

DAWID SYCH, BEATA BADURA, MAŁGORZATA MOMOT, KATARZYNA PAZDUR

TRASEOSKAN 3D – ZASTOSOWANIE SKANOWANIA 3D W ANALIZACH TRASEOLOGICZNYCH ARTEFAKTÓW BRĄZOWYCH

TRASEOSKAN 3D – APPLICATION OF 3D SCANNING IN TRACEOLOGICAL ANALYSIS OF BRONZE ARTIFACTS

Abstract: The purpose of this article is to present the results of “TraseoScan 3D” project implemented with the support of Upper Silesia Branch of Polish Archaeological Association, Upper Silesia Museum in Bytom, Silesian Museum in Katowice and Farm 51. The main aim of the project was to present, on the basis of bronze sword from Strzelniki, the possibilities that 3D scanning combined with high definition microscopic images offers in the field of traceological analysis of metal artefacts. Project “TraseoScan3D” has shown that 3D models are perfect not only for the purpose of presenting the results of traceological analysis, therefore teaching the method itself, but also they can be used for exhibition purposes – both to create virtual displays, as well as to produce replicas for the purpose of standard exhibitions. Author also point the attention to benefits stemming from the creation of public database of traces on metal objects on the basis of 3D and microscopic images. 3D scan of the bronze sword from Strzelniki can be found under the following link:
<https://sketchfab.com/models/a7186f7a9c7e486b9047bae56a95cc1c>

Keywords: 3D scanning, Bronze Age, traceology, 3D microscope, digital microscope

WSTĘP

Do rejestrowania śladów produkcji i użytkowania na artefaktach brązowych wykorzystywano różne metody, począwszy od odcisków w plastycznych masach (Roberts, Ottaway 2003), przez fotografie makroskopowe oraz mikroskopowe wykonane przy użyciu stacjonarnych i przenośnych mikroskopów cyfrowych (Dolfini, Crellin 2016), po trójwymiarowe skany (Molloy *et al* 2016). Głównym celem tego artykułu jest prezentacja na przykładzie miecza brązowego ze Strzelnik możliwości, jakie skanowanie

D. Sych, dawid.sych@gmail.com, Oddział Górnośląski Stowarzyszenia Naukowego Archeologów Polskich, pl. Jana III Sobieskiego 2, 41-902 Bytom

B. Badura, b.badura@muzeum.bytom.pl, Muzeum Górnośląskie w Bytomiu, plac Sobieskiego 2, 41-902 Bytom

M. Momot, m.momot@muzeumslaskie.pl, Muzeum Śląskie w Katowicach, ul. T. Dobrowolskiego 1, 40-205 Katowice

K. Pazdur, The Farm 51 Group SA, ul. Bohaterów Getta Warszawskiego 15, 44-102 Gliwice

3D w połączeniu z wysokiej jakości zdjęciami mikroskopowymi oferuje na polu analiz traseologicznych artefaktów metalowych.

Skanowanie 3D to technika, która od pewnego czasu stosowana jest powszechnie nie tylko do skanowania artefaktów, ale także obiektów, a nawet całych stanowisk archeologicznych (Forte 2010), zarówno za granicą, jak i w Polsce, *vide* projekt „Wirtualne Muzea Małopolski” (<http://muzea.malopolska.pl/o-nas>), w ramach którego do 2020 roku zdigitalizowanych w 2D i 3D zostanie przynajmniej 1500 eksponatów z 20 muzeów, galerii i instytucji z Małopolski. Na rosnącą popularność tej techniki wyraźnie wskazuje też rosnąca liczba projektów i ofert skanowania 3D. Jeżeli chodzi natomiast o zastosowanie jej na polu analiz traseologicznych, dopiero od niedawna podejmowane są takie próby (Molloy *et al* 2016).

Analizy traseologiczne, zdjęcia mikroskopowe i skan 3D wykonano w ramach projektu „TraseoSkan3D”, który sfinansowany został ze środków Oddziału Górnośląskiego Stowarzyszenia Naukowego Archeologów Polskich. Zabytek wypożyczony został ze zbiorów Muzeum Górnośląskiego w Bytomiu. Skany 3D wykonano w gliwickiej firmie The Farm 51, a zdjęcia mikroskopowe w Dziale Konserwacji Muzeum Śląskiego w Katowicach.

MATERIAŁY I METODY

Pierwszym etapem projektu TraseoSkan 3D było wykonanie trójwymiarowego skanu miecza. Zadania tego podjęła się firma The Farm 51 z Gliwic, która specjalizuje się w nowoczesnych rozwiązaniach graficznych, takich jak skanowanie 3D lokacji i obiektów, zdjęcia sferyczne, filmy stereoskopowe czy rozwiązania VR (tzw. rzeczywistość wirtualna) i AR (tzw. rzeczywistość rozszerzona). Skan 3D wykonano przy użyciu dwóch technik: fotogrametrii i światła strukturalnego. W drugim etapie w Dziale Konserwacji Muzeum Śląskiego w Katowicach wykonano zdjęcia mikroskopowe i trójwymiarowe skany śladów produkcji i użytkowania widocznych na mieczu przy pomocy specjalistycznego mikroskopu cyfrowego Hirox RH-2000. Na miejscu zrobiona została seria zdjęć detali miecza w powiększeniu 35×. W trzecim etapie skan 3D i zdjęcia mikroskopowe zostały ze sobą połączone w platformie Sketchfab, która pozwala na przechowywanie na swoich serwerach trójwymiarowych skanów przedmiotów i obiektów.

MIECZ ZE STRZELNIK

W 1891 roku Friedrich von Falkenhausen kupił od antykwariusza Heinscha z Kamieńca (niem. *Camenz, Kamenz*) dwa przedmioty z brązu – miecz i fragment zdobionej szpili (Seger 1906, 54, ryc. na s. 55). Miecz został znaleziony w 1883 roku, o czym świadczy wyryta na głowni data (ryc. 1) przez zarządcę Traugotta Kuhnerta i jego syna podczas orki na polu majątku ziemskiego. Wyorano go z głębokości 30–35 cm. Miejsce odkrycia znajdowało się między Strzelnikami (niem. *Jägerndorf*) a Zwanowicami

(niem. *Schwanowitz*), przy granicy gruntów rolnych obu miejscowości, 30 m na lewo od drogi (tamże, 55; ryc. 2). Właściciel miecza przekazał go do muzeum na wystawę (tamże). Zabytek znajduje się obecnie w zbiorach Muzeum Górnośląskiego w Bytomiu, gdzie został zainwentaryzowany pod numerem B.839/4092:58.

Miecz (ryc. 3), wielokrotnie opisywany i wzmiankowany w literaturze (Seger 1906; Pfützenreiter 1936; Fogel

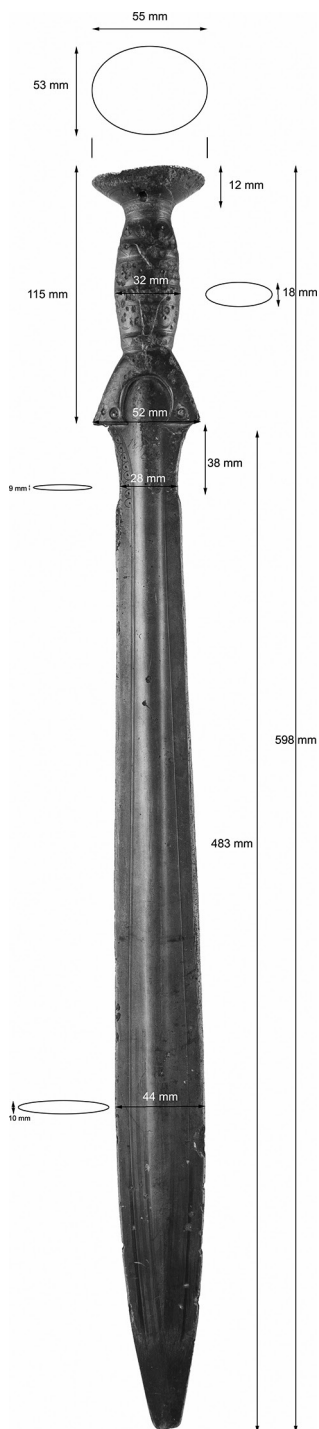


Ryc. 1. Data 188(3?) wyryta na głowni miecza najprawdopodobniej oznaczająca rok znalezienia – zbliżenie. Fot. W. Szoltys



Ryc. 2. Przybliżona lokalizacja miejsca odkrycia miecza. Fragment mapy Messtischblatt 5171 Stoberau 1937. Źródło: http://maps.mapywig.org/m/German_maps/series/025K_TK25/5171_Stoberau_1937.jpg

Ryc. 3. Miecz ze Strzelnik, pow. brzeski. Nr inwentarza B.839/4092:58, zbiory Muzeum Górnośląskiego w Bytomiu. Fot. W. Szoltys)



1979, 1988; Blajer 2001), jest okazem z pełną rękojeścią i miseczkowatą głowicą, tzw. typu węgierskiego – typ XXI, podtyp B odpowiadający podtypowi Königsdorf, wariant II H. Müllera-Karpego (Fogel 1979, 56). Datowanie tego podtypu opiera się właściwie jedynie na chronologii słynnego skarbu z Hajduböszörmény, Kom. Hajdu, odnoszącego się do fazy HB1 (tamże, 57, tam też opis zabytku; Blajer 2001, 127).

Wymiary miecza: długość całkowita 598 mm, długość głowni 483 mm, szerokość maksymalna głowni 44 mm, grubość głowni 10 mm; długość górnej części głowni („ricasso”) 38 mm, szerokość 28 mm, grubość 9 mm; długość rękojeści 115 mm, szerokość maksymalna trzonu rękojeści 32 mm, grubość trzonu rękojeści 18 mm, szerokość maksymalna rękojeści („jelca”) 52 mm, średnice głowicy 55 mm i 53 mm, wysokość głowicy 12 mm, waga 929 g.

SKANOWANIE 3D

Skanowanie miecza brązowego ze Strzelnik zrealizowano dwiema metodami dla porównania wyników i szybkości procesów – fotogrametryczną (ryc. 4) i przy pomocy światła strukturalnego (ryc. 5). Na skanowanie fotogrametryczne składało się wykonanie około 300 zdjęć przy stałej przesłonie F20 i długości ogniskowej 135 mm, w tym przypadku aparatem cyfrowym Canon 70D z obiektywem 18-135 mm z f 3,5-5,6.

Miecz przygotowano do procesu poprzez przymocowanie do pionowego statywu oraz dodanie naklejek z punktami odniesienia i znacznikami, wykorzystywanymi już w programie do późniejszej obróbki. Całość tego zestawu znajdowała się w namiocie bezcieniowym i tradycyjnie oświetlona była z zewnątrz. Czas przygotowania oraz wykonania zdjęć wynosił około 2,5 godzin.

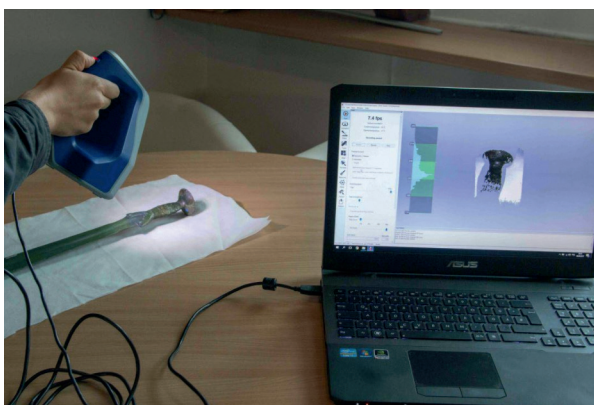
Następnie w programie Agisoft Photoscan przeliczono chmury punktów dla każdej ze stron miecza i rękojeści. Kolejnym etapem było połączenie tych chmur w jedną. Wystąpił jednak problem z dokładnością łączenia na krawędziach przedmiotu. Etap dopasowywania chmur był najdłuższym w całym procesie. Teoria i matematyka rządzą się swoimi prawami, a praktyka pokazała, że nie można było uzyskać 100-procentowego pokrycia dwóch połówek miecza. Albo rozchodziły się ostrza, albo dopasowanie sztychu generowało przenikanie się krawędzi bocznych. Konieczna była optymalizacja danych dla uzyskania pożądanego efektu wizualnego. Program poradził sobie ze zniekształceniami obiektu, ale takie błędy nie są widoczne tylko na większych kubaturach.

Następnie wygenerowano siatkę o maksymalnie możliwej liczbie trójkątów i teksturę, czyli fotorealny obraz. Kolejnym krokiem było zoptymalizowanie siatki poprzez zmniejszenie liczby trójkątów tak, aby nie była zbyt „ciężka”, i przeliczono ponownie teksturę. Osiągnięto zadowalający efekt detalu przy 40 tysiącach trójkątów. Dzięki temu, model można importować na przykład na stronę Sketchfab, która umożliwia wirtualny dostęp do skanu dla wszystkich chętnych. Niestety, czas poświęcony na tworzenie, a zwłaszcza postprodukcję, okazał się dość długi. Liczymy go w dniach, dlatego śmiało można powiedzieć, że jest mało ekonomiczny i zależy od wielu czynników.

Ryc. 4. Fotogrametria miecza. Fot. D. Sych)



Ryc. 5. Skanowanie światłem strukturalnym. Fot. K. Pazdur



Druga metoda zakładała wykonanie skanu 3D przy użyciu światła strukturalnego. Do tego celu wykorzystano skaner o nazwie Space Spider, który według swoich specyfikacji nie powinien mieć problemów z zeskanowaniem detali i cienkich krawędzi. Czas spędzony na skanowaniu i obróbce wynosił około 2 godzin. Miecz skanowany był w 3 pozycjach, z tą różnicą, że nie był podwieszony, ale położony na białym tle. Skanowanie to nie wymagało też stosowania znaczników pomocniczych. W tym przypadku proces liczenia był znacznie krótszy, ale składanie 3 skanów także stanowiło problem. Program złożył automatycznie ostrze w taki sposób, że krawędzie nie schodziły się i tworzyły niedomknięte przestrzenie. Po wygenerowaniu siatki, utworzyła się nieistniejąca struktura „poduszki”.

Mając już gotowy model z fotogrametrii, nie skupiano się na tak precyzyjnych poprawkach skanu pochodzącego z drugiej metody. Problem ponownie wynikał z małej liczby punktów wspólnych na krawędziach i odbłasków metalu, którego nie można było zmatowić sprayem, aby nie narazić eksponatu na ewentualne uszkodzenia przy późniejszym czyszczeniu. Być może inne ułożenie do skanowania miałoby lepszy wpływ na końcowy wynik. Jeżeli można przystać na ustępstwa w dokładności

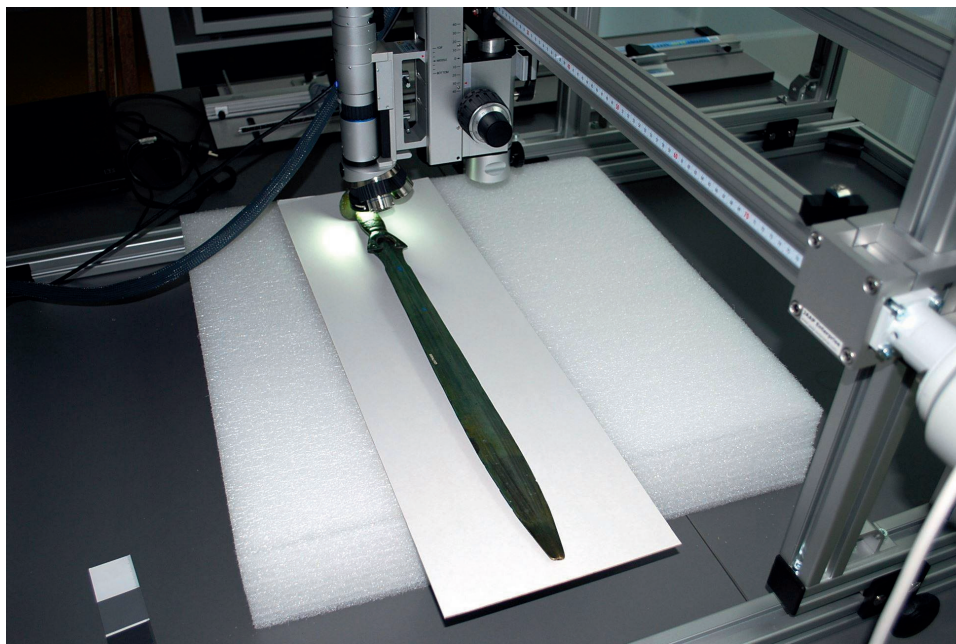
i precyzyjności, to skanowanie światłem strukturalnym wydaje się właściwszym rozwiązaniem.

Skan 3D miecza brązowego ze Strzelnik można znaleźć pod adresem: <https://sketchfab.com/models/a7186f7a9c7e486b9047bae56a95cc1c>

BADANIA MIKROSKOPOWE

Obserwację przeprowadzono przy użyciu mikroskopu cyfrowego Hirox RH-2000, wyposażonego w dwa wymienne obiektywy. Obiektyw zmiennoogniskowy dający powiększenie od 20× do 160× oraz obiektyw rewolwerowy o powiększeniu od 35× do 2500×, oba wyposażone w filtry polaryzacyjne. Rejestrację obrazu nieruchomego wykonywano dla porównania dwoma obiektywami. Do obserwacji i badań wytypowanego obiektu archeologicznego przydatniejszy okazał się obiektyw zmiennoogniskowy z zamontowanym adapterem rozpraszającym światło odbite.

Mikroskop wraz z obiektywem został zamontowany na półautomatycznym statywie stołowym (ryc. 6), pozwalającym na obserwację w osiach X i Y płaszczyzn obiektów o dużych rozmiarach. Podczas rejestracji obrazu wideo w czasie rzeczywistym wykorzystano również głowicę obrotową z założonym adapterem dyfuzyjnym, zamontowaną do obiektywu zmiennoogniskowego, umożliwiającą – bez przesuwania statywu – dookólną obserwację badanego miejsca.



Ryc. 6. Mikroskop wraz z obiektywem zamontowany na półautomatycznym statywie stołowym.
Fot. D. Sych)

Nieruchomy obraz mikroskopowy w powiększeniu od 20 do 60 $\times$ rejestrowano w formacie TIFF o rozdzielczości 1920 $\times$ 1200 pikseli. Z zastosowaniem oprogramowania umożliwiającego syntezę głębi ostrości łączono do kilkunastu wyostrzonych obrazów w jedną fotografię mikroskopową. Natomiast obraz wideo rejestrowano w formacie AVI i jakości HD w powiększeniu 40 $\times$. W rozdzielczości 1920 $\times$ 1200 pikseli w standardzie WUXGA (ang. *Widescreen Ultra Extended Graphics Array*) nagrywano obraz z prędkością 15 klatek na sekundę.

Przy rejestracji śladów użytkowania miecza pomocne okazało się oprogramowanie (ryc. 7), umożliwiające tworzenie map 2D i 3D. Dzięki łączeniu w czasie rzeczywistym obrazów 2D tworzono obraz fotograficzny, przedstawiający poszczególne krawędzie miecza z widocznymi na nim uszkodzeniami. Metoda ta pozwala na jednorazowe uzyskanie obrazów o wielkości do 225 milionów pikseli. Do zapisanego obrazu mikroskopowego, zarówno w formie materiału 2D, jak i 3D, można powrócić w dowolnym momencie, w celu wykonania dodatkowych pomiarów lub edycji zarejestrowanych profili przestrzennych.

Obserwacja obiektu metalowego o intensywnym połysku stanowiła problem przy składaniu wielu obrazów w jedną fotografię mikroskopową. Po ich złożeniu pojawiały się miejscowe nieznaczne przesunięcia obrazu rzędu do kilkunastu μm . Przesunięcia te nie pojawiały się na pojedynczych obrazach, rejestrowanych z poziomu różnych wysokości. Można z tego wywnioskować, że przesunięcia wynikają z błędów



Ryc. 7. Składanie zdjęć detali miecza. Fot. D. Sych

obliczeniowych oprogramowania, a nie są spowodowane niewłaściwą pracą optyki mikroskopu. Połysek, wynikający z odbicia i rozproszenia światła na powierzchni obiektu, utrudniał również łączenie w czasie rzeczywistym obrazów 2D. Z tego względu trzeba było zredukować rozmiar łączonych obrazów do rozdzielczości 800×600 pikseli, co wydłużyło sam proces tworzenia obrazu. Z tego powodu w tym przypadku nie zdecydowano się na łączenie przy użyciu mikroskopu cyfrowego wielu obrazów 3D w jeden model przestrzenny.

REZULTATY

Projekt „TraseoSkan3D” pokazał, że technologia skanowania 3D w połączeniu z wysokiej jakości zdjęciami mikroskopowymi bardzo dobrze sprawdza się zarówno do dokumentacji całych zabytków, jak i analizy śladów produkcji i użytkowania widocznych na pradziejowych przedmiotach wykonanych z metalu, a dzięki serwisom, takim jak przywołany powyżej Sketchfab, trójwymiarowy skan może być wykorzystywany zarówno w celach ekspozycyjnych, jak i edukacyjnych.

Analiza traseologiczna wykazała, że miecz ze Strzelnik nosi ślady produkcji i użytkowania, takie jak szczyrby, stępienia i wygięcia oraz ślady wielokrotnego ostrzenia. Są one widoczne na całej długości głowni, ale skupiają się głównie na sztychu. Analiza traseologiczna potwierdziła to, że zabytek był intensywnie używany przed depozycją. Ślady użytkowania noszą też dwa nieco młodsze miecze brązowe ze znanego skarbu z Gamowa, który znajduje się w zbiorach Muzeum Górnośląskiego w Bytomiu, oraz podobnie datowany miecz z Wąsoszy, który należy do zbiorów Muzeum Archeologicznego we Wrocławiu. Ślady użytkowania dobrze widoczne są też na okazach znacznie starszych, które znane są z terenów Śląska i ziem pogranicznych (Sych 2016, 60–62).

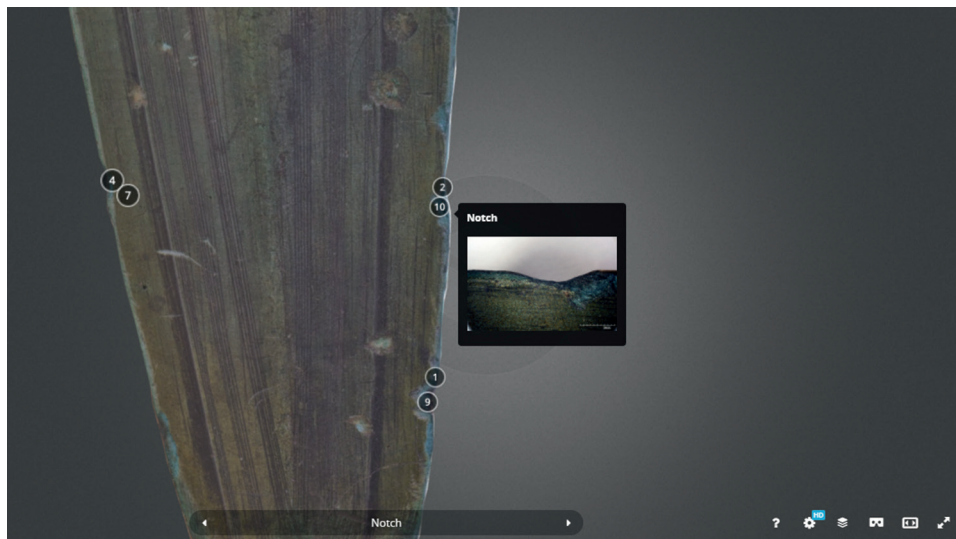
DYSKUSJA

Skany 3D, takie jak skan miecza ze Strzelnik, mogą w przyszłości stać się częścią bazy śladów na zabytkach i replikach, a dzięki wysokiej jakości zdjęciom mikroskopowym będą doskonałym narzędziem do nauki traseologii i porównywania wyników analiz. Skany 3D zebrane w takiej bazie umożliwią też systematyzację i unifikację wiedzy w zakresie badań nad śladami na brązach. Zaletą tego rozwiązania jest też to, że obserwację śladów można prowadzić z poziomu komputera osobistego, na jego ekranie lub za pośrednictwem zestawów wirtualnej rzeczywistości, takich jak na przykład popularny Samsung Galaxy Gear VR, Oculus Rift czy HTC Vive, które pozwalają na obserwację obiektów we wszystkich płaszczyznach. Otwarty dostęp do bazy skanów i zdjęć mikroskopowych, tak jak w przypadku projektu „Wirtualne Muzea Małopolski”, umożliwi prowadzenie własnych analiz oraz formułowanie wniosków szerszemu gronu odbiorców, dla których wgląd do udostępnionych w ten sposób przedmiotów byłby w innym przypadku utrudniony lub wręcz niemożliwy. Osoby zainteresowane tematyką traseologii mogłyby zgłębiać ją bez potrzeby wnioskowania o wypożyczenie

danego zabytku ze zbiorów muzeum i przeprowadzania własnych analiz, a jedynie za pośrednictwem ogólnodostępnych narzędzi, takich jak komputer z dostępem do internetu. Wartość takiego ułatwienia jest bardzo wysoka, zwłaszcza w przypadku osób niepełnosprawnych. Dodatkową korzyścią bazy skanów 3D byłaby możliwość tworzenia wirtualnych kolekcji zabytków oraz ich dokładnych replik – zarówno wykonanych z tworzyw sztucznych, jak i metalu – przy pomocy drukarek 3D na potrzeby wystawiennicze lub do celów edukacyjnych. Skoro mowa już o replikach, należy zaznaczyć, że skanowanie 3D może służyć też rekonstrukcji zabytków archeologicznych, tak jak zostało to zrobione ze zniszczonym mieczem z Kielczy (http://muzeum.bytom.pl/?exhibition=nieznana-historia-miecz-z-kielczy&exhibition_date=2018-05-11).

UWAGI KOŃCOWE

Realizacja projektu „TraseoSkan3D” pokazała, że technologia skanowania 3D to doskonałe narzędzie do prezentowania wyników analiz traseologicznych przedmiotów metalowych, zwłaszcza w połączeniu ze zdjęciami mikroskopowymi. Wysoka jakość trójwymiarowych modeli sprawia, że mogą one znaleźć zastosowanie nie tylko na polu tworzenia dokumentacji całych zabytków, ale także analizy śladów produkcji i użytkowania widocznych na pradziejowych przedmiotach wykonanych z brązu. Co więcej, dzięki serwisom, takim jak przywołany powyżej Sketchfab, który umożliwia przechowywanie skanów 3D na swoich serwerach, model może być wykorzystywany w celach edukacyjnych i ekspozycyjnych (ryc. 8).



Ryc. 8. Skan 3D i zdjęcia mikroskopowe w serwisie Sketchfab. Fot. D. Sych

Podziękowania

Projekt „TraseoSkan3D” sfinansowany został ze środków Górnośląskiego Oddziału Stowarzyszenia Naukowego Archeologów Polskich przy współpracy Muzeum Górnośląskiego w Bytomiu, firmy The Farm 51 i Muzeum Śląskiego w Katowicach.

LITERATURA

- Blajer W. 2001. Skarby przedmiotów metalowych z epoki brązu I wczesnej epoki żelaza na ziemiach polskich. Kraków: Księgarnia Akademicka.
- Dolfini A., Crellin R.J. 2016. Metalwork wear analysis: The loss of innocence, *Journal of Archaeological Science* 66, 78-87.
- Fogel J. 1988. Militaria kultury łużyckiej z dorzecza Odry i Wisły (źródła). Poznań: Uniwersytet im. Adama Mickiewicza.
- Fogel J. 1979. Studia nad uzbrojeniem ludności kultury łużyckiej w dorzeczu Odry i Wisły. Poznań: Uniwersytet im. Adama Mickiewicza.
- Forte M. 2010. *Cyber-archaeology*. Oksford: Archaeopress.
- Molloy B., Wiśniewski M., Lynamc F., O'Neill B., O'Sullivan A., Peatfield A. 2016. Tracing edges: A consideration of the applications of 3D modelling for metalwork wear analysis on Bronze Age bladed artefacts, *Journal of Archaeological Science* 76, 79-87.
- Pfützenreiter F. 1936. *Oberschlesische Bronzeschwerter, Altschlesien*, t. 6, z. 1.
- Roberts B., Ottaway B.S. 2003. The use and significance of socketed axes during the Late Bronze Age, *European Journal of Archeology* 6, 119-140.
- Seger H. 1906. *Schlesische Fundchronik, Schlesische Vorzeit in Bild und Schrift*, Breslau, 48-89.
- Sych D. 2016. Biografie kulturowe militariów oraz narzędzi miedzianych i brązowych datowanych na neolit i epokę brązu z południowo-zachodniej Polski, Niepublikowana praca doktorska, Instytut Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego.