

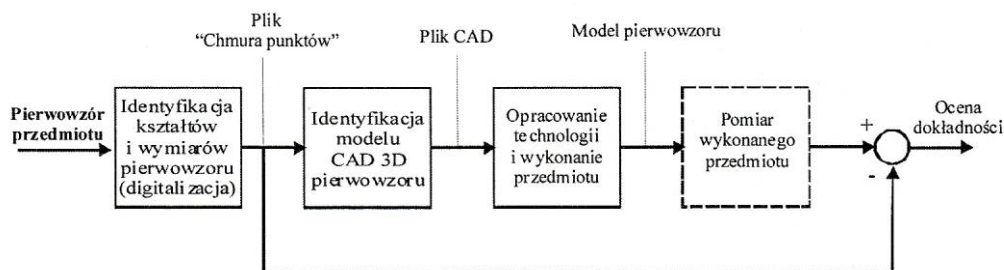
Maciej KAŻMIERCZAK^{1*}

ZASTOSOWANIE INŻYNIERII ODWROTNEJ W REKONSTRUKCYJNYCH PRACACH LUDWISARSKICH

W niniejszym artykule poruszono tematykę dotyczącą zastosowania inżynierii rekonstrukcyjnej w badaniach różnych typów obiektów od technicznych po artystyczne. Badania z przytoczonego zakresu różnią się od siebie przede wszystkim głównym celem ich prowadzenia. Rozważania poparto wynikami przeprowadzonych przez autora prac, których celem było odtworzenia postaci geometrycznej najstarszych w Polsce (1314 i 1389 r.) średniowiecznych dzwonów kościelnych, znajdujących się w Sandomierskim kościele oo. Dominikanów. Etap digitalizacji w rozpatrywanym przypadku przeprowadzono przy użyciu ramienia pomiarowego MCAx20 z laserową głowicę skanującą MMDx100 firmy Nikon Metrology, wyposażonego w oprogramowanie Focus umożliwiające rejestrację i obróbkę uzyskanych chmur punktów oraz tworzenie modelu 3D w postaci siatki trójkątów.

1. WSTĘP – OBSZARY ZASTOSOWAŃ INŻYNIERII ODWROTNEJ

Inżynieria rekonstrukcyjna (rys. 1), funkcjonująca i dynamicznie rozwijająca się obecnie w wielu dziedzinach technik, identyfikowana może być, jako jedna z technik projektowania części maszyn, mocno zintegrowana z systemami komputerowego wspomagania prac inżyniera (CAX), co przekłada się na uproszczenie procesu przygotowania wytworu i jego wprowadzenia do produkcji.



Rys. 1. Schemat postępowania w procesie inżynierii rekonstrukcyjnej [1]

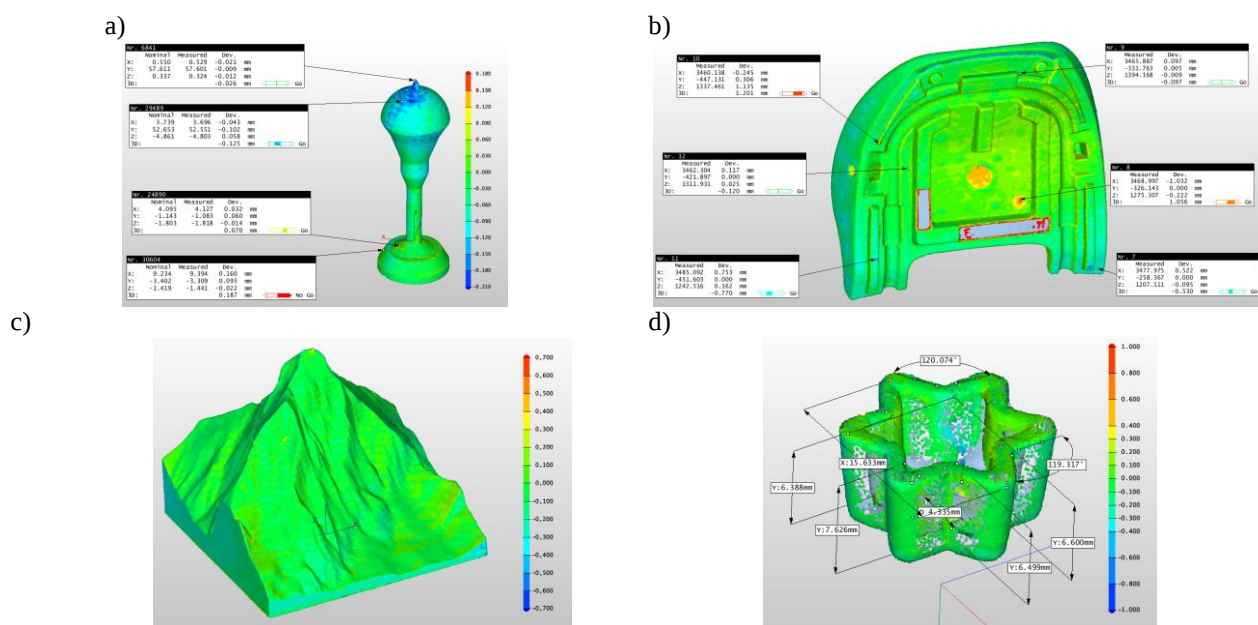
Fig. 1. The steps in the process of reverse engineering

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice

* E-mail: maciej.kazmierczak@polsl.pl

Sposób realizacji jak i cel samego procesu inżynierii rekonstrukcyjnej zależy jest od obiektu stanowiącego przedmiot prowadzonych prac. Podejście to będzie znacząco różne dla obiektów technicznych czy artystycznych.

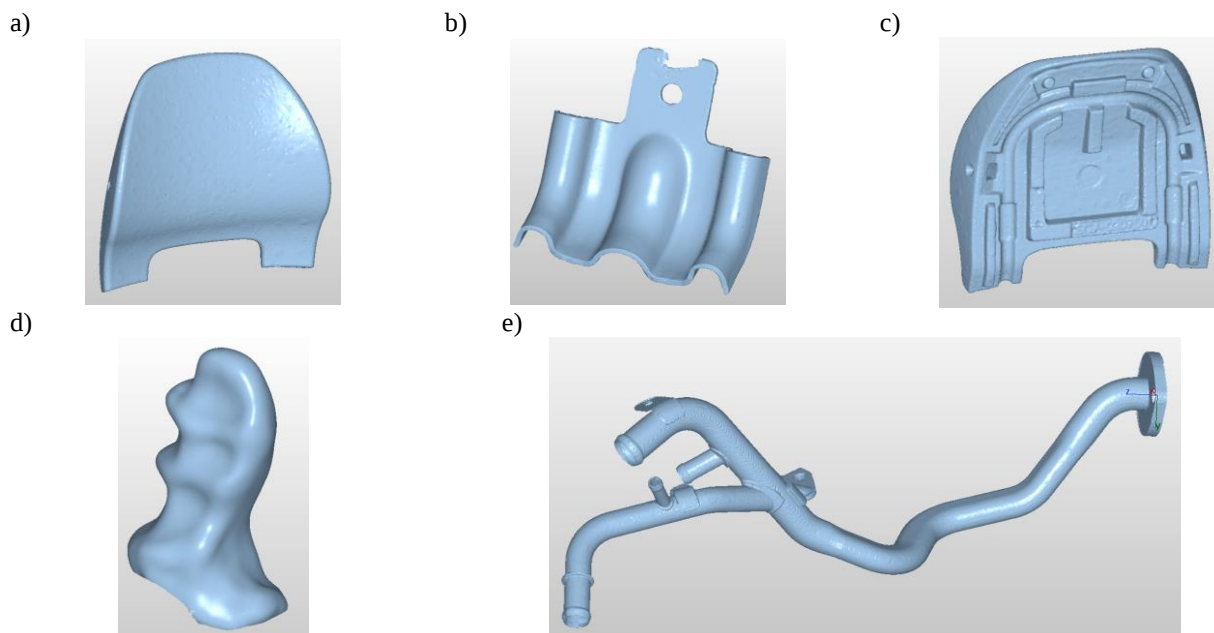
W przypadku obiektów technicznych głównym celem prac będzie stworzenie od podstaw, lub jedynie odtworzenie uszkodzonych fragmentów modeli 3D części maszyn, które mogą stanowić zarówno prototypy jak i uszkodzone gotowe części maszyn. Wiele tego typu przykładów zrealizowanych prac można odnaleźć w literaturze. Często w przypadku obiektów technicznych głównym celem prowadzonych prac jest jedynie inspekcja detalu, czyli kontrola jego poprawności wykonania w odniesieniu do narzuconej specyfikacji, obejmująca kontrolę dokładności wymiarowo-kształtowej (rys. 2). W przypadku tego typu prac najczęściej znajdują zastosowanie współrzędnościowe maszyny pomiarowe jak i ramiona pomiarowe w przypadku konieczności zachowania mobilności narzędzia. [2],[3],[4].



Rys. 2. Przykłady kontroli wymiarowo-kształtowej części maszyn
Fig. 2. Examples of control over dimensionally-profiling parts of machines

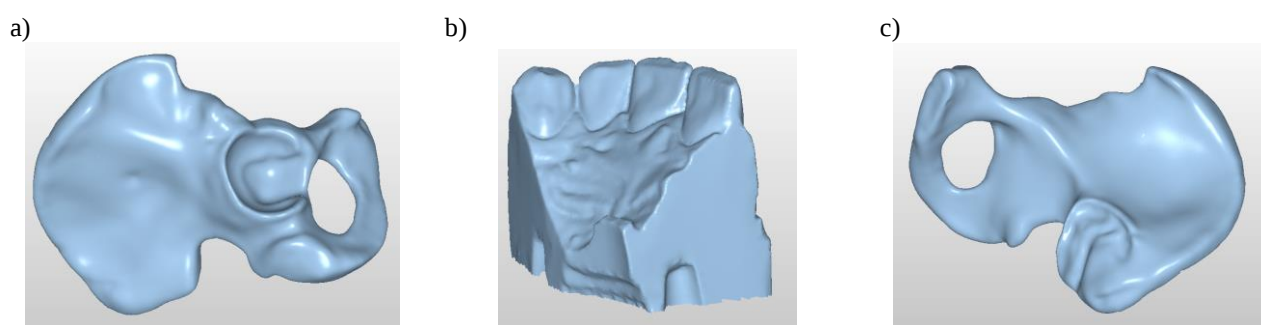
W przypadku projektów innego typu głównym celem prac jest odtworzenie postaci geometrycznej detalu, poprzez digitalizację jego pełnej postaci geometrycznej, lub odtworzenie jedynie jego fragmentu w celu uzyskania zarysu wybranego profilu rozpatrywanego elementu, niezbędnego do prowadzenia dalszych prac modelowych. Uzyskane w ten sposób modele CAD mogą stanowić jedynie siatki trójkątów (*.stl) dedykowane do zastosowań na wszelkiego typu drukarkach 3D, dających możliwość szybkiego wytworzenia części i zweryfikowania poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych. W innym przypadku dążymy do utworzenia modeli powierzchniowych stanowiących finalną postać elementu, lub będące podstawą dalszego procesu projektowania (modelowanie hybrydowe) finalnej postaci konstrukcyjnej pojedynczego

elementu lub większego zespołu reprezentującego konstruowany mechanizm (rys. 3) [1],[2],[3],[4].



Rys. 3. Przykłady projektów, których celem jest odtworzenie postaci geometrycznej detalu
Fig. 3. Examples of projects aimed at reconstructing the form of a geometric detail

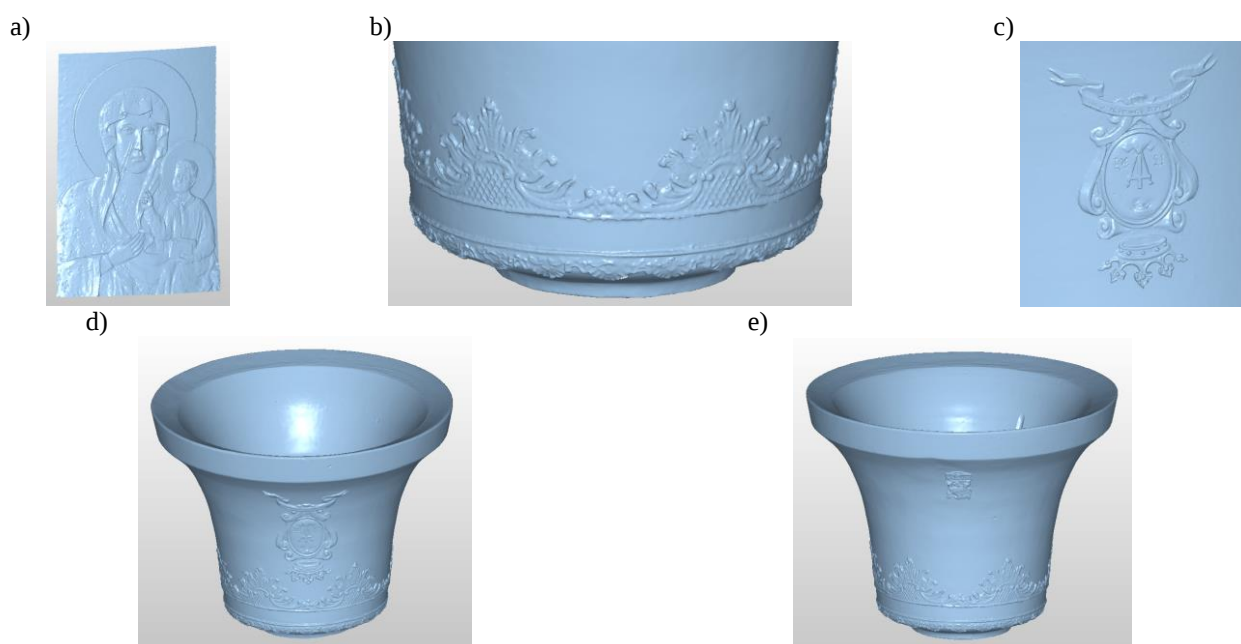
Poza zastosowaniami przemysłowymi inżynieria rekonstrukcyjna pełni istotną funkcję w zastosowaniach medycznych, zaczynając od możliwości tworzenia protez dedykowanych pod konkretnego pacjenta, po możliwość wydruku organów, dla których zespół chirurgów opracowuje pełny plan operacji (rys. 4).



Rys. 4. Przykłady zastosowań inżynierii odwrotnej w projektach medycznych
Fig. 4. Examples of reverse engineering applied in medical projects

W przypadku obiektów artystycznych przedmiotem badań najczęściej są wszelkiego typu dzieła sztuki oraz obiekty zabytkowe. Często główną motywacją prowadzenia tego typu prac jest chęć zachowania ogólnie pojętego dziedzictwa kulturowego, jak i możliwość

odtworzenia sposobów wytwarzania obiektów w ubiegłych epokach, gdy możliwości techniczne jak i dostępne narzędzia znacząco odbiegały od metod i narzędzi dostępnych dziś. Prace tego typu mogą sprowadzać się do odtworzenia „know-how”, rozumianego jako termin określający konkretną wiedzę techniczną z wybranej dziedziny wiedzy, obejmującą umiejętności konieczne do wyprodukowania wybranego detalu. Aktualnie obowiązująca definicja „know-how” przyjęta przez Międzynarodową Izbę Handlową w Paryżu określa całokształt wiadomości, czyli fachowej wiedzy oraz doświadczeń w zakresie technologii i procesu produkcyjnego dla określonego wyrobu (rys. 5) [1],[2],[3],[4]. W dużej części realizowanych projektów właśnie to jest głównym celem prowadzonych prac.



Rys. 5. Przykłady zastosowań inżynierii odwrotnej w projektach dotyczących detali artystycznych
Fig. 5. Examples of reverse engineering projects applied on artistic details

W niniejszym artykule przedstawiono projekt, który ma na celu odtworzenie wiedzy, jaką posiadali średniowieczni ludwisarze. Zrealizowane prace pozwalają odtworzyć sposób kształtowania profilu ówczesnych dzwonów, których geometria w zakresie kształtowania profilu dzwonu znacząco się różniła (np. w przypadku *Dzwonu Zygmunta* grubość ścian zmieniała się w zakresie od 7 do 29 cm). Oczywiście na dźwięk dzwonu poza geometrią, opisaną w niniejszym artykule, wpływał również materiał z którego został on odlany, jak i sama technologia wykonania odlewu, co nie jest omawiane w artykule.

2. WYBRANE ŚREDNIOWIECZNE DZWONY POLSKIE

Okres historyczny w dziejach Europy, znajdujący się pomiędzy starożytnością a renesansem, nosi nazwę średniowiecza i trwał on ponad dziesięć wieków, przy czym za

jego początek przyjmuje się upadek Cesarstwa Zachodniorzymskiego. Ta sama epoka w dziejach Polski trwała o połowę krócej i można przyjąć, że rozpoczęła się wraz z przyjęciem chrztu przez Mieszka I w X wieku i trwała do XV wieku. Okres ten w dziejach Polski zaznaczył się wieloma burzliwymi wydarzeniami, wśród których można przytoczyć m.in.: koronację Bolesława Chrobrego, rozbięcie dzielnicowe, sprowadzenie Krzyżaków, wygraną bitwę pod Grunwaldem. Pomimo tak burzliwego okresu w historii naszego kraju na jego ziemiach można znaleźć wielu „świadków” ówczesnych czasów, wśród których niewątpliwie swoje miejsce zajmują dzwony.

Najstarszym (1314 r.) zachowanym w Polsce średniowiecznym dzwonem kołysanym jest *Dzwon Piotr* znajdujący się w kościele oo. Dominikanów w Sandomierzu. Dzwon ten został odlany przez anonimowego ludwisarza i charakteryzuje się on masą całkowitą ok. 400 kg, a jego gabaryty to: wysokość z koroną 72 cm, średnica klosza 59 cm [5]. Dzwon ten jest ozdobiony łacińską inskrypcją:

AD HONOREM SANCTI PETRI APOSTOLI FUSA SUM + ANNO DOMINI M CCC XIII,

która w tłumaczeniu na język polski brzmi:

Ku czci świętego Apostoła Piotra zostałem odlany + Roku Pańskiego 1314

W tym samym miejscu odnaleźć można drugi z najstarszych (1389 r.) zachowanych w Polsce średniowiecznych dzwonów *Dzwon Jan*. Podobnie jak *Dzwon Piotr* został on odlany przez anonimowego ludwisarza i jest znacząco większy od swojego poprzednika, gdyż jego masa jest prawie trzykrotnie większa ok. 1150 kg, a wymiary gabarytowe wynoszą odpowiednio: wysokość z koroną 112 cm i średnica klosza 99 cm [5]. *Dzwon Jan* także ozdobiony jest łacińską inskrypcją znajdującą się bezpośrednio pod koroną dzwonu:

*IN NOMINE DE PATRIS ET FILII ET SPIRITUS SANCTI. AMEN. FRATER IOHANES PRIOR
SANDOMIENSIS ANNO DOMINI M CCC L XXX IX,*

która w tłumaczeniu na język polski brzmi:

W imię Ojca i Syna i Ducha Świętego. Brat Jan, przeor sandomierski. Roku Pańskiego 1389

Ponadto w połowie wysokości dzwonu znajduje się druga inskrypcja w języku łacińskim:

*O REX GLORIAE VENI CUM PACE. AGNUS DEI QUI TOLLIS PECCATA MUNDI
MISERERE NOBIS,*

która w tłumaczeniu na język polski brzmi:

*O Królu chwały przyjdź z pokojem. Baranku Boży który gładzisz grzechy świata
zmiłuj się nad nami.*

a)



b)



Rys. 6. Widok najstarszych średniowiecznych dzwonów: a) Dzwon „Jan”, b) Dzwon „Piotr” [6]

Fig. 6. View of the oldest, medieval bells: a) Bell „Jan”, b) Bell „Piotr” [6]

Kolekcję zachowanych w Polsce średniowiecznych dzwonów uzupełnia Dzwon *Tuba Dei* (1500 r.), znajdujący się w katedrze św. Janów w Toruniu. Dzwon ten został odlany w Toruniu przez ludwisarza Marcina Schmidta. Masa największego w ówczesnych czasach dzwonu wynosiła ok. 7238 kg, a jego wymiary gabarytowe: wysokość z koroną 200 cm i średnica klosza 227 cm [7],[8]. Dzwon *Tuba Dei* posiada łacińską inskrypcję znajdującą się bezpośrednio pod koroną:

ANNO DOMINI MVC XXII DIE SEPTEMBRIS EGO TUBA DEI IN LAUDEM DEI ET SANCTORUM
JOHANNIS BAPTISTAE ET EVANGELISTAE PATRONORUM HUIUS TEMPLI FUSA SUM,

która w tłumaczeniu na język polski brzmi:

*Roku Pańskiego 1500 22 dnia września ja, Trąba Boża, ku chwale Boga i Świętych Janów
Chrzcziciela i Ewangelisty, patronów tej świątyni, zostałam odlana*

Obecnie jest to trzeci, co do wielkości, dzwon w Polsce po *Dzwonie Maryja Bogurodzica* (masa 14777 kg; wymiary gabarytowe: wysokość 440 cm i średnica 312 cm) i *Dzwonie Zygmunt*.

Najsłynniejszym Polskim dzwonem wywodzącym się z tamtych czasów jest *Dzwon Zygmunta* znajdujący się w Katedrze Wawelskiej w Krakowie. Dzwon ten został wykonany przez ludwisarza Hansa Beham w 1520 roku, jego masa wynosi 12600 kg, a wymiary gabarytowe: wysokość z koroną 241 cm i średnica klosza 242 cm. [9]

Dzwon Zygmunta posiada łaciński napis, który w tłumaczeniu na język polski głosi:

*Bogu Najlepszemu, Największemu i Dziewicy Bogurodzicy, świętym patronom swoim,
znakomity Zygmunt, król Polski, ten dzwon godny wielkości umysłu i czynów swoich
kazał sporządzić Roku Zbawienia 1520*

Przytoczone powyżej dzwony można uzupełnić o kolejne np. cały zespół historycznych dzwonów zawieszonych na Wieży Zygmuntońskiej katedry wawelskiej, tj.: *Półzygmunt* (1463 r.), *Kardynał* (1455 r.), *Głownik* (1460 r.), czy dzwon *Thornan* zrabowany z miasta Torunia przez króla Karola XII w 1703 roku podczas wojny północnej.

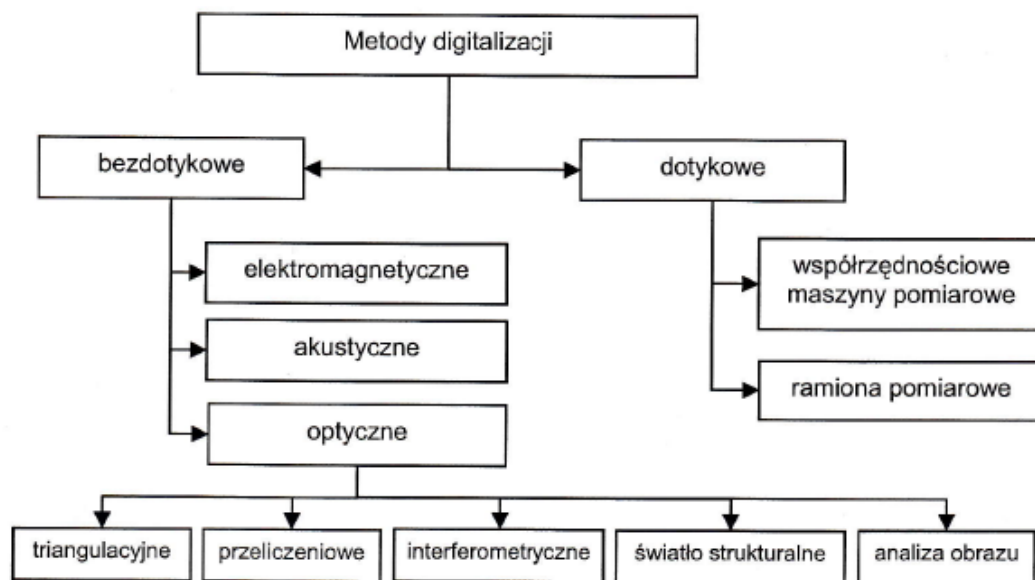
3. RAMIĘ POMIAROWE NIKON METROLOGY MCAx20

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki digitalizacji dwóch najstarszych zachowanych w Polsce średniowiecznych dzwonów kołysanych. W związku ze specyfiką samych dzwonów (kształt, gabaryty), jak i warunkami, w których miał odbyć się proces digitalizacji (zabytkowa dzwonnica kościelna), koniecznym stało się dobranie odpowiednich narzędzi umożliwiających uzyskanie zamierzonego efektu, którym było:

- oddanie postaci geometrycznej (w miarę możliwości) całych dzwonów,
- uzyskanie zarysu profilu obu dzwonów.

Urządzenia pomiarowe używane w praktyce przemysłowej (metrologii przemysłowej) do digitalizacji powierzchni swobodnych pracują w oparciu o zasady obowiązujące w ramach współrzędnościowej techniki pomiarowej. Sprzęt ten bazuje na metodach stykowych jak i bezstykowych, odgrywa dominującą rolę we wszystkich projektach realizowanych w ramach inżynierii rekonstrukcyjnej. Wybór konkretnego narzędzia zależy od wielu czynników np.: oczekiwanej dokładności, gabarytu detalu itp.. Realizując dowolny projekt z zakresu inżynierii rekonstrukcyjnej można wyróżnić kilka kolejnych etapów przetwarzania informacji tj.: digitalizacja, przetwarzanie wstępne, dopasowanie

powierzchni i ostatecznie budowa modelu [1],[2],[3],[4]. Poprawność przeprowadzenia etapu digitalizacji w dużej mierze będzie warunkować możliwe do osiągnięcia dokładności odwzorowania wybranych powierzchni lub całego rozpatrywanego modelu. Podstawowe metody digitalizacji można sklasyfikować zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7.



Rys. 7. Klasyfikacja meto digitalizacji [2]
Fig. 7. Classification methods of digitization [2]

Przedstawiona powyżej klasyfikacja nie wyczerpuje wszystkich możliwości, chociażby z powodu opcjonalnego wyposażenia sprzętu wyróżnionego po stronie metod dotykowych. Zarówno współrzędnościowe maszyny pomiarowe jak i ramiona pomiarowe mogą zostać wyposażone opcjonalnie w laserowe głowice skanujące, które należą do metod bezdotykowych.

O wyborze zastosowanej metody digitalizacji, tak jak wcześniej wspomniano będzie decydowało głównie podstawowe kryterium, np. jeżeli najistotniejsza będzie dokładność odwzorowania to będziemy się skłaniać w kierunku metod dotykowych realizowanych przy użyciu współrzędnościowych maszyn pomiarowych, natomiast jeżeli głównym kryterium będzie czas to wówczas będziemy skłaniać się w kierunku metod optycznych np. skanerów 3D światła np. białego, które będą oferować stosunkowo krótki czas digitalizacji. Oczywiście istotny będzie też zakres digitalizacji, tzn. nie zawsze będzie konieczna digitalizacja całej powierzchni analizowanej części. Często wystarczającym będzie pozyskanie charakterystycznego profilu/zarysu detalu, który będzie pozwalał na odtworzenia jego pełnej postaci konstrukcyjnej. Miejsce, w którym będzie realizowany proces digitalizacji, ograniczy znacząco wybór do narzędzi zapewniających mobilność.

W przypadku opisywanego zadania pomiarowego do przeprowadzenia digitalizacji użyto ramienia pomiarowego MCx20 wyposażonego w laserową głowicę skanującą MMDx100 (rys. 8). Zakres digitalizacji prowadzonej przy użyciu ramienia pomiarowego

obejmował docelowo pomiar pełnej geometrii dzwonu mniejszego (*Dzwon Piotr*) i odwzorowanie fragmentu geometrii dzwonu większego (*Dzwon Jan*), umożliwiające pozyskanie informacji o kształcie jego profilu.

Wytypowane ramię pomiarowe MCAx20 stanowi precyzyjny mobilny system pomiarowy przeznaczony zarówno do pomiarów stykowych jak i bezstykowych przy użyciu laserowych głowic skanujących. Podstawowe parametry techniczne ramienia to:

- zakres pomiarowy: 2 m,
- dokładność pomiaru punktu: 0,044 mm,
- dokładność przestrzenna: 0,061 mm.

Laserowa głowica skanująca MMDx100 firmy Nikon Metrology stanowi wyposażenie wybranego ramienia pomiarowego firmy Nikon w zakresie pomiarów bezstykowych. Skanery tego typu sprawdzają się w dokładnych pomiarach detali wykonanych z różnych materiałów, których powierzchnie charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami (topografia, kolor itp.). Podstawowe parametry techniczne laserowej głowicy MMDx100 to:

- szerokość wiązki: 100mm,
- dokładność (2σ): 0,020mm.

Dokładność pomiaru ramienia pomiarowego MCAx20 w połączeniu z laserową głowicą skanującą MMDx100 wynosiła 0,059mm.

a)



b)



c)

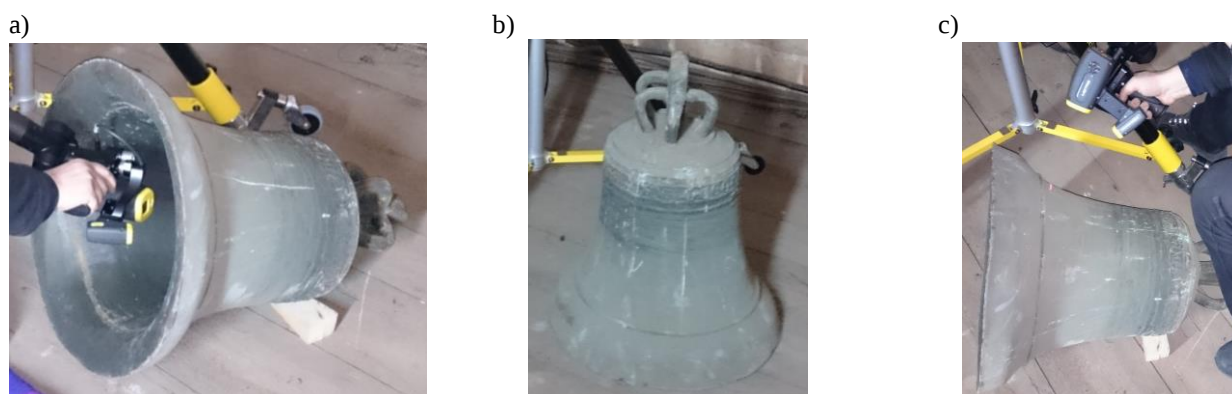


Rys. 8. Ramię pomiarowe MCAx20 użyte do digitalizacji dzwonów
Fig. 8. Measuring arm MCAx20 used in digitization of bells

4. DIGITALIZACJA DZWONÓW PIOTR i JAN

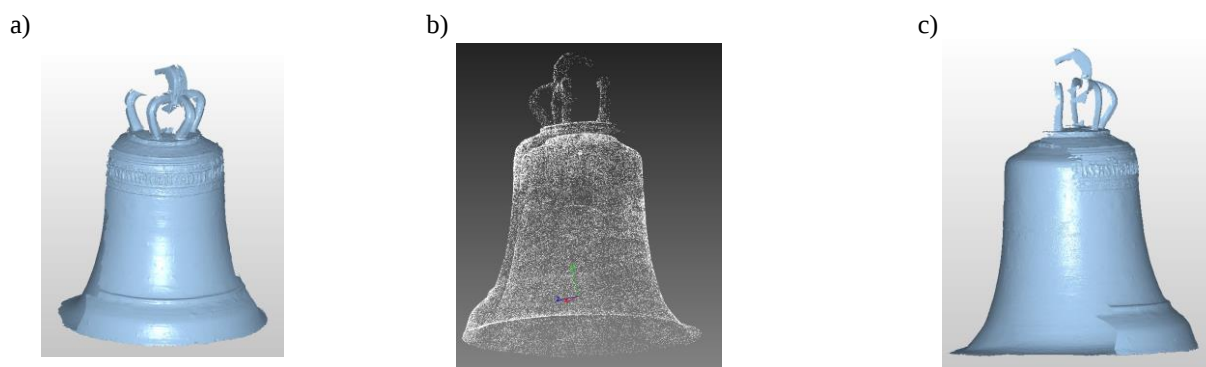
Zakres prac prowadzonych w przypadku obu dzwonów miał zróżnicowany charakter, co wynikało przede wszystkim z gabarytów obu dzwonów i miejsca, w którym przeprowadzono pomiary. Gabaryty i waga *Dzwonu Piotr* pozwalał na bezpieczne

manewrowanie nim w trakcie prowadzenia pomiarów, co przełożyło się na możliwość pozyskania jego pełnej geometrii. Natomiast drugi ze skanowanych dzwonów *Dzwon Jan* po zdjęciu został ułożony na belce stanowiącej podporę podłogi dzwonnicy, co uniemożliwiało jakiekolwiek jego przemieszczanie ze względu na duże prawdopodobieństwo zarwania stropu. Uwarunkowania powyższe spowodowały ograniczony zakres prowadzonych prac. Dodatkowo miejsce jak i warunki, w których prowadzono prace, uniemożliwiały optymalne ustawienie dzwonu, które przełożyło się na konieczność digitalizacji w pięciu położeniach, dających możliwość odwzorowania jego pełnej geometrii (rys. 9).



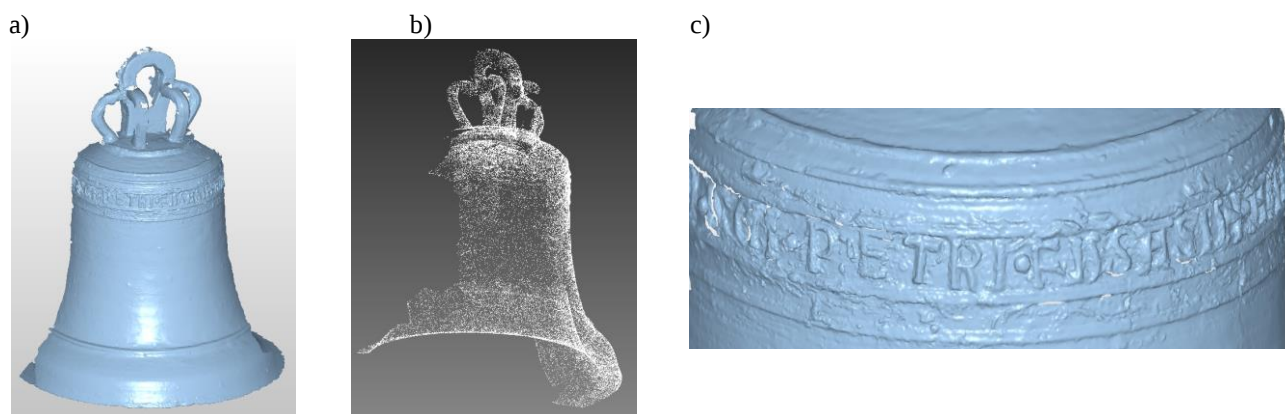
Rys. 9. Digitalizacja Dzwonu Piotr
Fig. 9. Digitization of Bell „Piotr”

Efektem digitalizacji były uzyskane chmury punktów, które po odpowiedniej obróbce (np.: usunięcie punktów refleksyjnych, usunięcie nakładających się na siebie fragmentów kolejnych chmur, filtrowanie) pozwoliły na utworzenie siatek trójkątów odwzorowujących fragmenty powierzchni dzwonu. W pierwszym z położów dokonano digitalizacji fragmentu stanowiącego około $\frac{1}{4}$ powierzchni zewnętrznej dzwonu, jak i pełnej digitalizacji jego powierzchni wewnętrznej, co przedstawiono na rys. 10.



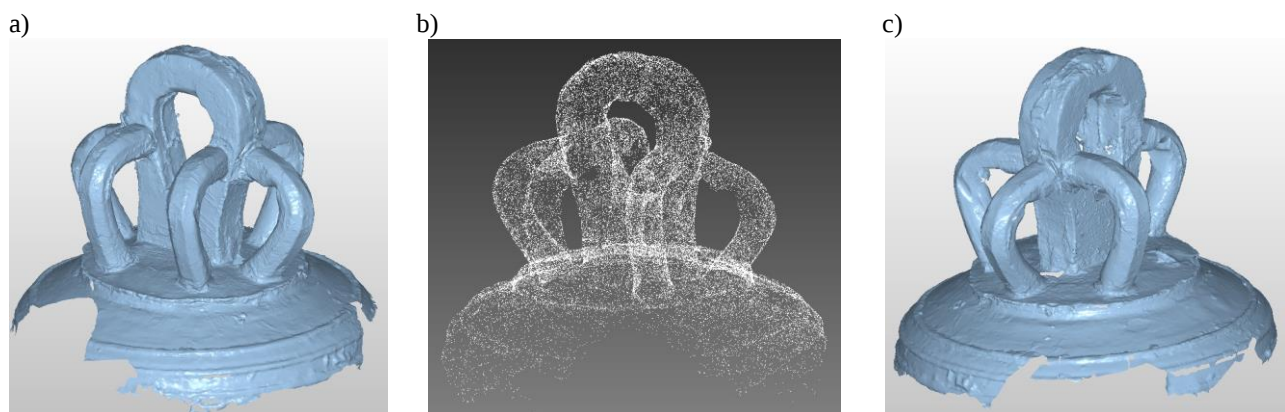
Rys. 10. Wynik digitalizacji Dzwonu Piotr w pierwszym z pięciu położów
Fig. 10. The result of digitization process of Bell “Piotr” in the first, out of five positions

Kolejne trzy położenia obejmowały swym zakresem digitalizację fragmentu stanowiącego około $\frac{1}{4}$ powierzchni zewnętrznej dzwonu, jak i odpowiadający jej fragment jego powierzchni wewnętrznej. Przykład dla czwartego położenia przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Wynik digitalizacji Dzwonu Piotr w czwartym z pięciu położen
Fig. 11. The result of digitization process of Bell "Piotr" in the fourth, out of five positions

Ostatnie położenie obejmowało digitalizację powierzchni samej korony dzwonu, która została w jednym fragmencie uszkodzona w trakcie długiego użytkowania dzwonu (rys. 12).



Rys. 12. Wynik digitalizacji korony Dzwonu Piotr
Fig. 12. Digitization result of the crown of Bell "Piotr"

Obróbki wszystkich chmur punktów dokonano w oprogramowaniu Focus. W tym samym oprogramowaniu dokonano złożenia ww. chmur w jedną finalną chmurę reprezentującą pełną geometrię dzwonu. Focus oferuje kilka różnych metod składania chmur punktów bazujących na:

- wyrównaniu chmur w oparciu o: wskazane 6 lub dowolną liczbę punktów, metody te uzupełnia metoda interaktywna realizowana na dowolnej liczbie punktów,
- najlepszym dopasowaniu (Best Fit), występujące w dwóch odmianach: 2D i 3D,

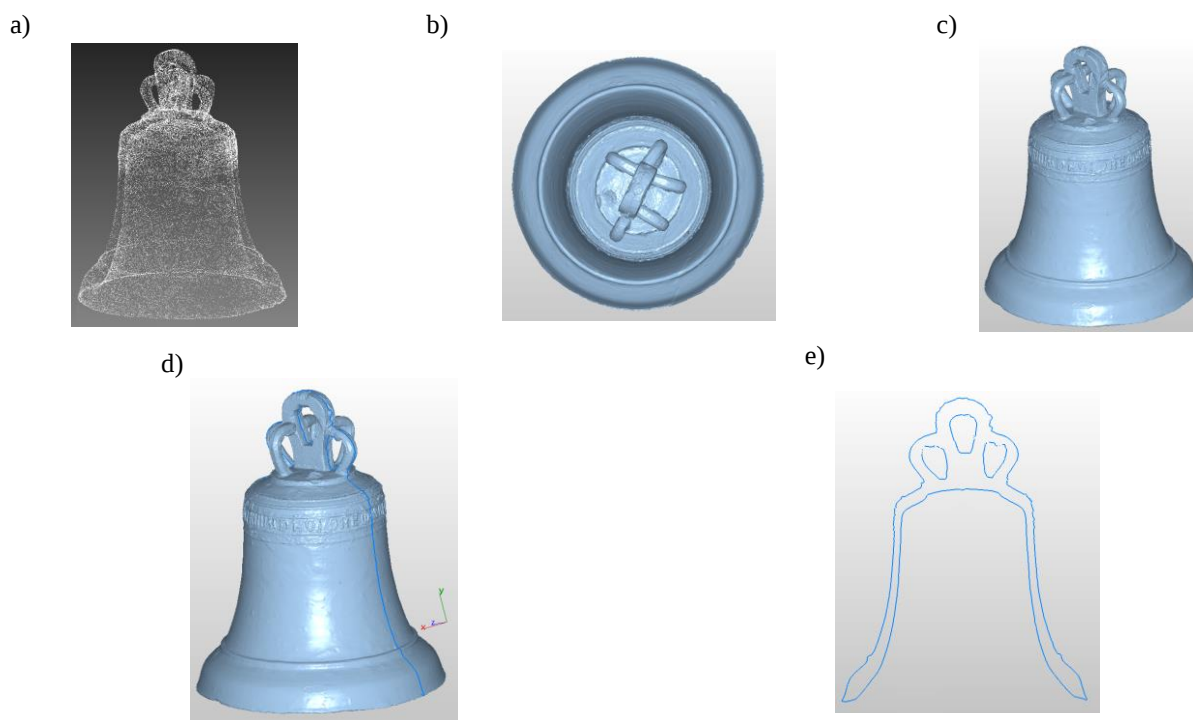
- typowych metodach definicji układów współrzędnych: RPS lub 3-2-1.

W tym przypadku wyrównanie wszystkich (pięciu) chmur cząstkowych wykonano przy użyciu metody bazującej na dowolnej liczbie wskazanych punktów. Takie podejście uwarunkowane było w szczególności poprawnym złożeniem fragmentów inskrypcji znajdującej się bezpośrednio poniżej korony (rys. 13).



Rys. 13. Złożenie wszystkich cząstkowych chmur punktów
Fig. 13. Assembling all the partial point clouds

Efekt końcowy przeprowadzonych prac stanowiła finalna chmura punktów i rozpięta na niej siatka trójkątów przedstawiona na rysunku 14. W oparciu o tak przygotowany model wygenerowano w kilku wskazanych płaszczyznach przekroje pozwalające na odtworzenie profilu dzwonu, które w połączeniu z wiedzą dotyczącą materiału, z którego został on odlany, oraz dobraniem zbliżonej technologii dadzą szansę na wykonaniu kopii tego zabytkowego dzwonu.



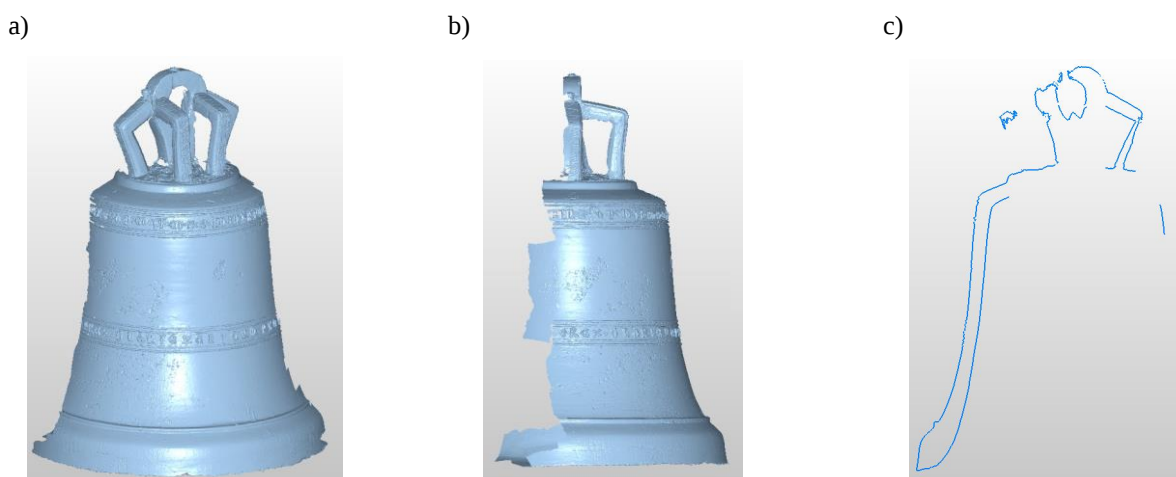
Rys. 14. Efekt końcowy prac wykonanych dla Dzwonu Piotr
Fig. 14. The final result of work performed on Bell „Piotr”

Prace wykonane w przypadku *Dzwonu Jan* miały ograniczony charakter ze względu na jego gabaryty, brak możliwości przemieszczenia w trakcie pomiaru, jak i ograniczony czas dostępu (na wszystkie prace było niespełna 10 godzin w trakcie, których w pełni poskanowano opisany powyżej dzwon *Dzwon Piotr* i w ograniczonym zakresie *Dzwon Jan*, a ponadto dodatkowo wykonano pełną digitalizację znacznie młodszego /1758 r./ dzwonu odlanego w ludwisarni Johanna Gottlieba Anthony w Gdańsku: *Dzwon z podobizną Najświętszej Maryi Panny*). Digitalizacji fragmentu powierzchni dzwonu dokonano w trzech etapach: w pierwszym koncentrując się na powierzchni zewnętrznej (rys. 15b), w drugim na dostępnym fragmencie powierzchni wewnętrznej (rys. 15e), i w trzecim na samej koronie i fragmencie powierzchni zewnętrznej (rys. 15c).



Rys. 15. Etapy digitalizacji *Dzwonu Jan*
Fig. 15. Stages of digitization process of Bell “Jan”

Efekt końcowy stanowiący chmurę punktów, jak i siatkę trójkątów fragmentu dzwonu przedstawiono na rys. 16. Ponadto w oparciu o częściowy model wykonano przekrój obrazujący rozkład grubości ścianki profilu dzwonu.



Rys. 16. Efekt końcowy prac wykonanych dla Dzwonu Jan
Fig. 16. The final result of work performed on Bell „Jan”

5. PODSUMOWANIE

Zakres prac przedstawionych w niniejszym artykule pozwolił pozyskać informacje dotyczące kształtowania profilu dzwonów przez średniowiecznych mistrzów ludwisarskich. Wykonano zamierzony zakres prac: wykonując digitalizację pełną dwóch średniowiecznych dzwonów, oraz dodatkowo poskanowano trzeci znacznie młodszy dzwon z podobizną Najświętszej Maryi Panny (wyników nie przedstawiono w tym artykule).

W oparciu o wykonane prace poza uzyskaniem modeli 3D części lub pełnej geometrii dzwonu pozyskano informacje o kształtowaniu profilu dzwonu, który w pewnym zakresie wpływa na barwę uzyskanego dźwięku. Aktualnie pracownie ludwisarskie prowadzą dalsze prace mające na celu dobranie możliwie zbliżonego do oryginału materiału, z którego odlano *Dzwon Piotr*. Informacje te w połączeniu z dobraniem odpowiedniej technologii pozwolą na wykonanie odlewu dzwonu zbliżonego do oryginału.

Docelowo kopia *Dzwonu Piotra* ma zawisnąć w Sandomierskim Kościele Dominikańskim p.w. św. Jakuba i ma być używany w dni powszednie. Natomiast oryginalny dzwon, który po kilkudziesięcioletniej przerwie został użyty w Noc Zmartwychwstania Pańskiego z 19 na 20 kwietnia 2014 r, będzie używany jedynie przy okazji większych uroczystości.

LITERATURA

- [1] KOSMOL J., 2010, *Laboratorium z inżynierii odwrotnej (reverse engineering)*, Praca zbiorowa pod redakcją J. Kosmola, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [2] KARBOWSKI K., 2008, *Podstawy rekonstrukcji elementów maszyn i innych obiektów w procesach wytwarzania*, Politechnika Krakowska, Monografia 367, Kraków 2008.
- [3] DYBAŁA B., 2013, *Integracja i spójność modeli w inżynierii odwrotnej. Wybrane aspekty technicznych i medycznych zastosowań Reverse Engineering*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

- [4] VARADY T., MARTIN R.R., COX J., 1997, *Reverse Engineering Of Geometric Models*, Computer-Aided Design, 29/4, 1997.
- [5] MAKAREWICZ S., 1979, *Podominikański kościół i klasztor św. Jakuba Apostoła w Sandomierzu*, Sandomierz, 100-101.
- [6] https://pl.wikipedia.org/wiki/Dzwon_„Jan”; https://pl.wikipedia.org/wiki/Dzwon_„Piotr”.
- [7] JAWORSKI T., NASIENIEWSKI M., PRZEGIĘTKI K., 2001, *Tajemnice starych dzwonów Torunia i Chełmn. W 500-tną rocznicę ulania wielkiego Tuba Dei spisane*, Wydawnictwo TNOiK, Praca zbiorowa, Toruń.
- [8] KOWALSKI K.M., 2006, *Inskrypcje na dzwonach gotyckich w Prusach. Studium z epigrafiki kampanologicznej*, Gdańsk, Wydaw. Uniwersytetu Gdańskiego.
- [9] http://www.katedra-wawelska.pl/krolewski_dzwon_zygmunt,54.html

THE APPLICATION OF REVERSE ENGINEERING IN RECONSTRUCTIVE BELLFOUNDING

The present article deals with the application of reconstructive engineering in investigating diverse objects ranging from technical to artistic ones. Investigation techniques differ mainly because of the nature of the detail being studied. Author's ideas are backed up with the results of his work aimed at reconstructing geometric form of the oldest (dated 1314 and 1389), medieval, church bells in Poland, located in a church in Sandomierz run by the Dominican Order. The digitization stage of the work was conducted by the use of measuring arm MCAx20 equipped with laser scanning head MMDx100 made by Nikon Metrology, working with Focus software, which enabled recording and processing of the obtained point clouds and completing a 3D model in the form of a triangle net.

Keywords: *reverse engineering; digitization; bell; profile bell*