

prof. dr hab. inż. MARIAN DOLIPSKI

dr inż. PIOTR CHELUSZKA

dr inż. TADEUSZ GIZA

dr inż. PIOTR SOBOTA

Instytut Mechanizacji Górnictwa

Wydział Górnictwa i Geologii

Politechnika Śląska

## Identyfikacja cech geometrycznych gniazd bębnowych łańcuchowych przenośników zgrzeblowych

*Określenie wielkości oraz charakteru zużycia i identyfikacja obszarów bębnowych łańcuchowych szczególnie narażonych na uszkodzenie, jest możliwe w oparciu o pomiary ich cech geometrycznych. Skomplikowana geometria gniazd sprawia, że nie jest to zadanie proste do realizacji, a stosowanie tradycyjnych metod i przyrządów pomiarowych jest mocno ograniczone. W artykule przedstawiono zagadnienie pomiaru cech geometrycznych bębnowych łańcuchowych metodą stykową i metodą bezstykową. Metoda stykowa odbywała się za pomocą maszyny współrzędnościowej, a metoda bezstykowa za pomocą skanera optycznego. Przedstawione procedury pomiarowe umożliwiły identyfikację węzłów, najbardziej narażonych na zużycie w wyniku współdziałania z łańcuchem zgrzeblowym.*

### 1. WPROWADZENIE

---

Pomiary cech geometrycznych elementów maszyn są nieodłącznym składnikiem procesu wytwarzania, diagnostyki oraz oceny ich stanu technicznego. Realizowane są one z jednej strony dla potrzeb kontroli jakości, z drugiej zaś – w celu klasyfikacji elementów maszyn poddawanych przeglądom okresowym i remontom pod kątem możliwości dalszej ich eksploatacji bądź regeneracji. Problem ten dotyczy również bębnowych łańcuchowych górniczych przenośników zgrzeblowych, stanowiących podstawowy element przeniesienia napędu z silnika na łańcuch zgrzeblowy.

Bębny łańcuchowe przenośników zgrzeblowych są elementami o skomplikowanej geometrii wynikającej z istoty współdziałania (zazębienia) gniazd bębna z ogniwami łańcucha zgrzeblowego. Wykonywane są one obecnie w postaci odlewów lub odkuwek, w formie jednolitych wieńców lub elementów dzielonych. Duże siły uciągu przenoszone przez zazębienie, złożony charakter współdziałania bębna łańcuchowego

z łańcuchem zgrzeblowym oraz szereg niekorzystnych czynników towarzyszących eksploatacji przenośników zgrzeblowych w warunkach podziemnych zakładów wydobywczych, takich jak na przykład: oddziaływanie ściernie transportowanego nosiwa, agresywne właściwości środowiska, stan techniczny łańcucha zgrzeblowego, są przyczyną intensywnego zużycia gniazd bębnowych łańcuchowych. Jest ono z jednej strony skutkiem wysokich nacisków występujących w parach kinematycznych, jakie tworzą ogniwa łańcucha oraz powierzchnie robocze gniazd bębna łańcuchowego, z drugiej zaś – występowaniem zjawiska poślizgu ogniwi względem gniazd oraz dużych obciążeń dynamicznych.

Pomiar geometrii gniazd bębnowych łańcuchowych przenośników zgrzeblowych, użytkowanych w warunkach podziemnych kopalń węgla kamiennego, stanowi podstawę dla identyfikacji wielkości i stanu ich zużycia z możliwością wskazania obszarów najbardziej narażonych na zużycie. W artykule przedstawiono problematykę technicznej realizacji pomiarów geometrii bębnowych łańcuchowych przenośników

zgrzeblowych. Omówiono przy tym procedury realizacji tego rodzaju pomiarów dwoma metodami – stykową oraz bezstykową. Wykorzystane one zostały w pomiarach bębnowych łańcuchowych dla potrzeb identyfikacji węzłów, najbardziej narażonych na zużycie w wyniku współdziałania z łańcuchem zgrzeblowym.

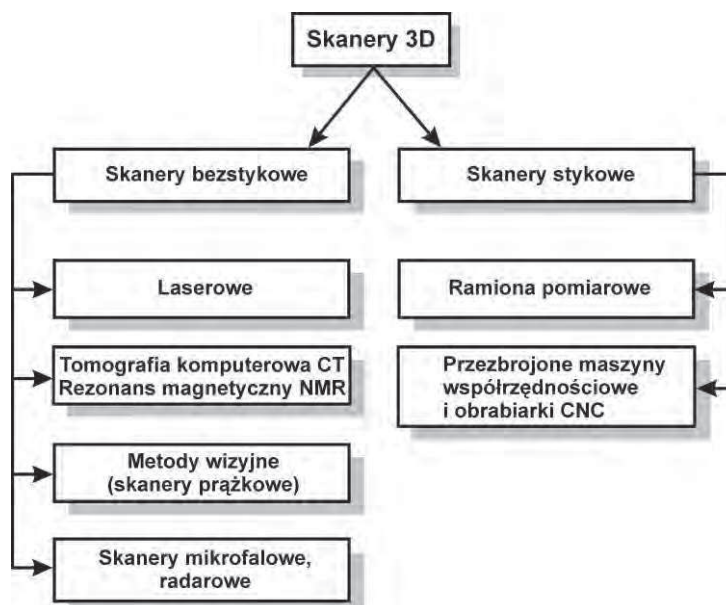
## 2. PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH

Złożone postacie konstrukcyjne elementów maszyn, urządzeń i ustrojów nośnych ograniczają możliwość stosowania tradycyjnych metod i przyrządów pomiarowych. Ograniczenia te wynikają między innymi z trudności lub wręcz niemożności dokładnego (jednoznacznego) określenia położenia przestrzennego punktów pomiarowych oraz wzajemnych relacji pomiędzy otrzymanymi z pomiarów danymi. Dokładne odwzorowanie przestrzenne mierzonych obiektów ma istotne znaczenie na etapie wykonania, eksploatacji oraz projektowania, a także dla celów poznawczych i naukowych. Pomiaru takie można wykonać z zastosowaniem przestrzennych urządzeń skanujących – skanerów 3D. Wyróżnić można dwie podstawowe grupy skanerów 3D, które różnią się metodą pomiaru (rys. 1).

Skanery bezstykowe są takimi urządzeniami, które w czasie pomiaru geometrii obiektu nie kontaktują się bezpośrednio z powierzchnią skanowanego obiektu. Zalicza się do nich skanery optyczne oraz urządzenia wyspecjalizowane [7].

Skanery stykowe charakteryzują się tym, że pomiaru skanowanego obiektu dokonuje się za pomocą głowicy, która przemieszcza się po jego powierzchni, będąc z nią w bezpośrednim kontakcie. Podstawowymi urządzeniami tego typu są ramiona pomiarowe i maszyny współrzędnościowe z głowicami skanującymi (skaningowymi).

Głównymi przedstawicielami skanerów bezstykowych są skanery optyczne. Zalicza się do nich skanery laserowe oraz prążkowe. W tej technice pomiarowej wykorzystuje się efekt zniekształcenia promienia światła oświetlającego powierzchnię skanowaną (pomiarową). Skanery laserowe wykorzystują pojedynczy prążek lasera, co w konsekwencji powoduje, że w trakcie jednej sekwencji pomiaru otrzymujemy dane jednego punktu pomiarowego (jeden piksel kamery). W skanerach prążkowych (światła strukturalnego) przedmiot badany oświetlany jest z rzutnika zestawem linii światła najczęściej białego o znanej strukturze. Linie proste ulegają zniekształceniu proporcjonalnie do wielkości deformacji powierzchni mierzonego obiektu. Do zebrania obrazu obiektu z liniami struktury projektowanego na niego światła używa się sensorów, zazwyczaj kamer CCD. Aktywny skaner optyczny uzyskuje informacje o położeniu i kształcie obiektu na podstawie triangulacji [1]. Przechwytywany przez kamerę obraz analizowany jest w komputerze. Rekonstrukcja obiektu polega na odtworzeniu głębokości oraz powierzchni. Wynikiem jest zbiór punktów (chmura punktów) w globalnym układzie współrzędnych. Rekonstrukcja powierzchni polega na dopasowaniu powierzchni do odtworzonej chmury punktów, w efekcie czego uzyskuje się trójwymiarowy model powierzchni obiektu. W miejscach,



Rys. 1. Podział przestrzennych urządzeń skanujących

których nie widzi kamera lub do których nie dociera światło projektora, model będzie posiadał luki, dlatego też, aby otrzymać pełny model, należy wykonać dodatkowe uruchomienia skanera w innych położeniach. Łączenie poszczególnych skanów odbywa się w komputerze z wykorzystaniem odpowiedniego programu.

Dokładność pomiaru zależy od objętości pomiarowej (w tym odległości kamery od obiektu) i jest do niej odwrotnie proporcjonalna. Przeważnie objętość pomiarowa wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów, a dokładność pomiaru od 0,002 mm do 0,5 mm.

Do grupy skanerów bezstykowych wyspecjalizowanych zalicza się skanery ultradźwiękowe czy radarowe a także urządzenia medyczne służące w diagnostyce, takie jak tomografia komputerowa CT i rezonans magnetyczny NMR.

Skanery stykowe konstruowane są najczęściej jako ramiona pomiarowe o 5 stopniach swobody. Można spotkać również konstrukcje o typowym układzie dla współrzędnościowej techniki pomiarowej [2]. Skanery stykowe wykorzystują technikę, w której końcówka głowicy przesuwana jest mechanicznie po badanej powierzchni. Współrzędne punktów pomiarowych rejestrowane są w czasie rzeczywistym w trakcie pomiaru. Głowica pomiarowa przemieszcza się po skanowanej powierzchni z ograniczoną prędkością, co ma istotny wpływ na czas wykonywanych pomiarów. Również rejestracja punktów pomiarowych odbywa się z zadaniem krokiem, co najczęściej wynika z akwizycji danych. W rezultacie uzyskujemy dane w postaci chmury punktów o pewnej gęstości. Zakres pomiarowy tej grupy skanerów mieści się przeważnie od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów i zależy od konstrukcji maszyny (wielkości ramion pomiarowych). Dokładność pomiaru jest w granicach od 0,005 mm do 0,3 mm. Ponieważ w cza-

się pomiaru skanerami stykowymi wymagany jest docisk trzpienia pomiarowego głowicy do powierzchni obiektu metoda ta nie może być wykorzystywana do skanowania elementów miękkich, które w czasie pomiaru mogłyby ulec odkształceniu.

### 3. CHARAKTERYSTYKA PROCEDURY POMIAROWEJ Z ZASTOSOWANIEM MASZYNY WSPÓRZĘDNOŚCIOWEJ

Współrzędnościowa technika pomiarowa opiera się na komputerowym przetwarzaniu informacji pomiarowych poprzez dyskretyzację współrzędnych punktów [6]. Sformułowane w pracy [4] zadanie pomiarowe polegało na pomiarze geometrii powierzchni roboczych gniazd dla wytypowanych bębnow łańcuchowych, co zrealizowane zostało poprzez bezpośredni pomiar współrzędnych przestrzennych w kartezjańskim układzie współrzędnych punktów tworzących te powierzchnie. Zastosowano w tym celu współrzędnościową maszynę pomiarową Zeiss ACCURA 7 (rys. 2a). Maszyna ta posiada ustrój nośny portalowy o przestrzeni roboczej 900×1200×700 mm, pozwalającej na realizację szerokiej gamy zadań pomiarowych z wysoką dokładnością (tab. 1). Wysoka precyzja pomiaru została osiągnięta tu dzięki:

- sztywnej prowadnicy portalu wykonanej z termicznie niewrażliwych materiałów,
- czterostronnemu łożyskowaniu pneumatycznemu wszystkich osi (blokada poprzecznych stopni swobody),
- pełnej funkcjonalności multisensorycznej (okablowanie dla głowic stykowych i optycznych, impulsowych i skaningowych).

a)



b)



Rys. 2. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa Zeiss ACCURA 7 (a) oraz głowica pomiarowa VAST XT (b)

Tabela 1

Podstawowe parametry techniczne maszyny ACCURA 7 [9]

PARAMETRY	
Wymiary przestrzeni roboczej (zakres pomiarowy)	900×1200×700 mm
Wymiary gabarytowe (dł.×szer.×wys.)	2025×1714×2883 mm
Wysokość stołu	710 mm
Dopuszczalna masa mierzonych przedmiotów	1500 kg
Graniczny dopuszczalny błąd pomiaru długości $MPE_E$ wg [8]	
– dla zakresu temperatur 18 do 22°C	(1,6+L/333) $\mu\text{m}$
– dla zakresu temperatur 18 do 26°C	(2,1+L/300) $\mu\text{m}$
Prędkości ruchu:	
– ustawianie	0 – 70 mm/s
– pomiar	max. 520 mm/s
– skanowanie	max. 300 mm/s
Maksymalne przyspieszenie	2,4 $\text{m/s}^2$

Do podstawowych właściwości współrzędnościowej maszyny pomiarowej Zeiss ACCURA 7 zaliczyć należy:

- wykonanie maszyny w technologii ceramicznej z nieruchomym stołem pomiarowym,
- w pełni osłonięte prowadnice osi X, jak również osłonięte po stronie napędowej prowadnice osi Y,
- linały pomiarowe Zeiss z ceramiki szklanej,
- zintegrowany układ pomiaru drgań,
- sterowanie skaningowe (ISC) na bazie PC w oddzielnej szafie,
- okablowanie przygotowane dla systemu MASS,
- korekcję temperatury mierzonego elementu.

Maszyna współrzędnościowa Zeiss wyposażona jest w system MASS zapewniający pełną funkcjonalność multisensoryczną, która umożliwia współpracę z dowolną głowicą pomiarową (na przykład stykową lub optyczną). Maszyna, na której zrealizowano omawiane zadanie pomiarowe, wyposażona była w sztywną aktywną głowicę skaningową VAST XT (rys. 2b). Głowica ta pozwala na realizację pomiarów w trybie skaningu aktywnego lub w trybie impulsowym (pomiaru pojedynczych punktów). W trakcie pomiaru nadzoruje ona (w trybie online) swoje wychylenia, utrzymując stałą i niską wartość nacisku pomiarowego, skierowanego zawsze w kierunku normalnym do mierzonej powierzchni, zapewniając w ten sposób wysoką dokładność pomiaru (tab. 2).

Tabela 2

Parametry techniczne głowicy VAST XT [9]

PARAMETRY	
Maksymalny zakres wychylenia głowicy	+/- 2 mm
Maksymalna masa trzpienia	500 g
przy maksymalnym momencie	0,4 Nm
Dopuszczalna długość przedłużacza	500 mm
Minimalna średnica końcówki pomiarowej	1 mm
Błąd głowicy pomiarowej $MPE_p$ wg [8]	1,7 $\mu\text{m}$

Dla potrzeb pomiaru gniazd bębnowych łańcuchowych użyto czterech układów trzpieni, w które wyposażona była głowica pomiarowa (rys. 3). Pierwszy z nich (rys. 3a) zastosowany został do zdefiniowania położenia i orientacji przestrzennej lokalnego układu współrzędnych XYZ (układu współrzędnych przedmiotu) związanego z bębniem łańcuchowym, dla którego realizowany był pomiar. Pozostałe trzy (rys. 3b – 3d) stosowane były natomiast podczas digitalizacji powierzchni gniazd bębnowych łańcuchowych, w zależności od ich położenia w przestrzeni pomiarowej maszyny współrzędnościowej.

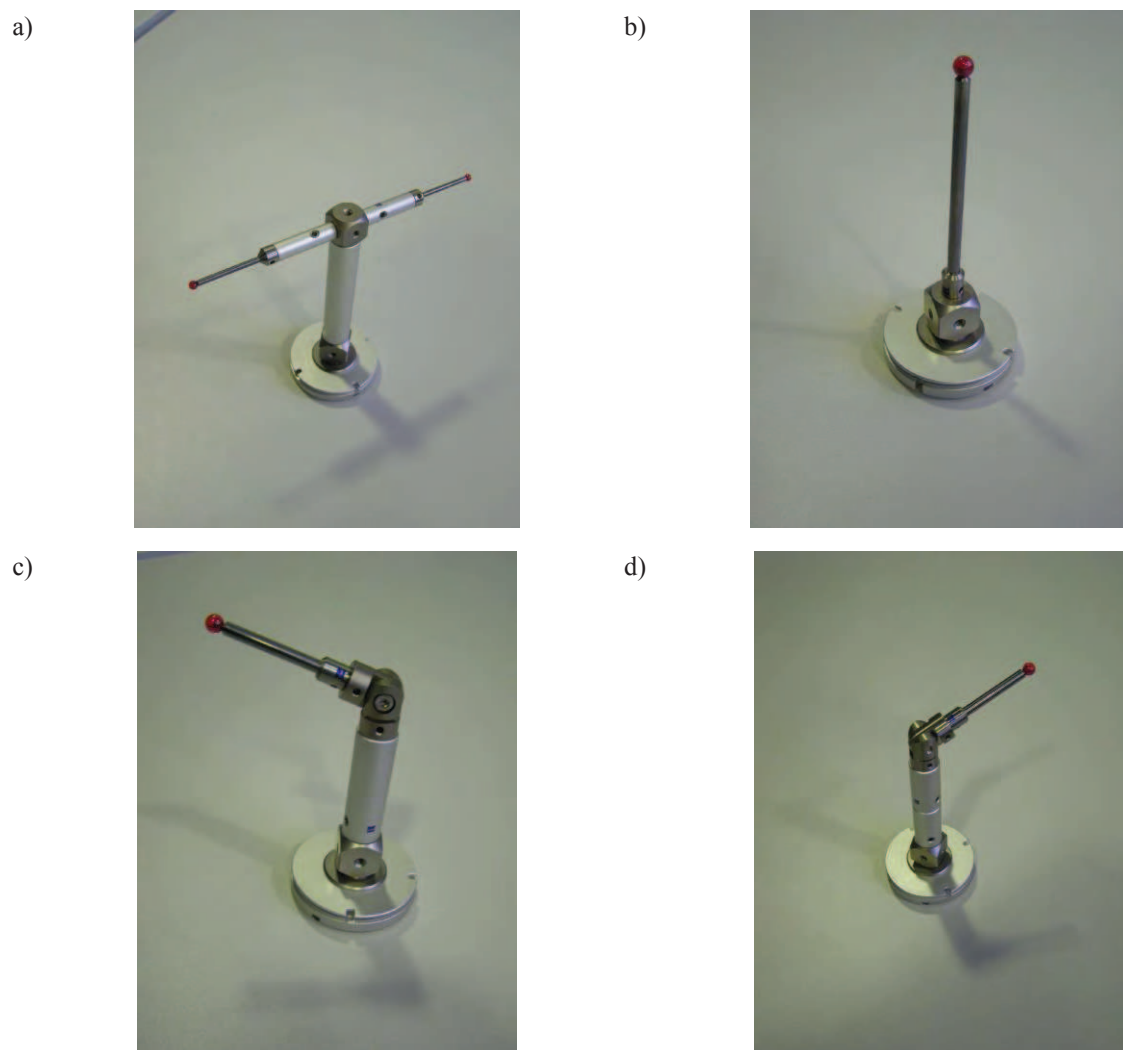
Zastosowana maszyna współrzędnościowa współpracowała z oprogramowaniem Calypso – z przeznaczeniem do definicji lokalnego układu współrzędnych mierzonego bębna łańcuchowego oraz oprogramowaniem Dimension – stosowanym w procesie digitalizacji gniazd bębnowych łańcuchowych.

### 3.1. Zdefiniowanie lokalnego układu współrzędnych bębna łańcuchowego

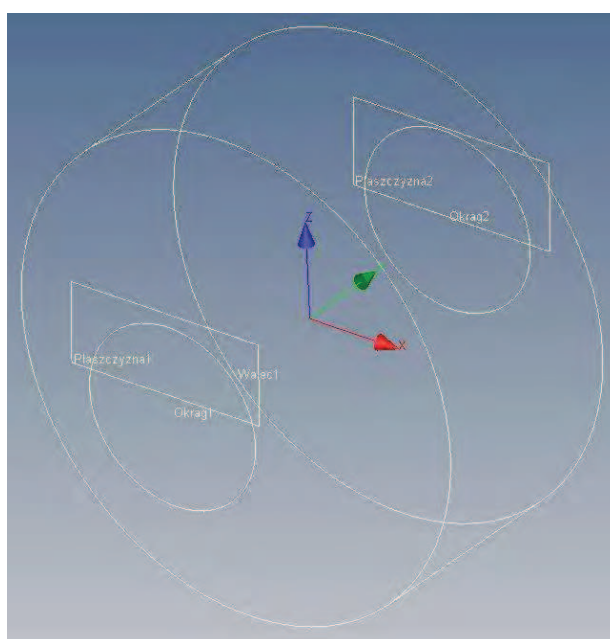
Lokalne układy współrzędnych dla objętych pomiarem bębnowych łańcuchowych zbudowano w oparciu o następujące skojarzone geometryczne powierzchnie [4] – rys. 4:

- dwie równoległe płaszczyzny wyznaczone przez zbiory punktów zlokalizowanych na skrajnych powierzchniach bębna łańcuchowego (na rysunku 4 oznaczone jako: „Płaszczyzna 1” i „Płaszczyzna 2”),
- walec, którego pobocznica odwzorowywała wewnętrzną powierzchnię piasty bębna łańcuchowego („Walec 1”).

Cechy charakterystyczne wyżej wymienionych geometrycznych powierzchni wyznaczone były na podstawie określonej liczby punktów pomiarowych, zależnej od rodzaju powierzchni. Na ich podstawie określone było położenie osi podłużnej bębna łańcuchowego (osi obrotu), wyznaczonej przez oś podłużną walca oraz położenie płaszczyzny symetrii bębna.



Rys. 3. Trzpienie pomiarowe użyte podczas digitalizacji gniazd bębnowych łańcuchowych



Rys. 4. Elementy geometryczne zastosowane do zbudowania lokalnego układu współrzędnych w środowisku Calypso

Płaszczyzna ta, prostopadła do osi podłużnej „Walca 1”, położona była w jednakowych odległościach od „Płaszczyzny 1” i „Płaszczyzny 2”. Lokalny układ odniesienia XYZ wyznaczony był przez trzy wzajemnie prostopadłe osie, to znaczy:

- oś X – prostopadła do osi podłużnej „Walca 1” oraz równoległa do płaszczyzny stołu maszyny pomiarowej,
- oś Y – o kierunku zgodnym z kierunkiem osi podłużnej „Walca 1” (osi obrotu bębna łańcuchowego),
- oś Z – prostopadła do powierzchni stołu maszyny pomiarowej.

Początek układu współrzędnych XYZ zaczepiony jest w punkcie przecięcia płaszczyzny symetrii bębna łańcuchowego z osią podłużną „Walca 1”.

### 3.2. Digitalizacja gniazd bębna łańcuchowego

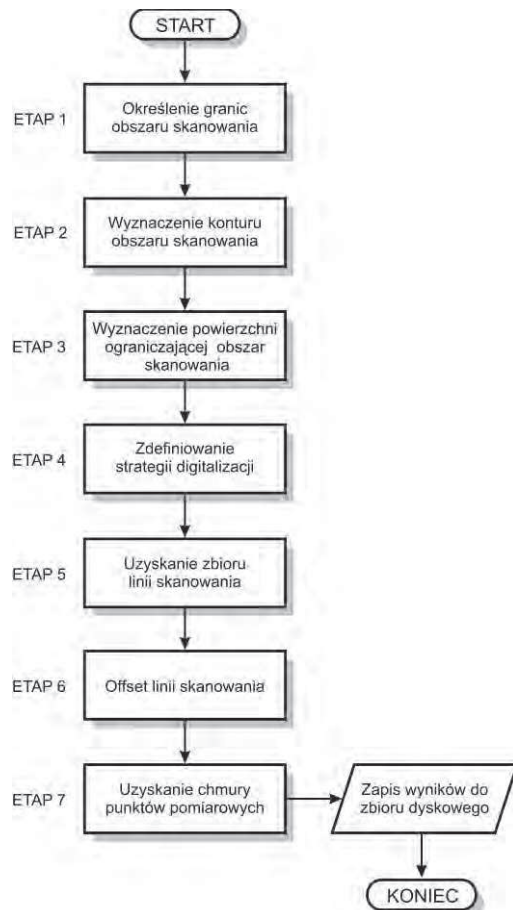
Digitalizację gniazd bębna łańcuchowego przeprowadzono z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACURRA 7 współpracującej z oprogramowaniem Dimension. W trakcie realizacji procedury pomiarowej głowica pomiarowa wyposażona była w jeden z trzech układów trzpieni pomiarowych pokazanych na rysunkach: 3b – 3d. Trzpień te, przed przystąpieniem do pomiarów, zostały wcześniej skalibrowane. Widok przykładowego gniazda podczas digitalizacji jego powierzchni roboczej pokazano na rysunku 5.



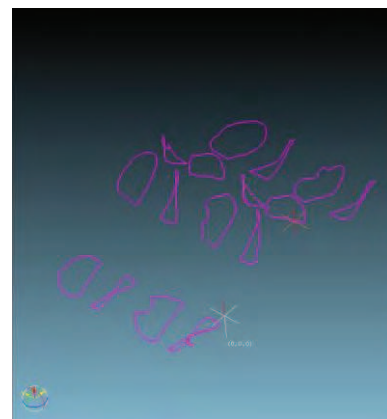
Rys. 5. Widok gniazda bębna łańcuchowego podczas digitalizacji

W procedurze digitalizacji gniazd wyróżnić można siedem podstawowych etapów (rys. 6) [4]. W pierwszym etapie wyznaczane były granice obszaru powierzchni przeznaczonej do digitalizacji. W tym celu zbierano punkty pomiarowe wzdłuż konturu po-

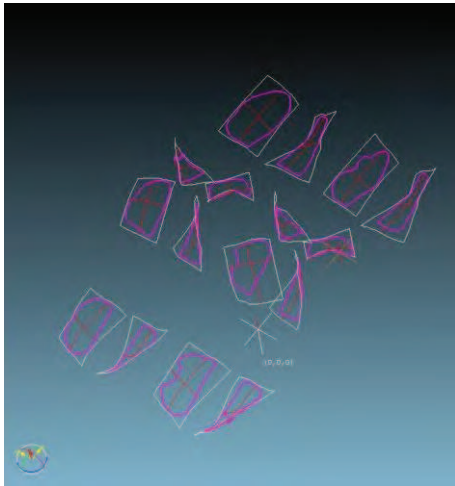
szczególnych gniazd bębna łańcuchowego. W etapie drugim, w oparciu o zbiory punktów pomiarowych, utworzone zostały polilinie wyznaczające kontury obszarów bębna łańcuchowego przeznaczonych do digitalizacji (rys. 7), zaś w etapie trzecim – określana była na ich podstawie postać powierzchni ograniczającej te obszary (rys. 8).



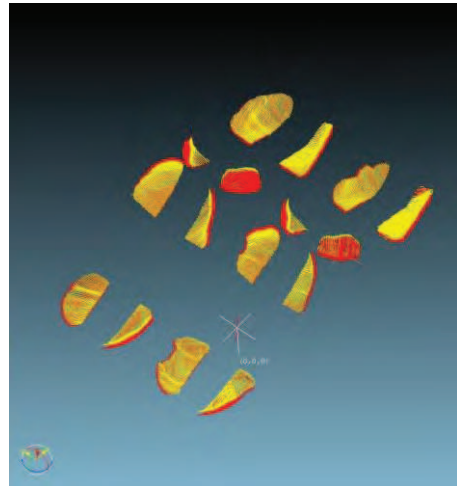
Rys. 6. Algorytm procedury digitalizacji gniazd bębnowych łańcuchowych z zastosowaniem pomiarowej maszyny współrzędnościowej Zeiss ACCURA 7 w środowisku Dimension



Rys. 7. Etap 2 – wyznaczenie konturów gniazd bębna łańcuchowego



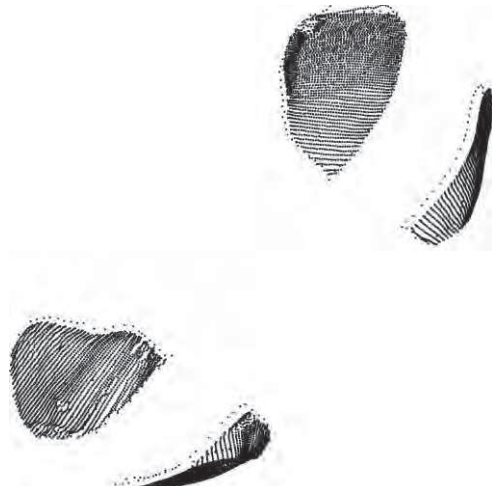
Rys. 8. Etap 3 – wyznaczenie powierzchni ograniczających gniazda bębna łańcuchowego



Rys. 9. Etap 5 i 6 – Wynik digitalizacji czterech przykładowych gniazd bębna łańcuchowego – linie skanowania: po digitalizacji (kolor żółty) oraz po offsecie (kolor czerwony)



Rys. 10. Etap 7 – Chmura punktów pomiarowych dla czterech przykładowych gniazd bębna łańcuchowego



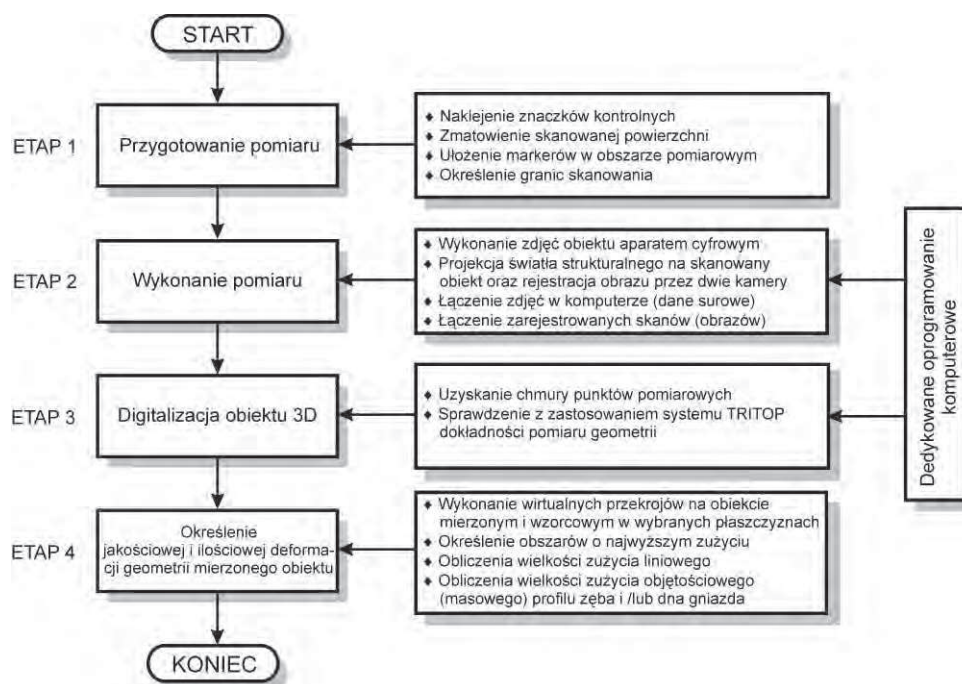
Rys. 11. Chmura punktów jako wynik pomiaru pojedynczego gniazda bębna łańcuchowego z zastosowaniem maszyny współrzędnościowej

W kolejnym etapie określana była strategia digitalizacji gniazd bębnow łańcuchowych. Dla potrzeb digitalizacji gniazd bębnow łańcuchowych punkty pomiarowe zbierane były z krokiem co 1 mm wzdłuż linii równoległych do osi Y lokalnego układu współrzędnych XYZ z prędkością 10 mm/s. Linie skanowania rozmieszczone były przy tym w kierunku osi X w odstępach co 1 mm.

W wyniku uruchomienia programu skanowania, w trakcie którego realizowana była przyjęta strategia pomiaru, uzyskano zbiór linii skanowania (etap 5). Ponieważ punkty pomiarowe odpowiadały rzeczywistemu położeniu w przestrzeni środka końcówki trzpienia pomiarowego, dokonany został offset linii skanowania o wartość jej promienia (etap 6). Po przesunięciu punktów pomiarowych w kierunku

prostopadłym do mierzonej powierzchni gniazda bębna łańcuchowego uzyskano zbiór linii stycznych do digitalizowanej powierzchni (rys. 9).

Ostatnim etapem digitalizacji gniazd bębnow łańcuchowych (etap 7) było przekształcenie linii skanowania do postaci chmury punktów pomiarowych reprezentującej objętą pomiarem powierzchnię (rys. 10). Dla potrzeb dalszych analiz wynik pomiaru w postaci zbioru współrzędnych przestrzennych chmury punktów pomiarowych gniazd bębnow łańcuchowych eksportowany był do plików w formacie „\*.igs”. Możliwe było dzięki temu dalsze przetwarzanie danych pomiarowych z zastosowaniem między innymi programów graficznych typu CAD, a także wizualizacja wyników pomiarów (rys. 11).



Rys. 12. Algorytm procedury digitalizacji gniazd bębnowych łańcuchowych z zastosowaniem skanera ATOS II i systemu TRITOP

#### 4. CHARAKTERYSTYKA PROCEDURY POMIAROWEJ Z ZASTOSOWANIEM METODY ŚWIATŁA STRUKTURALNEGO

W pomiarach stereometrii zębów i gniazd bębnowych przenośników zgrzeblowych metodą bezstykową zastosowano skaner optyczny ATOS II [3]. Przed przystąpieniem do badań bębnowych przenośników usunięto z nich zanieczyszczenia, które mogłyby zniekształcić obraz skanowanych powierzchni. Aby otrzymać kompletny model skanowanych bębnowych przenośników wykonano kilka uruchomień skanera fotografując obiekt z różnych stron [5]. W celu zwiększenia dokładności pomiarów zastosowano system TRITOP. System TRITOP jest mobilnym zestawem optycznym składającym się z aparatu o wysokiej rozdzielczości, zestawu markerów (znaczków kontrolnych) oraz specjalnego oprogramowania. W procedurze pomiarowej z zastosowanym układem pomiarowym wyróżniono 3 obszary działań, które z kolei można podzielić na cztery etapy (rys. 12). Czwarty obszar związany jest z zastosowaniem digitalizacji do określenia jakościowej i ilościowej deformacji geometrii mierzonego obiektu.

Na rysunku 13 pokazano bęben przygotowany do skanowania, na którym wykonano trzy pierwsze etapy przewidziane dla tego obszaru działania. Zasadnicze pomiary poszczególnych bębnowych przenośników dokonywały się w drugim obszarze procedury. Zaczynały się od wykonania zdjęć aparatem cyfrowym, a następnie uruchomienia skanera ATOS II. Skaner z kolei wy-



Rys. 13. Bęben łańcuchowy przygotowywany do pomiarów – z naklejonymi znaczkami kontrolnymi w otoczeniu zestawu markerów

Tabela 3  
Charakterystyka techniczna skanera ATOS II oraz systemu TRITOP [10]

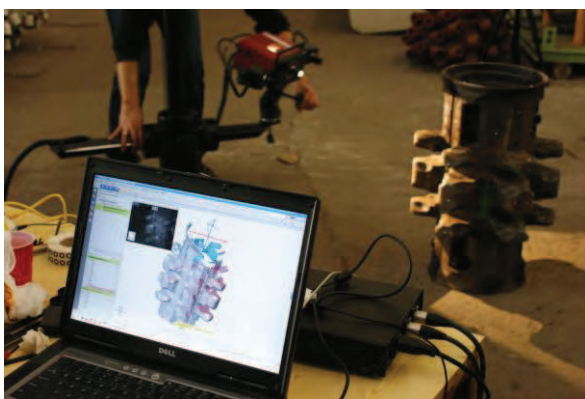
PARAMETRY	
<b>Skaner ATOS II</b>	
Rozdzielczość kamer	2 × 2 mln pikseli
Pole pomiarowe	od 55 × 44 mm do 500 × 400 mm
Fizyczna odległość punktów	0,04 ÷ 0,31 mm
Liczba punktów pomiarowych	2 mln
Dokładność pomiaru	0,04 mm
<b>System TRITOP</b>	
Rozdzielczość matrycy	do 12 mln pikseli
Okno pomiarowe	od 0,1 × 0,1 m do 10 × 10 m
Temperatura pomiaru	-40 ÷ +120°C
Kalibracja	samokalibrujący
Dokładność pomiaru	0,03 mm



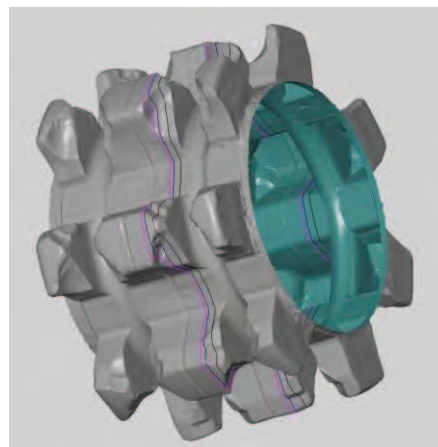


Rys. 14. Projektcja światła strukturalnego na powierzchnię skanowanego bębna

konywał projekcję zestawu prążków na powierzchnie bębna (rys. 14) i obserwował je przez dwie kamery. Poprzez rozwiązanie równań transformacji optycznej system z wysoką dokładnością oblicza współrzędne dla każdego piksela kamery. Wynikiem pojedynczego pomiaru jest chmura punktów, których liczba jest zależna od rozdzielczości kamer. W trakcie pojedynczego pomiaru możliwe jest zarejestrowanie do 1,4 milionów punktów w czasie około 1 sekundy. W wyniku przeprowadzonych operacji w komputerze zapisane zostały dwa niezależne zbiory punktów (dane surowe) z systemu TRITOP oraz skanera ATOS II. W procesie digitalizacji zeskanowane przestrzenne fragmenty bębna przenośnika zgrzeblowego zostały połączone w jeden model w wyniku identyfikacji znaczków kontrolnych z systemu TRITOP. W wyniku otrzymuje się jeden zbiór danych – chmurę punktów pomiarowych o założonej dokładności pomiarów. Operacja łączenia poszczególnych zeskanowanych fragmentów bębna przenośnika w jeden model odbywała się automatycznie w oprogramowaniu ATOS Professional firmy GOM. Obraz skanowanych powierzchni i całego obiektu zapisywany był w pamięci komputera i obserwowany na monitorze (rys. 15).



Rys. 15. Skanowany fragment bębna i jego model przestrzenny na monitorze komputera



Rys. 16. Przestrzenny model skanowanego bębna łańcuchowego

Model przestrzenny skanowanego bębna a szczególnie gniazd opracowany w formacie STL (Stereolithography) pokazano na rysunku 16. Format STL jest zapisem cyfrowym powierzchni skanowanych. Dane z formatu STL mogą być wczytywane do oprogramowania przestrzennego 3D, między innymi: AutoCAD, Microstation.

## 5. PORÓWNANIE ZASTOSOWANYCH METOD POMIAROWYCH

Zastosowane w pomiarach geometrii bębnow łańcuchowych przenośników zgrzeblowych metody, choć prowadzą do tego samego celu, różnią się istotnie sposobem uzyskania wyniku pomiaru. W przypadku maszyny współrzędnościowej położenie końcówki trzpienia głowicy pomiarowej determinuje wprost wartości współrzędnych punktu pomiarowego w układzie współrzędnych maszyny pomiarowej. Współrzędne te są przy tym pochodną wartości sygnałów z układów pomiarowych (liniałów), w które wyposażona jest maszyna pomiarowa, mierząca położenie końcówki trzpienia głowicy pomiarowej w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Z kolei, w przypadku metody optycznej współrzędne przestrzenne punktu pomiarowego są wynikiem analizy numerycznej serii zdjęć cyfrowych mierzonego obiektu, zarejestrowanych przez kamery urządzenia pomiarowego.

W tabeli 4 porównano wybrane cechy metrologiczne zastosowanych w pomiarach bębnow łańcuchowych przenośników zgrzeblowych metod i urządzeń pomiarowych. Dla obu metod pomiarowych, biorąc pod uwagę rozpatrywane kryteria oceny, wskazane zostało rozwiązanie o lepszych właściwościach metrologicznych (oznaczone znakiem „+”) oraz rozwią-

Tabela 4

**Porównanie wybranych właściwości metrologicznych systemów pomiarowych wykorzystanych w pomiarach geometrii bębnow łańcuchowych przenośników zgrzeblowych**

Kryterium porównania	Metoda pomiaru	
	stykowa	bezstykowa
	Maszyna współrzędnościowa	Skaner 3D
Dokładność pomiaru	+	
Czasochłonność przygotowania obiektu do badań		-
Czaso- i pracochłonność akwizycji danych	-	
Powtarzalność pomiaru	+	
Wpływ warunków realizacji pomiaru		-
Wpływ własności powierzchni mierzonego obiektu		-
Ilość przetwarzanych informacji		+
Mobilność		+

zanie uznane za mniej korzystne (oznaczone znakiem „-”) w odniesieniu do drugiej z porównywanych metod pomiarowych (pola puste). Zasadniczym kryterium porównawczym, dla przyrządów i urządzeń pomiarowych, jest dokładność pomiaru. W przypadku maszyny współrzędnościowej głównym czynnikiem decydującym o dokładności pomiaru jest ustrój nośny, precyzja układu mechanicznego oraz zastosowanych układów mierzających położenie głowicy pomiarowej. Z kolei, w przypadku metod optycznych decydujące znaczenie ma jakość uzyskanych zdjęć pomiarowych oraz możliwość odtworzenia na ich podstawie obiektu, dla którego realizowany jest pomiar. Jakość odwzorowania mierzonego obiektu na zdjęciach pomiarowych zależy przy tym od wielu czynników, do których zaliczyć należy między innymi:

- rozdzielczość kamer oraz precyzja wykonania ich układu optycznego i mechanicznego,
- jakość algorytmów kalibracji (minimalizacja błędów spowodowanych zniekształceniami obrazów, dokładność wyznaczenia orientacji wewnętrznej i zewnętrznej układu pomiarowego, itp.),
- dokładność identyfikacji mierzonej geometrii w oparciu o płaskie odwzorowania charakterystycznych punktów pomiarowych (markerów),
- stan oraz złożoność powierzchni mierzonego obiektu,
- rodzaj materiału, z którego wykonana jest mierzona powierzchnia oraz jego własności optyczne (kolor, zdolność do odbijania światła, przezroczystość),
- warunki oświetlenia obiektu, dla którego realizowany jest pomiar.

W przypadku skanera optycznego dokładność pomiaru zależy w dużym stopniu od objętości pomiarowej, co przekłada się na odległość mierzonego obiektu od skanera. Duże znaczenie w przypadku metod pomiarowych bezstykowych, opartych o analizę zdjęć pomiarowych, ma jakość powierzchni mierzonego obiektu, rodzaj materiału, z którego jest ona

wykonana oraz jej własności optyczne. Nie bez znaczenia są tu również warunki realizacji pomiarów, w tym przede wszystkim oświetlenie mierzonego obiektu, jasność i barwa tła. Stąd realizacja pomiarów cech geometrycznych skanerami bezstykowymi poprzedzona musi być w wielu wypadkach czynnościami polegającymi na odpowiednim przygotowaniu powierzchni do skanowania (oczyszczenie powierzchni oraz jej zmatowienie). Wpływa to na czasochłonność przygotowania obiektu do badań.

Pomiar obiektów wykonanych z materiałów przezroczystych lub półprzezroczystych, w przypadku zastosowania metod bezstykowych stwarza duże trudności. Metody te cechuje również ograniczony zakres pomiarowy ze względu na możliwość dotarcia promieni światła (powierzchnie o skomplikowanej postaci). Z kolei przy zastosowaniu metod stykowych istotnym problemem jest pomiar cech geometrycznych obiektów miękkich, ze względu na wymagany nacisk głowicy pomiarowej. Metody te dają jednak możliwość prowadzenia pomiarów powierzchni trudno dostępnych oraz o skomplikowanej postaci (ograniczenia wynikają tu z geometrii trzpieni pomiarowych oraz średnic stosowanych końcówek).

Dużą zaletą zastosowanego w pomiarach bębnow łańcuchowych skanera bezstykowego ATOS II, podobnie jak to ma miejsce dla wielu tego rodzaju rozwiązań, jest duża mobilność, wynikająca z jego relatywnie małej masy oraz wymiarów. Możliwy jest dzięki temu pomiar geometrii niejednokrotnie dużych i ciężkich elementów (w tym obiektów stacjonarnych). Współrzędnościowe maszyny pomiarowe są z kolei urządzeniami stacjonarnymi, co w efekcie wymaga podjęcia niejednokrotnie skomplikowanych działań logistycznych, których efektem będzie umieszczenie obiektu, dla którego realizowany będzie pomiar, na stanowisku pomiarowym. Maksymalna wielkość mierzonych obiektów oraz ich waga

wynika tu przy tym z wymiarów przestrzeni pomiarowej maszyny oraz nośności stołu.

Stacjonarny ustrój nośny maszyn współrzędnościowych oraz stabilne warunki środowiskowe (pomieszczenia o ustabilizowanej temperaturze i wilgotności), w powiązaniu na przykład z automatyczną korekcją temperatury mierzonego elementu, wpływają korzystnie zarówno na dokładność realizacji pomiarów oraz ich powtarzalność.

Wybór metody skanowania powierzchni mierzonych obiektów (stykowa lub bezstykowa) w sposób istotny wpływa na czas realizacji pomiarów oraz postać uzyskiwanych wyników. Zastosowana w pomiarach bębnowych łańcuchowych maszyna współrzędnościowa realizowała proces pomiarowy w trybie skaningu, który odbywał się w sposób automatyczny. Dyktowało to jednak wykonanie pewnych czynności wymagających ręcznego sterowania. Obejmowały one zdefiniowanie układu współrzędnych związanego z bębniem łańcuchowym, dla którego realizowany był pomiar oraz określenie granic obszarów skanowania. Ze względu na konieczność wskazania dużej liczby punktów pomiarowych czynności te cechowały się dużą czaso- i pracochłonnością. W efekcie, proces akwizycji danych był długotrwały i pracochłonny. W przypadku zastosowania skanera ATOS proces pozyskiwania danych pomiarowych cechował się dużą szybkością. Sprowadzał się on bowiem zasadniczo do rejestracji w pamięci komputera obrazów cyfrowych mierzonego obiektu pozyskiwanych z kamer urządzenia pomiarowego. Stąd, w przypadku tego rodzaju rozwiązań czas wykonywania pomiarów nawet dużych obiektów jest relatywnie krótki. Istnieje przy tym możliwość bieżącego kontrolowania poprawności wykonania skanów na ekranie monitora komputera, z którym skaner ATOS jest połączony.

Rozpatrywane metody pomiarowe cechują się różną ilością gromadzonych i przetwarzanych w procesie pomiarowym informacji o mierzonym obiekcie. W przypadku maszyny współrzędnościowej dane pomiarowe ograniczały się jedynie do fragmentów powierzchni bębnowych łańcuchowych ograniczonych konturem obszaru skanowania. Postać powierzchni gniazd determinowana jest zbiorem punktów w przestrzeni, uzyskanych w wyniku bezpośredniego pomiaru ich współrzędnych w kartezjańskim układzie odniesienia. Liczba tych punktów wynika z przyjętej strategii digitalizacji (punkty pomiarowe w rozpatrywanym zadaniu pomiarowym rozmieszczone były w odległości co 1 mm w kierunku równoległym do osi X oraz osi Y lokalnego układu odniesienia XYZ). Dla jednego gniazda bębna łańcuchowego dało to około 9200 punktów pomiarowych. Ilość informacji

o skanowanej powierzchni, dostępnych po zakończeniu pomiarów, wynika więc bezpośrednio z realizowanej strategii pomiaru i ich zwiększenie bez powtórzenia procedury pomiarowej nie jest możliwe. Stąd jakość wyników pomiaru, w zakresie dokładności odwzorowania cech geometrycznych skanowanych powierzchni, wynika wprost z wartości parametrów procesu skanowania założonych na etapie definiowania strategii digitalizacji. Inaczej jest w przypadku skanerów optycznych. Tutaj bowiem źródłem informacji o obiekcie (całym lub jego części) są zdjęcia skanowanej powierzchni. Transformacja informacji, zawartych na tych zdjęciach do postaci zbioru (chmury) punktów opisującej postać mierzonej powierzchni i dalej do modelu wirtualnego mierzonego obiektu, realizowana jest w komputerze z zastosowaniem dedykowanego oprogramowania. Na tym etapie ustala się gęstość punktów pomiarowych wyznaczanych z płaskich odwzorowań mierzonego obiektu, która determinowana jest rozdzielczością kamer systemu pomiarowego. Pozwala to w efekcie na dostosowywanie, na etapie przetwarzania danych, ilości informacji wynikającej z potrzeb realizowanych analiz. Ze względu na to, iż zasadnicza część procedury pomiarowej sprowadza się do przetwarzania zdjęć cyfrowych rejestrowanych przez kamery urządzenia pomiarowego, wymagane jest do tego specjalistyczne oprogramowanie komputerowe.

## 6. PODSUMOWANIE

---

W świetle stale rosnących oczekiwań użytkowników górniczych przenośników zgrzeblowych w zakresie ich możliwości transportowych oraz niezawodności, poprawa trwałości bębnowych łańcuchowych ma priorytetowe znaczenie. Jednym z kierunków działań w tym zakresie jest identyfikacja wielkości oraz postaci zużycia gniazd bębnowych łańcuchowych w wyniku ich współdziałania z łańcuchem zgrzeblowym. Realizowane jest to w oparciu o analizę wyników pomiaru wielkości zużycia gniazd bębnowych łańcuchowych przenośników zgrzeblowych różnego typu i wielkości eksploatowanych w warunkach polskich kopalń węgla kamiennego. W tym celu przeprowadzone zostały pomiary cech geometrycznych bębnowych łańcuchowych charakteryzujących się różnym stopniem oraz formą zużycia. W pomiarach tych zastosowano dwie metody pomiarowe: stykową – z zastosowaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Zeiss ACCURA 7 oraz bezstykową – z zastosowaniem skanera 3D ATOS II zintegrowanego z systemem TRITOP.

Techniczna realizacja pomiarów bębnow łańcuchowych wymienionymi metodami uwidoczniła szereg ich zalet, ale również i pewne wady. Do podstawowych zalet metody stykowej można zaliczyć:

- prostą budowę i brak konieczności stosowania specjalistycznego oprogramowania,
- możliwość prowadzenia pomiarów powierzchni trudno dostępnych dla promieni światła,
- wysoką dokładność pomiarową.

Główne wady pomiarów skanujących z zastosowaniem maszyny współrzędnościowej to:

- długotrwały i pracochłonny proces akwizycji danych,
- ograniczony zakres pomiarowy ze względu na wymiary i masy mierzonych obiektów,
- trudności w skanowaniu obiektów miękkich ze względu na wymagany nacisk głowicy pomiarowej.

Zaletami optycznych skanerów bezstykowych są natomiast:

- mobilność urządzenia pomiarowego,
- krótki czas wykonywania pomiarów nawet dużych obiektów,
- wysoka dokładność pomiarowa,
- możliwość bieżącego kontrolowania poprawności wykonania skanów.

Za wady tych urządzeń należy uznać:

- ograniczony zakres skanowania do obiektów nieprzeźroczystych i nie odbijających promieni światła,
- ograniczony zakres pomiarowy ze względu na możliwość dotarcia promieni światła,
- konieczność stosowania specjalistycznego oprogramowania.

Przeprowadzone badania stereometrii gniazd bębnow łańcuchowych pozwoliły na pozyskanie wiedzy w zakresie możliwości identyfikacji cech geometrycznych wieńców gniazdowych bębnow napędowych w przenośnikach zgrzeblowych. Wiedza ta będzie podstawą zaprojektowania oryginalnego mobilnego urządzenia pomiarowego bębnow łańcuchowych. Użytkownicy będą mieli wtedy możliwość okresowej oceny stanu technicznego bębna łańcuchowego w przenośniku ścianowym bądź w przenośniku podścianowym bez konieczności jego demontażu w aspekcie podejmowania decyzji o wycofaniu bębna łańcuchowego z eksploatacji.

#### Literatura

1. Bernardini F.: Rushmeier H: The 3D Model Acquisition Pipeline. Computer Graphics Forum, Volume 21 (2002), number 2.
2. Bubicz M.: Szybkie prototypowanie cz. II. Skanery 3D. Wstęp do inżynierii odwrotnej. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, czerwiec 2008.

3. Giza T., Mann R.: Diagnosing of scraper conveyors sprocket drums wear using a structured light scanner. Technicka Diagnostika. ATD ČR, Ostrava z.1 R XX 2011.
4. Kaźmierczak M.: Digitalizacja powierzchni gniazd kół łańcuchowych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Zeiss ACCURA 7 (sprawozdanie z pomiarów – praca niepublikowana).
5. Malcharek D.: Pomiar metodą skanowania skanerem światła strukturalnego bębnow przenośników zgrzeblowych ze szczególnym uwzględnieniem zarysu gniazd. UNIMAP. Katowice, listopad 2011 (sprawozdanie z pomiarów – praca niepublikowana).
6. Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2005
7. Rychlik M.: Skanery 3D – wrota do wirtualnego świata. DESIGN NEWS Polska kwiecień 2007.
8. PN-EN ISO 10360:2003. Specyfikacja geometrii wyrobów. Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych.
9. www.zeiss.nl
10. www.gom.com

*Praca zrealizowana w ramach projektu rozwojowego nr N R09 0026 06/2009 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego decyzją nr 0481/R/T02/2009/06.*

*Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów*