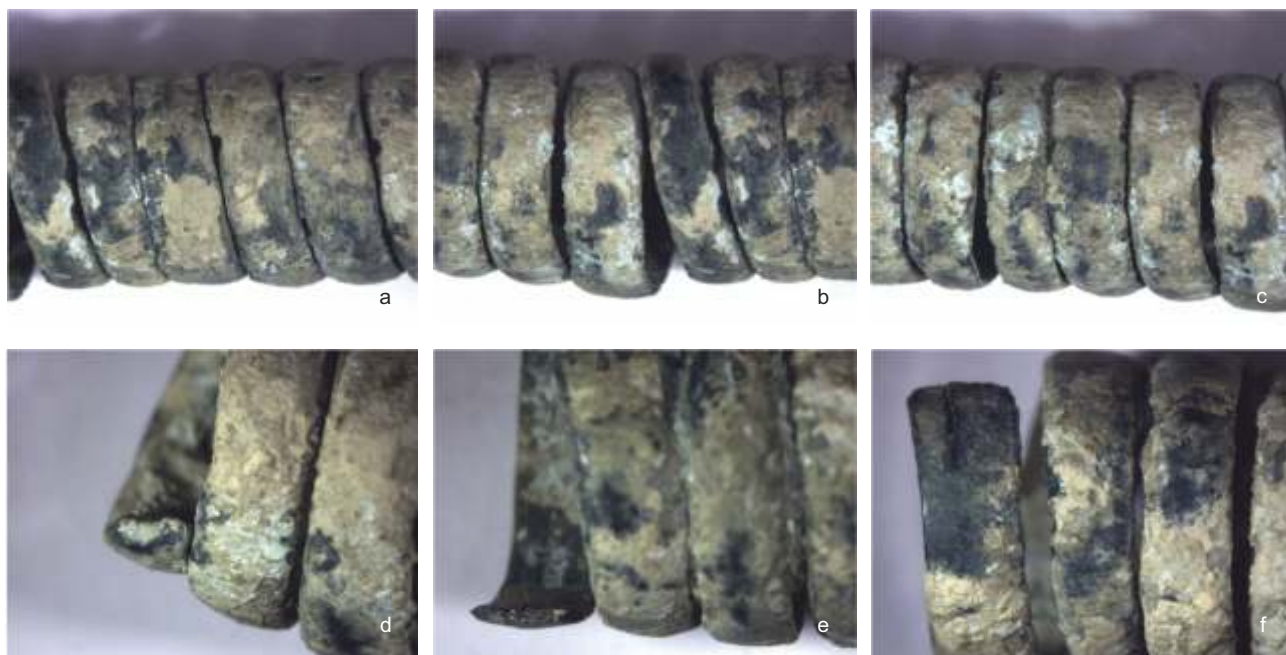
Ryc. 114. Wola Sękowa. Naczynie brązowe (nr kat. IV.1): a, d – widok ogólny, b-c, e-f – widok ogólny w obrazie rentgenowskim, g – wnętrze naczynia, h-i – wnętrze naczynia w obrazie rentgenowskim, widoczne połączenie stopki i brzuśca, j – stopka naczynia, k-l – stopka naczynia w obrazie rentgenowskim. Strzałki wskazują nakładanie się obrazu stopki i brzuśca, czyli miejsce połączenia elementów. Fot. D. Szuwalski (a,d,g,i), P. Długosz (b-c, d-e, h-i, k-l)

Fig. 114. Wola Sękowa. Bronze vessel (cat. No. IV.1): a, d – general view, b-c, e-f – general view in an X-ray image, g – interior of the vessel, h-i – interior of the vessel in an X-ray image, joining of the foot and the body, j – foot of the vessel, k-l – foot of the vessel in an X-ray image. Arrows indicate a superimposition of the image of the foot and the body, that is, the place of joining of both parts. Photos D. Szuwalski (a,d,g,i), P. Długosz (b-c, d-e, h-i, k-l)

Tab. 20. Wyniki składu chemicznego naczynia z Woli Sękowej na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.). Oprac. A. Garbacz-Klempka

Tab. 20. Results of the chemical composition of the vessel from Wola Sękowa on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) analysis (wt %). Processing A. Garbacz-Klempka

Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
brzusiec	0,03	0,09	0,28	80,59	0,11	0,62	0,29	11,36	0,94	5,65	0,05
kabłak	< 0,025	0,08	0,31	86,63	0,13	0,41	0,27	8,10	0,86	3,17	0,05
stopka	0,04	0,08	0,25	80,33	0,15	0,79	0,29	11,51	0,93	5,21	0,05



Ryc. 115. Wola Sękowa (kat. IV.2). Skręt brązowy. Fot. P. Jurecki

Fig. 115. Wola Sękowa (cat. No. IV.2). Bronze twist. Photo P. Jurecki

Tab. 21. Wyniki składu chemicznego skręta brązowego z Woli Sękowej (kat. IV.2) na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.). Oprac. A. Garbacz-Klempka

Tab. 21. Results of the chemical composition of the bronze twist from Wola Sękowa (cat. No. IV.2) on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) analysis (wt %). Processing A. Garbacz-Klempka

Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
Kat. IV.2 skręt	< 0,025	0,13	0,33	84,43	0,16	0,42	0,15	11,14	0,76	2,07	0,06

0-0,1% (Tab. 19; Ryc. 113). Najwyższe zawartości, równe 0,34-0,36% Ni, odnotowano dla tarczki odlewanej o numerze kat. III.5 oraz wspomnianego pierścienia.

Na koniec warto jeszcze porównać skład chemiczny tarczki zdobionych wykonanych techniką przeróbki plastycznej (kat. III.1-2, 4, 7-8) z tarczki odlewanych (kat. III.3, 5-6). Zawartość pierwiastków w tarczki zamieszczono w kolejnych histogramach (Ryc. 104, 106, 108, 110, 112). W tarczki odlewanych znajduje się średnio mniej miedzi i równocześnie więcej cyny i ołowiu niż w tarczki wycinanych z blachy

brązowej. Tarczki odlewane posiadają też więcej pierwiastków stanowiących naturalne zanieczyszczenie, jak arsen, antymon, srebro, cynk, nikiel (Tab. 19). Różnice te są jednak bardzo niewielkie i można je uznać za nieistotne. Trudno wydzielić tu konkretne surowce, a tym bardziej przypisać je do techniki wykonania.

Wola Sękowa

Analizom poddano dwa zabytki: brązowe naczynie na stopce (kat. IV.1) i jeden ze spiralnych skrętów (*saltaleone*) (kat. IV.2).

Tab. 22. Wyniki składu chemicznego naczyń z Zarszyna na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.). Oprac. A. Garbacz-Klempka
 Tab. 22. Results of the chemical composition of the artefacts from Zarszyn on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) analysis (% wt). Processing A. Garbacz-Klempka

Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
Kat. V.1 naczynie	0,27	0,10	0,08	86,39	0,10	0,10	0,10	12,58	0,13	0,11	0,05
Kat. V.2 naczynie	0,20	0,10	0,04	92,50	0,10	0,10	0,10	6,44	0,28	0,08	0,05
Kat. V.3 naczynie	0,17	0,10	0,07	92,51	0,10	0,10	0,10	6,60	0,10	0,10	0,05
Kat. V.4 naczynie	1,43	0,10	0,10	85,90	0,03	0,10	0,10	12,25	0,10	0,04	0,05
Kat. V.5 naczynie	0,46	0,10	0,05	92,11	0,02	0,10	0,10	6,89	0,10	0,03	0,05
Kat. V.5 ucho	0,08	0,09	0,88	85,74	0,17	0,29	0,01	12,64	0,08	< 0,020	0,03
Kat. V.6 ucho	0,05	0,08	0,55	85,91	0,12	0,41	0,04	12,63	0,16	0,03	0,02

Na podstawie obserwacji i zdjęć rentgenowskich (Ryc. 114) można stwierdzić, że brzusiec naczynia został odlany w całości i połączony ze stopką, która również została wykonana z wykorzystaniem techniki odlewniczej. Na powierzchni brzuśca i stopki nie widać śladów połączenia trwałego np. w postaci lutu, a skomplikowany kształt i brak widocznego śladu podziału formy wskazują na wykorzystanie do odlania naczynia metody wytapianych modeli. Stopka została umocowana w dolnym otworze brzuśca poprzez wsunięcie i zagięcie nadmiarowego materiału tworzącego wewnętrzny kołnierz (Ryc. 114:g-l). Na zdjęciach rentgenowskich widoczne jest wywiniecie i zaklepanie kołnierza wraz z charakterystycznym pęknięciem materiału wynikłym z obróbki górnej części stopki (Ryc. 114:h-i). W strukturze brzuśca widoczne są zniszczenia korozyjne, a w górnej części porowatości gazowe. Występują one szczególnie w górnej części naczynia, szczególnie w obydwu uszkach, co może sugerować kierunek zalewania od strony uszek. Na brzuścu naczynia widoczne jest także znaczne pęknięcie.

Kabłąk naczynia wykonany został z pręta o przekroju kwadratu i skręcony wokół własnej osi, czyli tor-dowany. Końcówki pręta zostały przekute do przekroju okrągłego, a następnie zawinięte w haczyk na uszkach naczynia.

Skład chemiczny naczynia, charakterystyczny dla brzuśca i stopki naczynia, wskazuje na brąz cynowy trójskładnikowy typu Cu-Sn-Pb o zawartości 80,5% miedzi, 11,4% cyny i 5,4% ołowiu (Tab. 20). Z dodatków charakterystycznych pochodzących z rud należy wymienić antymon (0,9%), arsen (0,7%), srebro (0,3%), nikiel na poziomie 0,3% oraz cynk (0,1%). Kabłąk ma nieco odmienny skład chemiczny i zawiera 86,6% miedzi, 8,1% cyny i 3,2% ołowiu. W składzie występuje również antymon, arsen, cynk, nikiel i srebro w ilościach wskazujących na wspólne pochodzenie surowca.

Z Woli Sękowej pochodzą też skręty brązowe. Zostały one wykonane z taśmy brązowej o przekroju płasko-wypukłym, uzyskanej przez rozklepywanie, kucie w kształtowniku do odpowiedniego przekroju i owijanie wokół trzpienia w celu uzyskania skrętu.

Brązowy skręt (kat. IV.2) (Ryc. 115) reprezentuje grupę brązów cynowych o zawartości 84,4% miedzi i 11,1% cyny, z dodatkiem ołowiu na poziomie 2,1% (Tab. 21). Podwyższony udział dodatków naturalnych, w tym antymonu (0,8%), arsenu (0,4%), niklu (0,3%), srebra i cynku (0,2%), wskazuje na wspólne z naczyniem brązowym źródło surowca.

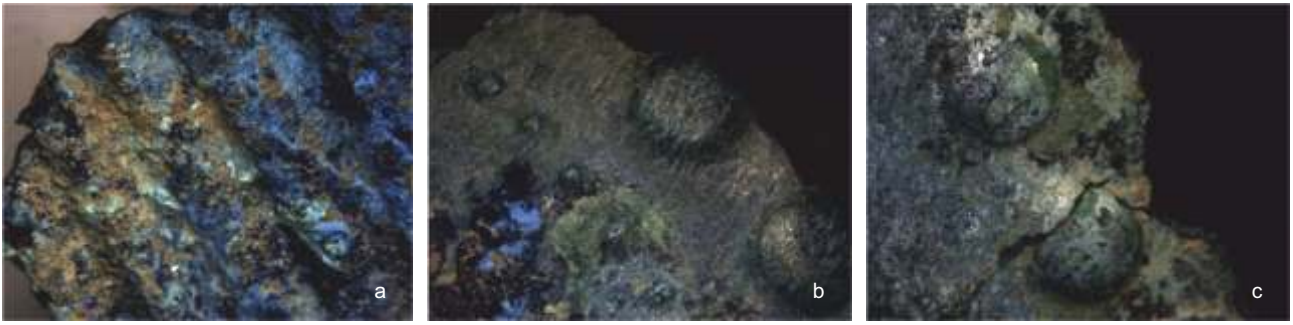
Zarszyn

Analizę naczyń brązowych w dużym stopniu utrudniały nawarstwienia korozyjne. Produkty korozji na powierzchni naczyń i duży stopień zniszczenia wpływają na identyfikację składu chemicznego. Ze względu na stan obiektów zaniechano odsłaniania powierzchni, jeśli groziło to uszkodzeniem zabytku.

Uszko czarki brązowej o numerze kat. V.1 zostało wykonane z blachy i połączone nitami z naczyniem. Pomiar wykonano na powierzchni czarki, otrzymując informację o składzie stopu, zawierającego: 86,4% miedzi i 12,6% cyny oraz 0,1% ołowiu z udziałem niewielkich ilości antymonu, arsenu i niklu (Tab. 22). Zbliżony pod względem zawartości cyny jest skład naczynia o numerze kat. V.4, o zawartości 95,9% miedzi i 12,3% cyny (Tab. 22). Czarka ta jest zdobiona techniką rytowania w postaci drobnych rowków oraz techniką repusowania, którą uzyskano ornament składający się z większych guzów. Zdobienie czarki uzupełnia rząd wybitych drobnych punktów (Ryc. 116).

Uszko czarki brązowej (kat. V.2) wykonano z blachy i połączono z naczyniem dwoma nitami. Pomiar wykonano na powierzchni czarki. W składzie chemicznym wyodrębniono: 92,5% miedzi i 6,4% cyny (Tab. 22). Podobny skład chemiczny reprezentuje czarka brązowa o numerze kat. V.3, którą cechuje 92,5% zawartości miedzi i 6,6% cyny. Zbliżony jest również skład kolejnej czarki o numerze kat. V.5 (Ryc. 117) o zawartości 92,1% miedzi i 6,9% udziału cyny (Tab. 22).

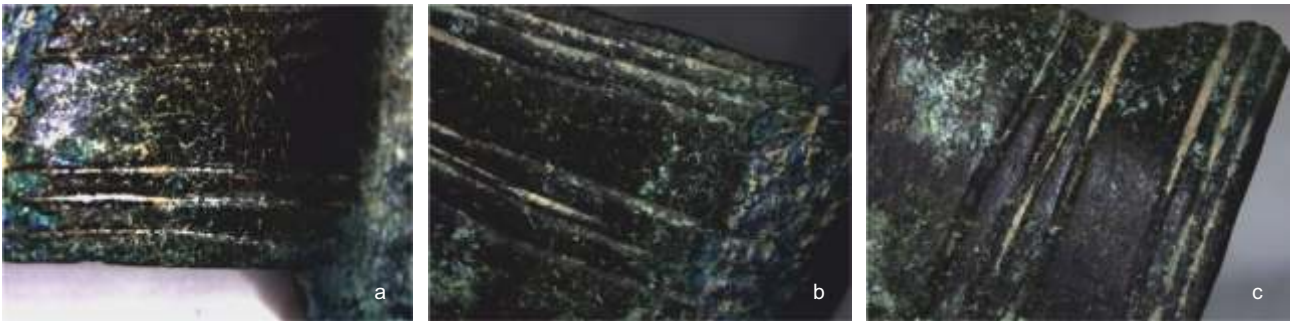
Sposób wykonania wzoru i grubość uszka naczynia brązowego (kat. V.5) zdobionego rytowaniem (Ryc. 118) wskazują na zastosowanie techniki odlewniczej; wzór wykonano na modelu woskowym i na-



Ryc. 116. Zarszyn. Czarka brązowa (kat. V.4) z widocznymi zdobieniami powierzchni: a – żłobienie, b – drobne punkty, b-c – guzy. Fot. P. Jurecki
 Fig. 116. Zarszyn. Bronze cup (cat. No. V.4) with visible surface ornaments: a – engraving, b – small dots, b-c – knobs. Photo P. Jurecki



Ryc. 117. Zarszyn. Czarka brązowa (kat. V.5). Fot. P. Jurecki
 Fig. 117. Zarszyn. Bronze cup (cat. No. V.5). Photo P. Jurecki



Ryc. 118. Ucho naczynia brązowego (kat. V.5): a-c – widoczne zdobienie. Fot. P. Jurecki
 Fig. 118. Handle of the bronze vessel (cat. No. V.5): a-c – visible ornament. Photo P. Jurecki



Ryc. 119. Ucho naczynia (kat. V.4): a-c – widoczne zdobienie, b – widoczne odkształcenie modelu woskowego. Fot. P. Jurecki
 Fig. 119. Handle of the bronze vessel (cat. No. V.4): a-c – visible ornament, b – visible deformation of the wax model. Photo P. Jurecki

Tab. 23. Opracowanie statystyczne wyników składu chemicznego naczyń z Zarszyna na podstawie analizy spektroskopii fluorescencji rentgenowskiej ED-XRF (% mas.): wartości minimalne, maksymalne, średnia, mediana, odchylenie standardowe. Oprac. A. Garbacz-Klempka

Tab. 23. Statistical processing of the results of the chemical composition of the vessels from Zarszyn on the basis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF) (wt %): minimum and maximum values, mean, median, standard deviation. Processing A. Garbacz-Klempka

Pierwiastek	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
średnia	0,05	0,08	0,04	85,74	0,02	0,10	0,01	6,44	0,08	0,03	0,02
min	1,43	0,10	0,88	92,51	0,17	0,41	0,10	12,64	0,28	0,11	0,05
max	0,38	0,10	0,25	88,72	0,09	0,17	0,08	10,00	0,14	0,07	0,04
mediana	0,20	0,10	0,08	86,39	0,10	0,10	0,10	12,25	0,10	0,06	0,05
odchylenie standardowe	0,45	0,01	0,31	3,17	0,05	0,12	0,04	2,92	0,06	0,03	0,01

stepnie pogłębiono na gotowym odlewie, co widoczne jest na podstawie obserwacji makroskopowych. Ostre krawędzie ornamentu świadczą o wykonaniu go ostrym narzędziem typu rylec po odlaniu, a jednocześnie ich głębokość świadczy, iż nie mogły powstać w jednej operacji, lecz jako pogłębienie ornamentu wytworzonego wcześniej na etapie modelu woskowego. Ucho wykonano z brązu cynowego o zawartości 85,7% miedzi, 12,6% cyny. Charakterystyczne są również pierwiastki pochodzące z rud miedzi, wśród których największą zawartość wykazuje nikiel – na poziomie 0,9%, a następnie arsen (0,3%), cynk (0,2%) i antymon (0,1%) (Tab. 22).

Ucho brązowe (kat. V.4) (Ryc. 119) wykonano techniką odlewniczą metodą wytapianych modeli. Wzór wykonano na modelu woskowym. W obserwacjach makroskopowych widoczne są nieregularności wzoru wynikające z odkształcenia modelu woskowego. Ucho odlano z brązu cynowego o składzie podobnym do ucha o numerze kat. V.5. W wyniku analizy oznaczono zawartości miedzi na poziomie 85,9%, cyny – 12,6% oraz 0,6% niklu, 0,4% arsenu, 0,2% antymonu (Tab. 22).

Najwyższa zawartość miedzi jest charakterystyczna dla naczyń o numerach kat. V.2-3 oraz V.5 i wynosi 92,1-92,5% przy zawartości cyny 6,4-6,9% (Tab. 22-23). Z kolei najwyższa zawartość cyny występuje w naczyniach o numerach kat. V.1, V.4 oraz uchach naczyń o numerach kat. V.4-5 i wynosi 12,3-12,6% przy zawartości miedzi 85,7-86,4% (Tab. 22-23). Uszka są zbliżone do składu naczyń pod względem zawartości miedzi i cyny, mają jednak podwyższoną w stosunku do nich zawartość arsenu, cynku i niklu.

Czarki wykonane zostały z blachy wykutej do odpowiedniej grubości, dociętej do właściwej średnicy

i następnie wyoblonej metodą kucia wgłębnego, przy czym płat blachy każdorazowo był poddany obróbce cieplnej. Operacja ta była wykonywana wielokrotnie, aż do uzyskania kształtu charakterystycznego dla każdej z czarek. Na kolejnym etapie wykonywano wyrównywanie i wykończenie naczynia po zewnętrznej stronie (Armbruster 2012). Otwór do mocowania ucha wybijany był od zewnątrz do środka naczynia (kat. V.4-5). Uszka nitowano. Zdobienia były puncowane i punktowane.

Podsumowanie

Interdyscyplinarne podejście w badaniach dziedzictwa kulturowego wymaga zastosowania szeregu nowoczesnych metod badawczych, skorelowanych z wiedzą techniczną, znajomością materiałów i procesów technologicznych, służących rozwiązaniu tajemnicy produkcji na podstawie śladów pozostawionych przez konkretne techniki. W pracy wykorzystano dostępne nieniszczące metody badawcze w zakresie obserwacji powierzchni, struktury, mikrostruktury i profilu chemicznego zabytków metalowych pochodzenia archeologicznego z czterech skarbów odkrytych w okolicach Sanoka. Do istotnych aspektów należy próba sekwencyjnego określenia sposobów wytwarzania i wykończenia, w tym technik zdobienia obiektów. W rozdziale dokonano omówienia technik odlewniczych i procesów przeróbki plastycznej bezpośrednio powiązanych z badanym materiałem. Stwierdzono dobrą znajomość różnorodnych technik wytwórczych i zdobniczych, widoczną w dużym zróżnicowaniu rodzajów i typów omawianych wyrobów. Widoczne wady odlewnicze i wady wynikające z procesów przeróbki plastycznej jednoznacznie identyfikują i rozróżniają te procesy.

A metallurgical and technological analysis of the artefacts from the hoards discovered in Falejówka (hoard II), Zarszyn (hoard II), Wola Sękowa and Sanok (Biała Góra)

Aldona Garbacz-Klempka
Piotr Jurecki

Summary

Examinations of the composition and microstructure of archaeological metal artefacts require the use of a number of specialist research methods which allow for a precise characteristics of studied finds. They enable the researcher to identify metal materials and to relate or differentiate artefacts in a group with regard to their technology or material.

Among significant issues there is an identification of finishing methods, including ornamentation techniques of artefacts and joining of various metals. In combination with examinations of the chemical compositions in macro- and microzones it is possible to carry out a detailed material and technological analysis.

These archaeological artefacts found by incidental discoverers underwent qualitative and quantitative chemical and microstructural analyses. The finds were discussed with regard to their structure and the chemical composition, as well as the technology of manufacture. What was done were, among others, macro- and microscopic observations (light microscopy), analyses of the chemical composition using X-ray fluorescence spectroscopy (ED-XRF), as well as examinations with the use of scanning electron microscopy (SEM) with the microanalytical energy dispersive spectroscopy (EDS) method of analysing the chemical composition. In selected cases examinations of internal structures were carried out using the radiographic (CR) method.

Falejówka. The bracelets from this hoard can be divided into a few separate groups with regard to their technology of manufacture. This assemblage included massive bracelets that were cast, as well as those made using plastic formation of a cast or forged rod. Ornaments can be seen on the bracelets' surfaces. Among these ornaments there were both decorations made on a wax model and those engraved on ready artefacts. On the bracelets there are fissures that originated in result of the material deformation in the course of processing. Concerning the alloy chemistry, all the bracelets belong to a group of binary Cu-Sn tin bronzes. The bracelets with the tin content of 5-7% are the most numerous.

The necklaces from Falejówka were cast or were formed from a rod into a shape of not closed rims. They were decorated with an ornament of obliquely arranged incisions.

Concerning the sickles with knobs, their flat bottom parts and spatially shaped top parts demonstrate the application of casting technique with the use of articulated moulds.

In general terms, the copper contents in the artefacts from Falejówka are 83-94%, the tin contents are 0.3-12.3%, and the lead contents – 0.14-3.31%.

Sanok (Biała Góra). The artefacts from this hoard were mostly made by the plastic forming technique with the use of forging, hammering and shaping with a bending block or a matrix. This technique was used for fittings (cat. Nos. III.28,351), small discs (cat. Nos. III.1-2,4,7-8) and the pendant (cat. No. III.369). The other manufacturing technique, which was identified for a minority of the artefacts, was casting. It was used for more massive discs (cat. Nos. III.3,5-6) and the ring (cat. No. III.370). All the artefacts were made of tin bronze with the following composition: 84.4-91.7% copper, 5-12.3% tin and 0.2-2.54% lead.

Wola Sękowa. Two artefacts underwent metallurgical examinations: the bronze vessel with a foot (cat. No. IV.1) and one of the *saltaleone* coils (cat. No. IV.2). On the basis of observations and X-ray photos it can be said that the vessel's body was cast in whole and it was joined with the foot which was also made by casting. No traces of joining can be seen on the surface of the body and the foot. The absence of visible traces of parting lines imply that the *cire-perdue* method was used for casting this vessel. The vessel's bail was made from a rod using the twisting technique. The chemical composition of the vessel, both for the body and the foot, implies ternary Cu-Sn-Pb bronze with the content of 80.5% copper, 11.4% tin and 5.4% lead.

Zarszyn. The analysis of the bronze vessels was to a great degree impeded by corrosion layers. Handles of bronze cups were either made from a metal sheet or cast, and then they were joined with the vessels using a rivet. The cups themselves were made from a metal sheet that was forged until it reached an appropriate thickness. Then, it was cut to a proper diameter and was rounded by means of concave hammering. The metal sheet was each time subject to heat treatment. This process was repeated many times until a shape that was characteristic of each cup was obtained. An opening for handle fastening was pierced from outside toward the interior of the vessel. The handles were riveted. Ornaments were made by punching and dotting. The cups and the handles were made of tin bronze with 85.7-92.5% copper and 6.4-12.6% tin.

On the surfaces of the artefacts there were traces left in the course of model preparation, processing of ready artefacts. What was also observed were defects left by deformation and thermal fatigue in the course of the shaping process. By means of an insightful analysis, such technological traces as casting flaws and traces of processing and plastic deformation lead to an attempt at reconstructing subsequent operations that testify to the applied manufacturing and ornamentation techniques. Two manufacturing techniques were used for the examined artefacts: casting and plastic formation with heat treatment. Many ornaments were decorated and these decorations were made both on ready artefacts as part of the finishing process and on wax models in the case of cast artefacts. The basic raw material that was used in the manufacture of the ornamented artefacts were binary Cu-Sn tin bronzes. In individual cases these tin bronzes contained an addition of lead. The tin bronzes with alloying additions in quantities that were identified in samples possess peculiar traits. These traits render these alloys suitable for casting and plastic treatment. Tin bronzes are well-suited for cold and hot plastic treatment. Additions of tin and lead to the alloy are intended to improve its technological, functional and aesthetic properties.