

ZROBOTYZOWANA TECHNOLOGIA DIGITALIZACJI ORGANÓW ROBOCZYCH KOMBAJNÓW GÓRNICZYCH DLA POTRZEB KONTROLI JAKOŚCI ICH WYTWARZANIA

ROBOTISED DIGITALISATION TECHNOLOGY OF ROADHEADER WORKING UNITS FOR THE PURPOSE OF MANUFACTURING QUALITY CONTROL

Piotr Cheluszka - Instytut Mechanizacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice
 Maciej Nocoń - Absolwent Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej o specjalności Maszyny Górnicze, Budowlane i Drogowe, Politechnika Śląska, Gliwice

Proces urabiania kombajnami górniczymi realizowany jest za pomocą organów roboczych wyposażonych w narzędzia urabiające – najczęściej noże skrawające osadzone w uchwytach nożowych. W przypadku urabiania na zasadzie skrawania o skuteczności i efektywności urabiania decyduje w dużym stopniu układ noży, a więc ich liczba oraz sposób rozmieszczenia i ustawienia na poboczniczy organu roboczego. Dlatego układy noży na tego rodzaju organach roboczych optymalizowane są na etapie projektowania dla określonych warunków eksploatacyjnych kombajnu. W celu zapewnienia oczekiwanych przez użytkownika efektów realizacji procesu urabiania niezbędna jest kontrola jakości wytwarzania, szczególnie w aspekcie zgodności rozmieszczenia uchwytów nożowych na poboczniczy z dokumentacją projektową. Stąd rodzi się problem pomiaru stereometrii organów roboczych maszyn urabiających. Skomplikowany zazwyczaj ich kształt sprawia, iż zastosowanie tradycyjnych, stykowych metod pomiarów jest tu mało praktyczne. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania zautomatyzowanego skanowania 3D dla potrzeb wyznaczenia wartości parametrów stereometrycznych organów roboczych górniczych maszyn urabiających. Automatyzację procesu digitalizacji osiągnięto w wyniku zastosowania robota przemysłowego z zainstalowanym skanerem światła strukturalnego, zintegrowanego poprzez sterownik PLC z pozycjonerem, na którym osadzony jest skanowany obiekt. W pracy omówiono procedurę pomiarową oraz przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów głowicy urabiającej kombajnu AM-50z zrealizowane w celu określenia dokładności jej wykonania.

Słowa kluczowe: kombajn górniczy, organ roboczy, metrologia, skanowanie 3D, zrobotyzowana stacja pomiarowa

A process of rock cutting with winning machines is carried out by means of working units fitted with cutting tools – most frequently picks seated in pickboxes. The configuration of picks, i.e. the number, arrangement and setting of a working unit at the side surface, is fundamental for mining effectiveness and efficiency by way of cutting. The configuration of picks on such type of working units is optimised in the phase of design for defined winning machine operating conditions. In order to ensure the results of cutting process performance, manufacturing quality control is indispensable, especially in terms of the conformity of pickboxes arrangement at the side surface to technical documentation. Therefore arises an issue of measuring the stereometry of mining machines working units. As their shape is usually complicated, the application of traditional, contact measurement methods is not very practical here. The article presents the potential uses of automated 3D scanning for the purpose of determining the values of stereometry parameters of mining machines working units. Digitalisation process automation was achieved by applying an industrial robot with a structured light scanner installed, integrated via a PLC with a rotary table onto which the scanned object is mounted. The work discusses a measuring procedure and presents the examples of results of AM-50z roadheader cutter head's measurements carried out to determine the accuracy of its production.

Keywords: winning machine, working unit, manufacturing quality control, 3D scanning, robotised measuring station

Wprowadzenie

Kombajny górnicze, zgodnie z definicją zawartą w [13], są maszynami zespołowymi wykonującymi dwie lub więcej czynności (przeważnie urabianie i ładowanie) w przodkach górniczych. W górnictwie podziemnym węgla kamiennego, soli i innych minerałów (np. w kopalniach rud miedzi [7,11])

wykorzystywane są one w robotach udostępniających i przygotowawczych (do drążenia wyrobisk korytarzowych) oraz do wybierania złóż kopaliny użytecznej. Maszyny te stosowane są również w górnictwie odkrywkowym do eksploatacji złóż surowców skalnych, węgla, soli, wapienia, boksytu, rudy żelaza, fosforu, łupków bitumicznych, kimberlitu (surface mining) [6,20], a nawet w górnictwie podwodnym – do wybierania złóż

surowców mineralnych z dna zbiorników wód śródlądowych oraz akwenów morskich i oceanów (na przykład siarczków polimetalicznych miedzi i złota [19]) – rys.1. Kombajny górnicze stosowane są ponadto w budownictwie inżynierskim

(do drążenia tuneli, czy innych obiektów podziemnych) oraz drogownictwie. Wachlarz zastosowań w górnictwie oraz robotach inżynierskich tego rodzaju maszyn jest zatem bardzo szeroki.

a)



b)



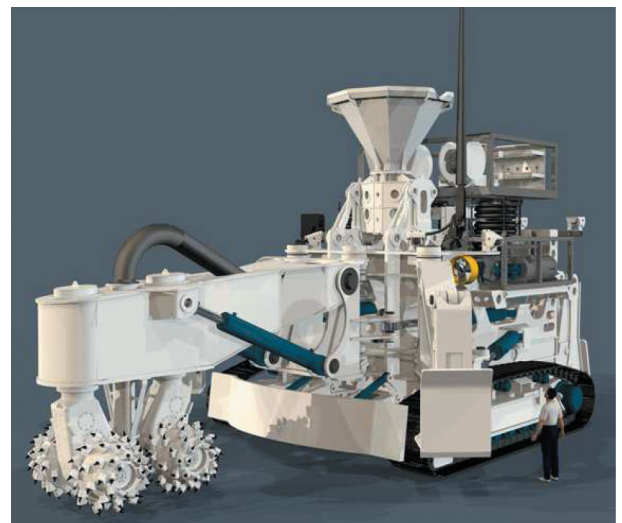
c)



d)

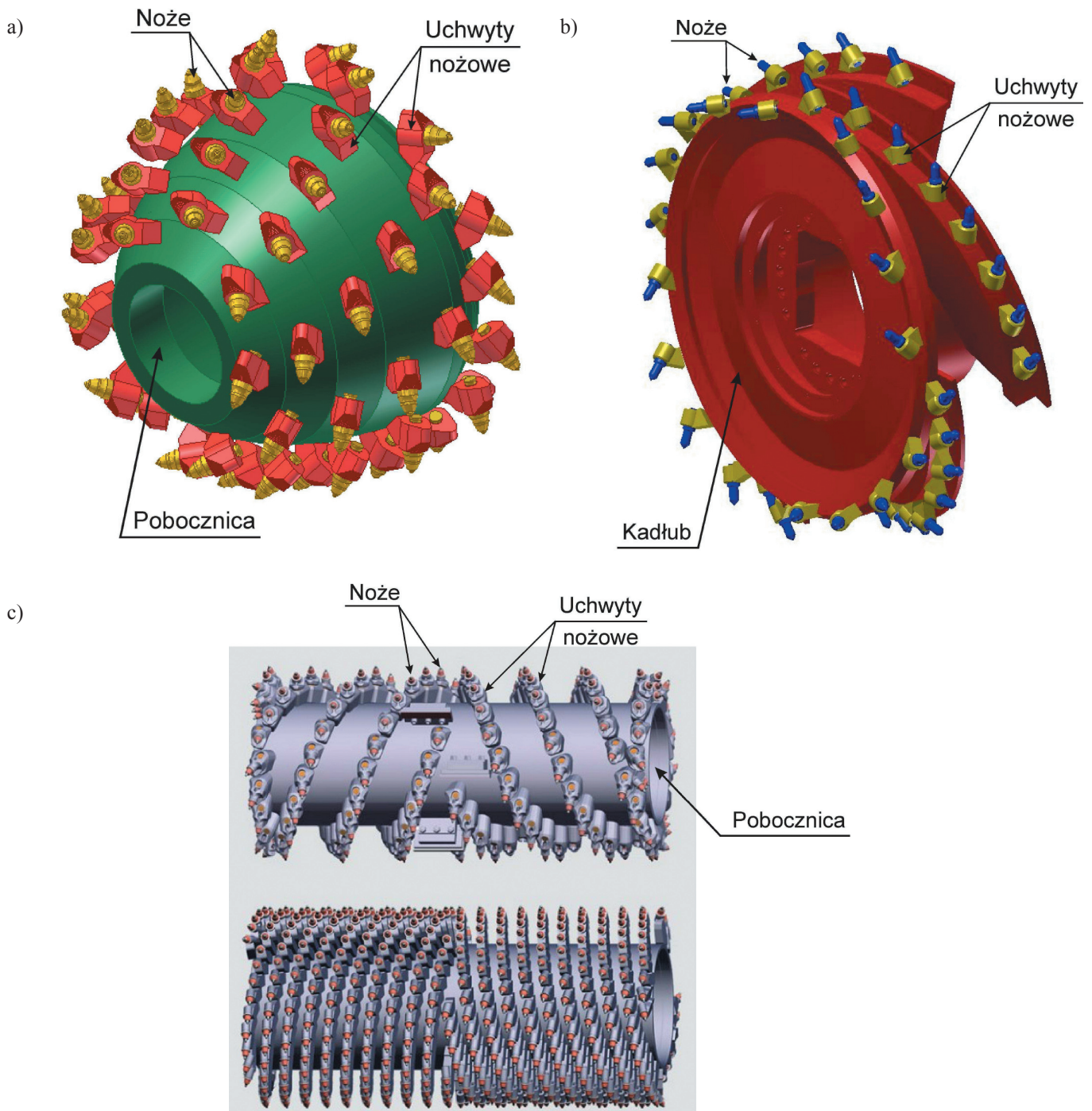


e)



Rys. 1. Wybrane przykłady zastosowania kombajnów w górnictwie podziemnym i powierzchniowym: a) drążenie wyrobisk korytarzowych w podziemnych kopalniach węgla kamiennego [17], b) roboty wybierkowe w górnictwie podziemnym soli kamiennej [11], c) roboty wybierkowe w kopalni odkrywkowej dolomitu [6], d) maszyna frezująca w odkrywkowej kopalni węgla kamiennego [20], e) kombajn do eksploatacji złóż siarczków polimetalicznych miedzi i złota z dna morskiego [18]

Fig. 1. Chosen examples of the use of mining machines in underground and surface mining: a) driving of roadways in underground coal mines [17], b) excavation in underground salt mines [11], c) excavation in open-pit dolomite mine [6], d) surface miner in open-pit coal mine [20], e) winning machine for the exploitation of polymetallic sulphides of copper and gold from the seabed [18]



Rys. 2. Organy robocze maszyn urabiających: a) głowica urabiająca wysięgnikowego kombajnu chodnikowego, b) organ urabiający kombajnu ścianowego, c) bębny urabiające maszyn frezujących [20]

Fig. 2. Working units of mining machines: a) working unit of boom-type roadheader, b) working unit of longwall shearer, c) working drums of milling machines [20]

Podstawowym procesem roboczym realizowanym przez rozpatrywane tu maszyny jest urabianie skały, które w zależności od właściwości mechanicznych urabianych skał odbywać się może na różne sposoby. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem urabiania jest przy tym skrawanie. Kombajny skrawające wyposażone są w organy robocze (organy urabiające, głowice urabiające, bębny frezujące) o różnej wielkości i kształcie, wyposażone w noże osadzone w uchwytych nożowych przyspawanych do ich pobocznicy (kadłuba) – rys. 2. Organy te wykonując ruch obrotowy wokół własnej osi przemieszczane są po powierzchni skały. W trakcie tego ruchu noże wchodzą w kontakt z urabianą skałą wykonują skrawki, czego efektem jest odpajanie ziaren urobku od calizny. O skuteczności i efektywności urabiania skał o określonej urabialności decyduje

układ noży. Liczba oraz sposób rozmieszczenia i ustawienia noży oraz związanych z nimi uchwytych nożowych na organach roboczych maszyn urabiających projektowane są dlatego z wykorzystaniem dedykowanych narzędzi komputerowych, w oparciu o symulację procesu urabiania, dla określonych warunków ich eksploatacji [5,9,10].

Jednym z istotnych warunków uzyskania oczekiwanych efektów urabiania jest zapewnienie wysokiej jakości wytwarzania organów roboczych maszyn urabiających. Szczególnie ważne jest w tym względzie zagwarantowanie wymaganej dokładności i powtarzalności ustawiania uchwytych nożowych na ich pobocznicy. Na etapie tym poszczególne uchwyty nożowe mocowane są wstępnie do pobocznicy głowicy urabiającej spoiną szepną w określonej w fazie projektowania pozycji.

Proces ten realizowany jest jak dotąd ręcznie z wykorzystaniem różnego rodzaju przyrządów montażowych. Zapewnienie odpowiedniej dokładności wykonania wymaga od operatora dużej uwagi i staranności oraz wysokich kwalifikacji zawodowych.

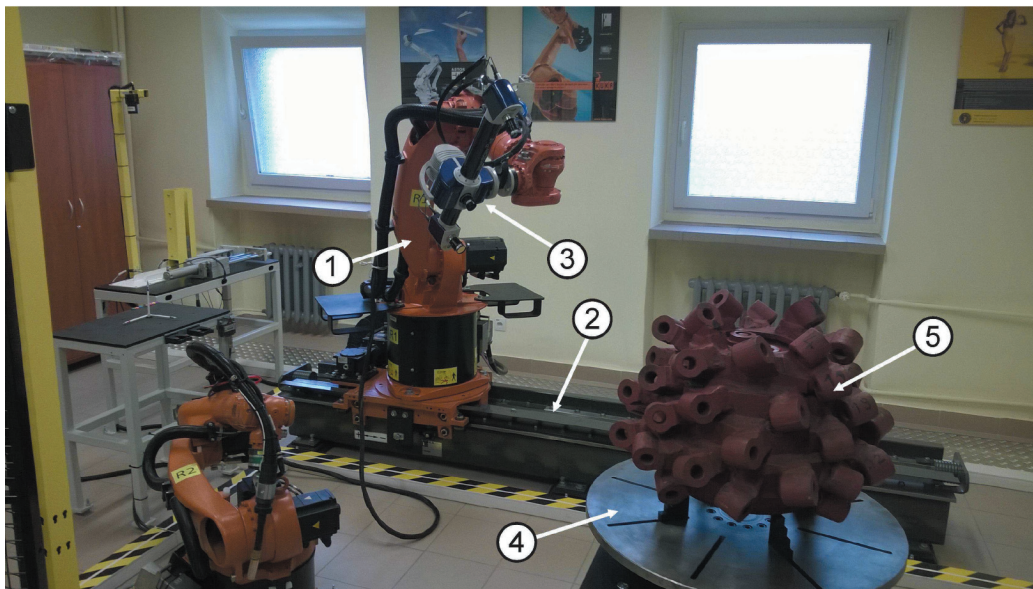
Drogą do znaczącego wzrostu dokładności i powtarzalności wytwarzania organów roboczych maszyn urabiających jest zastosowanie technologii zrobotyzowanych [1,3]. Niezależnie jednak od sposobu montażu uchwytów nożowych na pobocznicę organu roboczego kombajnu, na każdym etapie jego wytwarzania niezbędna jest kontrola jakości tego procesu. Dotyczy to w szczególności oceny prawidłowości rozmieszczenia i ustawienia uchwytów nożowych na etapie ich wstępnego mocowania oraz po ostatecznym ich przyspawaniu.

Ze względu na skomplikowaną stereometrię organów roboczych kombajnów górniczych zastosowanie tradycyjnych, stykowych metod pomiaru wielkości geometrycznych (liniałów, kątomierzy, maszyn współrzędnościowych, ramion pomiarowych itp.) jest mało praktyczne oraz czaso- i pracochłonne. Z pomocą przychodzą tu metody bezstykowe – pasywne (np.

fotogrametryczne) lub aktywne (np. światła strukturalnego) [2]. Pozwalają one na dokonanie pomiaru wartości wybranych cech geometrycznych, bądź rekonstrukcję cyfrową powierzchni badanego obiektu i na tej podstawie określenie wartości interesujących parametrów.

Na przykładzie głowicy urabiającej wysięgnikowego kombajnu chodnikowego zaprezentowano w niniejszym artykule możliwości wykorzystania skanowania 3D dla potrzeb oceny dokładności wykonania organów roboczych kombajnów górniczych. Pomiary cech geometrycznych głowicy urabiającej oparte zostały na digitalizacji jej powierzchni z wykorzystaniem metody światła strukturalnego. Ponieważ rekonstrukcja cyfrowa głowicy urabiającej wymagała wykonania dużej liczby skanów z różnych ustawień skanera względem skanowanego obiektu, proces akwizycji danych został zautomatyzowany z wykorzystaniem robota przemysłowego.

Wyniki przeprowadzonej analizy umożliwiły ocenę zgodności wykonania głowicy urabiającej z dokumentacją techniczną. Badania zrealizowano w ramach pracy dyplomowej



Rys. 3. Zrobotyzowana stacja pomiarowa w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa: 1) robot KUKA KR 16-2, 2) jednostka liniowa KL 250-3 (prod. KUKA Roboter GmbH), 3) skaner smartSCAN 3D-HE (prod. Breuckmann-Aicon GmbH), 4) pozycjoner PEV-1-2500 (prod. ZAP Robotyka), 5) obiekt badań – głowica urabiająca kombajnu chodnikowego

Fig. 3. Robotised measuring station: 1) KUKA KR 16-2, 2) KL 250-3 linear unit robot (both manufactured by KUKA Roboter GmbH), 3) smartSCAN 3D-HE scanner (manufactured by Breuckmann- Aicon GmbH), 4) PEV-1-2500 rotary table (manufactured by ZAP Robotyka), 5) test object – roadheader cutter head



Rys. 4. Skaner metrologiczny światła strukturalnego smartSCAN 3D-HE zamocowany do ramienia robota

Fig. 4. smartSCAN 3D-HE metrological structured light scanner mounted to the robot arm

Tab. 1. Podstawowe dane techniczno–metrologiczne skanera smartSCAN 3D–HE [14]
 Tab. 1. Basic technical and metrological data of smartSCAN 3D–HE scanner [14]

rozdzielczość matrycy kamer	[Mpx]	4,0
odległość robocza	[mm]	1019
wielkość pola widzenia (szer. x wys.)	[mm]	285 x 280
głębina przestrzeni pomiarowej	[mm]	220 (±110)
kąty ustawienia kamer	[°]	+18 / –9,
ogniskowa kamer	[mm]	50
źródło światła projektora		LED zielone
kąt ustawienia projektora	[°]	0
ogniskowa projektora	[mm]	12
maksymalny błąd pomiaru	[mm]	0,145
masa	[kg]	4,1

magisterskiej wykonanej w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej [8].

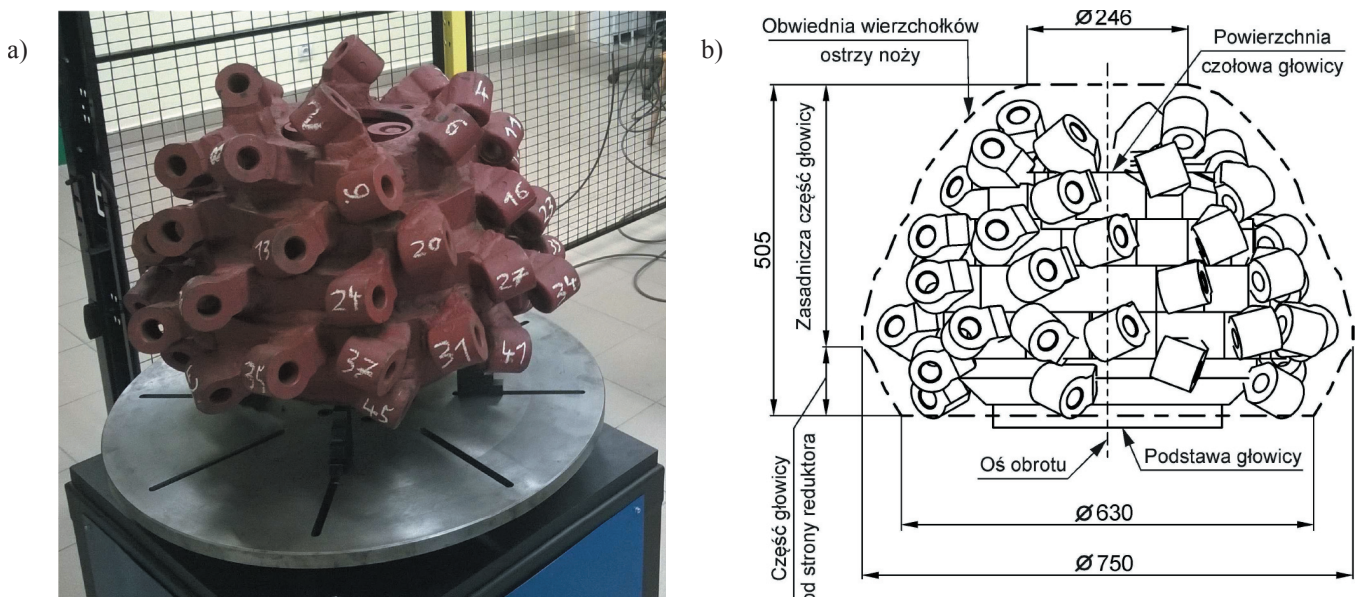
Charakterystyka zrobotyzowanego stanowiska pomiarowego

Zrobotyzowana stacja pomiarowa (rys. 3) w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, na której zrealizowane zostały pomiary stereometrii głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego składa się z robota przemysłowego KUKA KR 16–2 (1) posadowionego na jednostce liniowej (2). Do kiści manipulatora robota przymocowany jest skaner światła strukturalnego smartSCAN 3D–HE (3) sprzężony sygnałowo z odpowiednio skonfigurowaną stacją roboczą (komputerem) HP Z420 Workstation. Skanowany obiekt (w tym przypadku głowica urabiająca – poz. 5) posadowiona jest na tarczy pozycjonera jednoosiowego o pionowej osi obrotu PEV–1–2500 (4). Integracja poszczególnych elementów stacji zrobotyzowanej realizowana jest z wykorzystaniem sterownika nadrzędnego PLC SIEMENS Simatic S7–1200 oraz sterownika bezpieczeństwa PILZ PNOZMulti. Dane pomiarowe ze skanera przesyłane są wprost do stacji roboczej HP Z420 Workstation i tam podlegają akwizycji, archiwizacji oraz obróbce w dedyko-

wanym do obsługi skanera oprogramowaniu Optocat.

Skaner metrologiczny smartSCAN 3D–HE (rys. 4) należy do grupy aktywnych optycznych skanerów bezstykowych światła strukturalnego. Skanowanie polega tu na projekcji znanej struktury światła wprost na skanowany obiekt. Kamery cyfrowe o wysokiej rozdzielczości (skaner smartSCAN 3D–HE wyposażony jest w dwie kamery o rozdzielczości 4 Mpx – tab. 1) rejestrują obraz powierzchni obiektu wraz z liniami struktury projektowanej na jego powierzchnię. Obraz ten jest przekazywany do komputera. Rekonstrukcja powierzchni skanowanego obiektu do postaci chmury punktów dokonywana jest w wyniku komputerowej analizy jej obrazów cyfrowych zarejestrowanych przez kamery w środowisku Optocat.

Ponieważ do pozycjonowania skanera względem skanowanego obiektu wykorzystany został robot przemysłowy oraz pozycjoner, na którym obiekt ten był posadowiony, niezbędne było skomunikowanie stacji roboczej z zainstalowanym na niej oprogramowaniem sterującym pracą skanera ze sterownikiem robota. Zrealizowane to zostało z wykorzystaniem połączenia TCP/IP w architekturze: klient (kontroler robota) – serwer (program Optocat). Komunikacja ta wykorzystywana jest do wymiany poleceń XML oraz danych, w tym – informacji o bezwzględnej pozycji robota, niezbędnych do automatycznego



Rys. 5. Obiekt badań: a) głowica urabiająca posadowiona na tarczy pozycjonera, b) model CAD głowicy urabiającej z podstawowymi jej wymiarami
 Fig. 5. Study object: a) cutter head rested on the rotary table disc, b) cutter head CAD model with its basic dimensions

dopasowywania skanów. Program Optocat wyposażony jest w tym celu w interfejs OptocatRobotXML dla robotów KUKA, wspierających protokół XIRP (interfejs XML dla robotów i urządzeń peryferyjnych) [16].

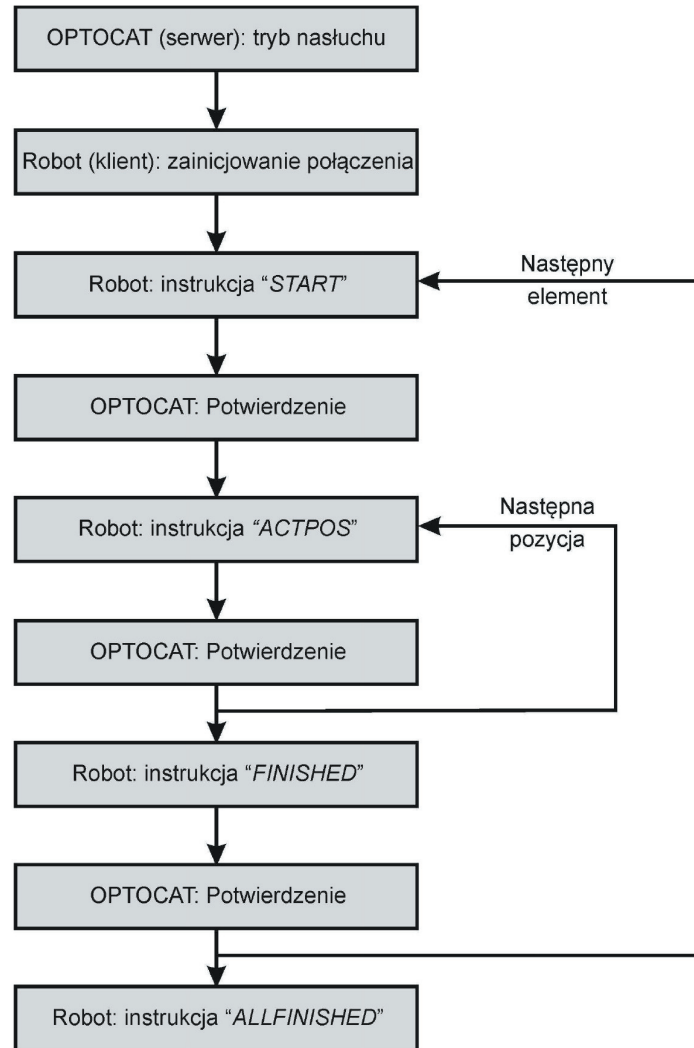
Obiekt badań

Pomiary zrealizowano dla głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego AM-50z (rys. 5a). Jest to głowica poprzeczna o średnicy maksymalnej obwiedni wierzchołków ostrzy noży

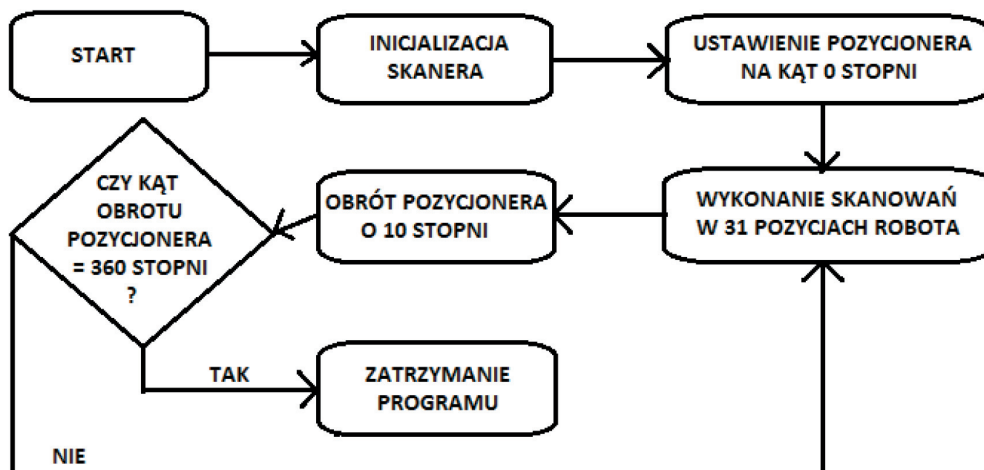
wynoszącej 750 mm oraz długości 505 mm (rys. 5b). Wyposażona jest ona w 48 uchwytów nożowych przyspawanych do poboczniczy wykonanej z zespalanych ze sobą elementów wielobocznych z blachy stalowej. Na zasadniczej części głowicy rozmieszczonych jest 36 uchwytów nożowych, natomiast pozostałych 12 uchwytów nożowych – od strony reduktora.

Badana głowica urabiająca wyposażona jest w uchwyty nożowe z cylindrycznym gniazdem, przystosowane do współpracy z nożami stożkowymi z trzonkiem o średnicy 30 mm i wysunięciu z uchwytu 64 mm (odległości wierzchołka ostrza noża

a)



b)



Rys. 6. Algorytm procedury komunikacji oprogramowania Optocat z kontrolerem robota [16] (a) oraz schemat blokowy programu pomiarowego [8] (b)
Fig. 6. Optocat software communication procedure algorithm with robot controller [16] (a) and measuring programme block diagram [8] (b)

od powierzchni czołowej uchwytu nożowego). Rozpatrywana głowica urabiająca, po jej wykonaniu, nie była eksploatowana. Dlatego nie miała ona żadnych śladów zużycia eksploatacyjnego, ani uszkodzeń. Pomiaru stereometrii wykonane zostały dla głowicy lewej (kombajny wysięgnikowe z głowicami poprzecznymi wyposażone są w dwie głowice rozmieszczone po obu stronach reduktora w układzie urabiania – prawą i lewą, będącą lustrzanym odbiciem głowicy prawej).

Procedura pomiarowa

Automatyczny pomiar (skanowanie) badanego obiektu na stanowisku zrobotyzowanym wymaga realizacji złożonego algorytmu sterowania poszczególnymi urządzeniami stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem odpowiednich procedur wynikających z architektury układu sterowania. Inicjalizacja programu pomiarowego dokonywana jest z poziomu sterownika nadrzędnego PLC. Sterownik ten, obok innych zadań, przetwarza żądania kontrolera robota w zakresie sterowania obrotem tarczy pozycjonera, na której posadowiony jest skanowany obiekt. Sterownik PLC przekazuje te żądania do kontrolera pozycjonera, który realizuje obrót jego tarczy o zadany kąt.

Procedura pomiarowa rozpoczyna się od zainicjowania komunikacji pomiędzy stacją roboczą z zainstalowanym oprogramowaniem Optocat oraz kontrolerem robota. W tym celu w programie Optocat wywołana zostaje funkcja „RobotServer”, w wyniku czego przechodzi on w tryb nasłuchu, czekając na ustanowienie połączenia przez kontroler robota (rys. 6a). Gdy połączenie to zostanie zainicjowane, program sterujący pracą skanera otrzymuje instrukcję „START”, która przygotowuje system pomiarowy do pracy. Polecenie „ACTPOS” rozpoczyna pomiar (skanowanie) oraz przekazuje do programu Optocat

aktualną pozycję skanera w przestrzeni. W tym czasie manipulator robota pozostaje w zaprogramowanej pozycji, dopóki jego kontroler nie uzyska potwierdzenia z programu Optocat o zakończeniu pomiaru. Po osiągnięciu kolejnej pozycji (ustawienia skanera) sterownik robota wywołuje instrukcję „ACTPOS” i czeka na odpowiedź serwera. Proces ten jest powtarzany dla wszystkich zaprogramowanych pozycji robota oraz pozycjonera. Po zakończeniu skanowania sterownik robota wysyła polecenie „FINISHED”, które inicjalizuje przetwarzanie danych pomiarowych [16].

Dla potrzeb automatycznego skanowania opracowany został program pomiarowy sterujący pracą stacji zrobotyzowanej. Wewnątrz pętli, w której zmienną jest kąt obrotu tarczy pozycjonera realizowany jest podprogram sterujący robotem (rys. 6b). Zaprogramowanie robota sprowadzało się do określenia szeregu jego pozycji determinujących kolejne położenia skanera w przestrzeni, z których realizowany był proces skanowania. Po każdej instrukcji pozycjonowania następuje wywołanie procedury skanowania „C3D_MEASURE(ANGLE)” z zaimplementowanym poleceniem „ACTPOS” (rys. 7). Argumentem tej instrukcji jest kąt ustawienia tarczy pozycjonera, którego wartość jest niezbędna podczas transformacji współrzędnych skanera w przestrzeni, uwzględniającej obrót skanowanego obiektu wokół osi pionowej pozycjonera. Dla każdego ustawienia tarczy pozycjonera robot realizował 31 instrukcji pozycjonowania narzędzia (skanera), co przy założeniu, że tarcza pozycjonera obracana jest co 10° daje ponad 1100 skanów badanego obiektu. Na rysunku 8 pokazano przebieg realizacji procedury pomiarowej w cyklu automatycznym. W środowisku Optocat każdy z kolejnych skanów jest dodawany do budowanego modelu. Kolejne skany są wstępnie dopasowywane na podstawie informacji uzyskiwanych z systemu sterowania robota o położeniu

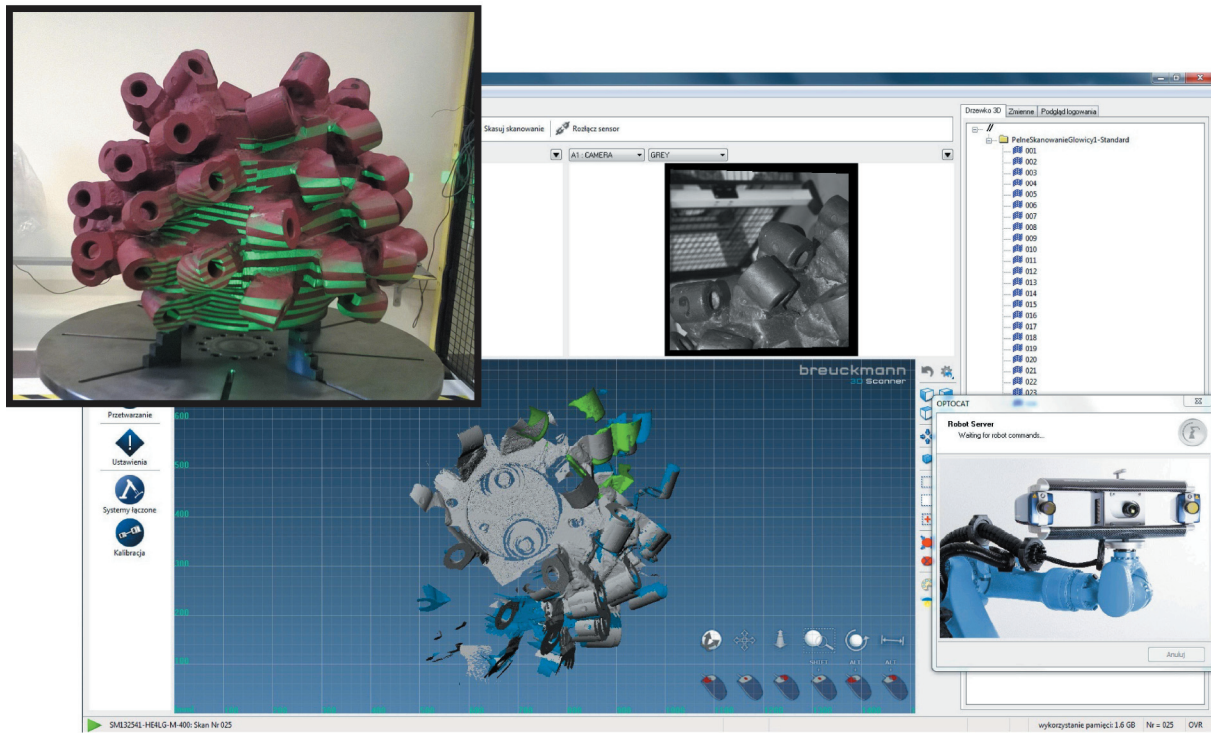
Legenda:

Instrukcje pozycjonowania narzędzia (skanera)

Wywołanie procedury skanowania

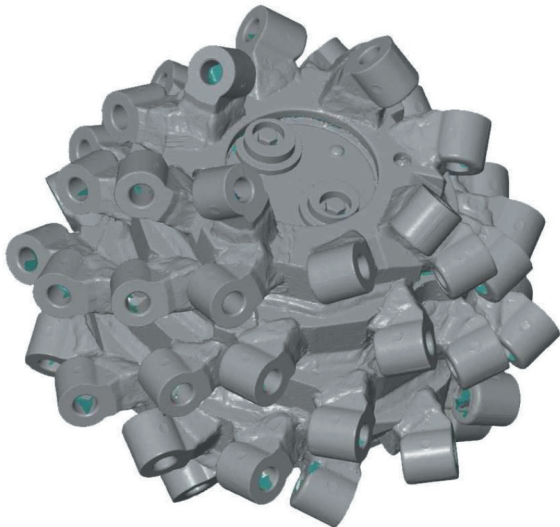


Rys. 7. Widok fragmentu programu pomiarowego w języku KRL na wyświetlaczu panelu programowania robota
Fig. 7. View of part of measuring programme in KRL language on the robot's programming panel display



Rys. 8. Automatyczne skanowanie głowicy urabiającej na stacji zrobotyzowanej – widok interfejsu programu Optocat oraz zestaw prążków rzucanych na powierzchnię skanowanego obiektu przez skaner (w lewym górnym rogu rysunku)

Fig. 8. Automatic cutter head scanning on robotised station – view of Optocat software interface and set of fringes projected onto the surface of the object scanned by scanner (in top left corner of the drawing)



Rys. 9. Efekt skanowania – wirtualny model 3D głowicy urabiającej objętej pomiarem

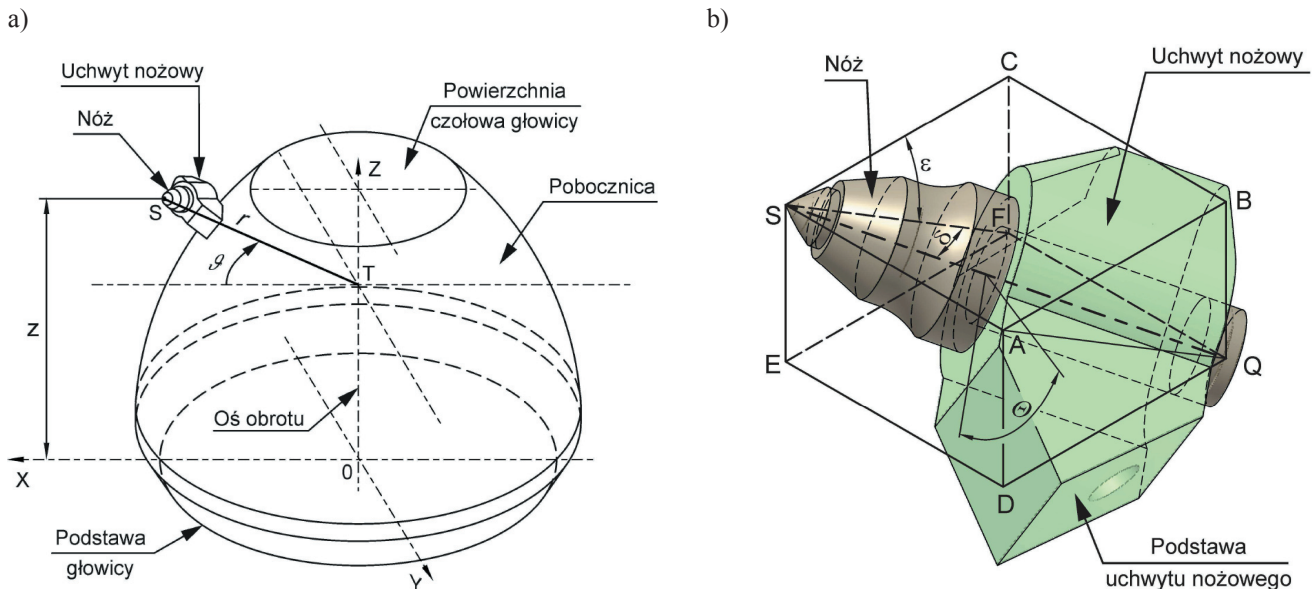
Fig. 9. Scanning result – virtual 3D model of cutter head subject to measurement

skanera, przy którym są one wykonywane.

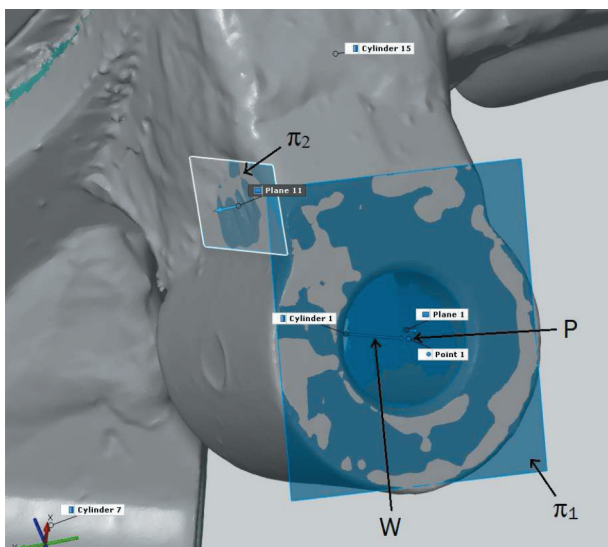
Po zakończeniu skanowania następuje przetwarzanie wyników. Zrealizowane ono zostało w dwóch etapach. W pierwszym etapie dane otrzymane w procesie skanowania zostały poddane obróbce cyfrowej w programie Optocat. Miało to na celu przetworzenie chmury punktów do postaci siatki trójkątów odwzorowującej powierzchnię digitalizowanego obiektu (rys. 9). Wymagało to przeprowadzenia szeregu następujących po sobie operacji, takich jak [12]: optymalizacja i dopasowanie ostateczne skanów, usunięcie elementów tła, łątanie dziur, wygładzanie siatki oraz zapisanie modelu do pliku dyskowego. Etap ten realizowany był już przy znacznym udziale operatora.

W drugim etapie przetwarzania danych model głowicy urabiającej zapisany w pliku dyskowym w formacie STL zaimportowany został do programu GOM Inspekt V8. Program ten daje szerokie możliwości w zakresie inspekcji modeli wirtualnych. Umożliwia on między innymi porównywanie geometrii modeli pozyskanych w trakcie skanowania 3D z modelami CAD oraz identyfikację położenia w przestrzeni różnych elementów geometrycznych [15]. Pierwsza z wymienionych funkcjonalności programu GOM Inspekt pozwala na szybką, automatyczną inspekcję badanego obiektu pod kątem odchyłek wykonawczych w stosunku do kształtu nominalnego. Druga z kolei – umożliwia uzyskanie informacji o wartościach cech geometrycznych takich elementów jak: punkt, prosta, płaszczyzna oraz bryły elementarne o różnym kształcie. Wykorzystana ona została do wyznaczenia danych wejściowych modelu matematycznego pomiaru parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej.

Rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni uchwytów nożowych definiowane jest dla każdego z nich za pomocą sześciu parametrów stereometrycznych (rys. 10). Trzy z nich – współrzędne w układzie walcowym: r , z i ϑ opisują położenie wierzchołka ostrza noża związanego z rozpatrywanym uchwytem nożowym (rys. 10a). Pozostałe trzy – kąty: δ , ε i Θ determinują natomiast orientację danego uchwyty nożowego w przestrzeni (rys. 10b) [2]. W celu wyznaczenia estymat wymienionych parametrów, dla każdego uchwyty nożowego zbudowano model pomiaru. Oparty on został na skojarzonych elementach geometrycznych w postaci (rys. 11): walca W odwzorowującego powierzchnię wewnętrzną gniazda w uchwycie nożowym, płaszczyzny czołowej π_1 , płaszczyzny stycznej do powierzchni bocznej podstawy uchwyty π_2 oraz punktu przecięcia osi walca W z płaszczyzną π_1 (punkt P). Dla potrzeb wyznaczenia wartości parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej



Rys. 10. Parametry opisujące przestrzenne rozmieszczenie wierzchołków ostrego noży (a) oraz kąty definiujące orientację przestrzenną uchwytów nożowych (b) [2]
 Fig. 10. Parameters describing the spatial configuration of pick vertexes (a) and angles defining spatial orientation of pickboxes (b) [2]



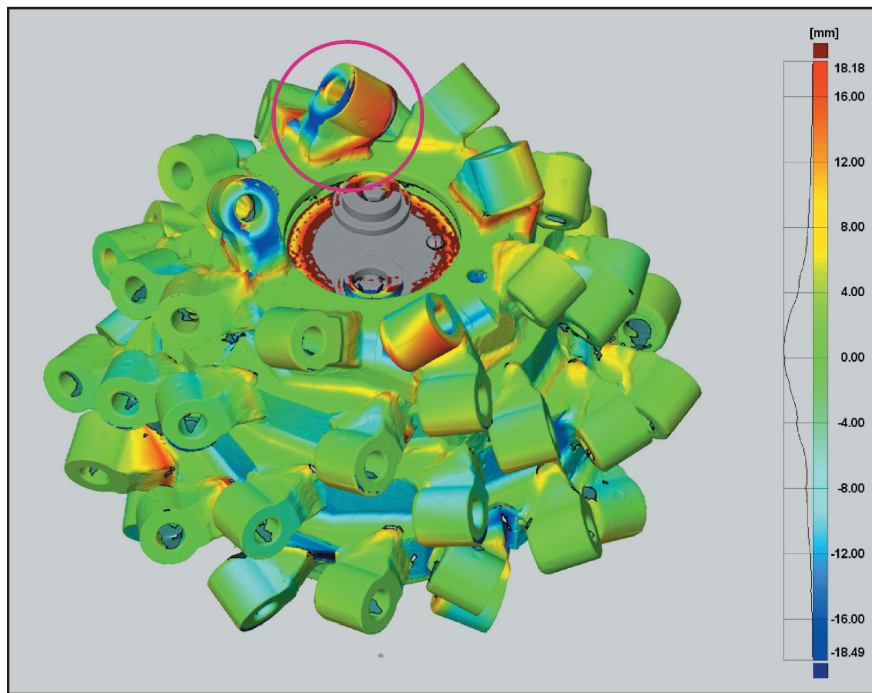
Rys. 11. Skojarzone elementy geometryczne w modelu pomiaru zbudowane dla przykładowego uchwytu nożowego w programie GOM Inspekt [8]
 Fig. 11. Associated geometric parts in measurement model built for pickbox example in GOM Inspekt software [8]

objętej pomiarem wykorzystany został model matematyczny pomiaru opisany między innymi w pracy [4]. Wynik końcowy pomiaru tworzą estymaty parametrów stereometrycznych wraz z odpowiadającą im niepewnością rozszerzoną. Niepewności rozszerzone oszacowane zostały na podstawie wartości maksymalnego błędzi pomiaru podanego przez producenta skanera (tab. 1). Traktowany jest on jako błąd graniczny dopuszczalny urządzenia pomiarowego, na podstawie którego oszacowano wartości niepewności standardowych wielkości wchodzących do definicji funkcji modelujących pomiar. Niepewności rozszerzone pomiaru wartości współrzędnych wierzchołków ostrego noży związanych z poszczególnymi uchwytami nożowymi: $U(r)$, $U(z)$ i $U(\vartheta)$ wynosiły przeciętnie: 0,3 mm; 0,4 mm i 0,1°. Z kolei niepewności rozszerzone pomiaru kątów determinujących ustawienie uchwytów nożowych: $U(\delta)$, $U(\epsilon)$ i $U(\Theta)$ kształtowały się odpowiednio na poziomie: 0,2°; 0,3° i 0,3° (dla przedziału ufności $P=0,95$).

Analiza wyników pomiarów

Ocena dokładności wykonania głowicy urabiającej objętej pomiarem zrealizowana została dwuetapowo. W pierwszym z nich dokonano automatycznej inspekcji uzyskanego na drodze skanowania modelu głowicy urabiającej w środowisku GOM Inspekt. W efekcie otrzymano mapę odchyłek powierzchni rzeczywistej od nominalnej (modelu CAD), nałożoną na wirtualny model badanej głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego uzyskany na drodze skanowania (rys. 12). Analiza odchyłek wykonawczych badanej głowicy urabiającej wykazała, że dla blisko połowy punktów porównywanych powierzchni odchyłki zawierały się w zakresie ± 4 mm [8]. Najbardziej oddalona od nominalnego była przy tym powierzchnia w obrębie czterech uchwytów nożowych rozmieszczonych na powierzchni czołowej głowicy urabiającej oraz czterech uchwytów nożowych położonych najbliżej podstawy głowicy urabiającej (obszary w kolorze ciemno czerwonym oraz granatowym). Największa odchyłka przekraczała przy tym nawet +22 mm (uchwyt otoczony fioletową obwódką na rys. 12). Uchwytory rozmieszczone w środkowej części głowicy urabiającej charakteryzują się najmniejszymi wartościami odchyłek od ustawienia nominalnego (obszary w kolorze zielonym). Wynika to z konstrukcji pobocznicy głowicy urabiającej – w części środkowej na jej powierzchni wykonane są wycięcia narzucające sposób ustawienia podstawy uchwytu nożowego względem powierzchni pobocznicy głowicy. W przypadku uchwytów nożowych zlokalizowanych w obrębie powierzchni czołowej głowicy oraz uchwytów rozmieszczonych od strony reduktora ustawienie uchwytu nożowego względem pobocznicy głowicy urabiającej nie jest w ten sposób determinowane, przez co możliwa jest tu pewna dowolność. Wartość średnia odchyłek punktów powierzchni rzeczywistej głowicy urabiającej objętej pomiarem od modelu CAD jest relatywnie mała i wynosi 0,8 mm, przy czym odchylenie standardowe jest równe 5,6 mm.

Mapy odchyłek powierzchni rzeczywistej głowicy urabiającej od jej modelu CAD pozwalają na szybką, wizualną ocenę, jak bardzo rzeczywista powierzchnia badanego obiektu różni się od kształtu nominalnego. Wskazują one przy tym obszary, w których odchyłki powierzchni są największe. W



Rys. 12. Mapa rozkładu odchyłek powierzchni rzeczywistej od nominalnej dla głowicy urabiającej objętej pomiarem
 Fig. 12. Distribution map of deviations of actual surface from nominal surface for cutter head subject to measurement

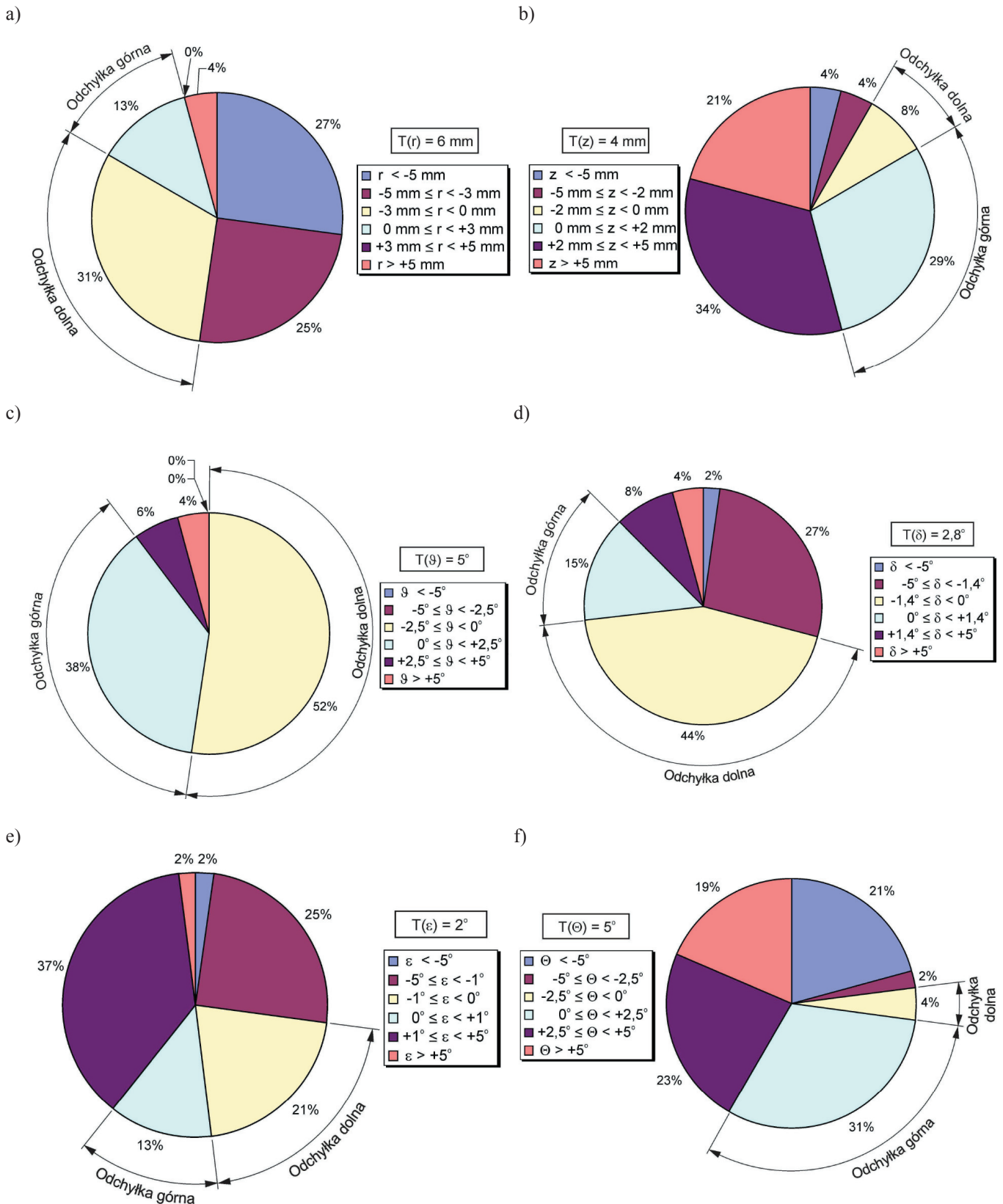
rozpatrywanym zadaniu metrologicznym interesujące są jednak wyłącznie odchyłki powierzchni uchwytów nożowych, będące miarą dokładności ich ustawienia na pobocznicy głowicy urabiającej. Pokazana na rysunku 12 mapa obejmuje tymczasem powierzchnię całego badanego obiektu, w efekcie czego odchyłki maksymalne nie muszą dotyczyć uchwytów nożowych, lecz występować w innych obszarach powierzchni głowicy urabiającej – pobocznicy oraz spoin łączących poszczególne jej elementy. Z punktu widzenia skuteczności urabiania powierzchni czoła przodku największe znaczenie ma prawidłowe rozmieszczenie uchwytów nożowych. Dlatego kontrola geometrii głowicy urabiającej koncentrować się powinna na wyznaczeniu na drodze pomiarów, dla każdego uchwytu nożowego, wartości parametrów stereometrycznych charakteryzujących ich rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni (sposób wymiarowania układu noży opisany został wcześniej w niniejszej pracy).

Korzystając z modelu matematycznego pomiaru parametrów stereometrycznych, dla każdego uchwytu nożowego wyznaczono estymaty poszukiwanych sześciu wielkości oraz odpowiadające im niepewności pomiaru. W tym celu, w programie GOM Inspekt określony został zbiór wartości parametrów charakteryzujących położenie i orientację przestrzenną elementów geometrycznych reprezentujących charakterystyczne powierzchnie uchwytów nożowych. Wartości te przetransformowano następnie na wielkości poszukiwane z wykorzystaniem funkcji tworzących matematyczny model pomiaru. Na tej podstawie wyznaczono dalej wartości rzeczywistych odchyłek wykonawczych, porównując wyniki pomiaru z wartościami określonymi w dokumentacji technicznej badanej głowicy urabiającej. Skonfrontowane one zostały następnie z wartościami dopuszczalnymi odchyłek, determinującymi pola tolerancji poszczególnych parametrów.

Odchyłki wykonawcze niektórych mierzonych parametrów cechują się dużym rozrzutem (tab. 2). Dotyczy to zwłaszcza trzech parametrów: współrzędnej r i z oraz kąta Θ . W przypadku pierwszych dwóch z wymienionych wielkości

duże wartości odchyłek odnotowano dla czterech uchwytów nożowych rozmieszczonych najbliżej powierzchni czołowej głowicy. Duże wartości odchyłek kąta wychylenia uchwytu nożowego Θ odnoszą się również do wymienionych wyżej uchwytów nożowych oraz dodatkowo – do uchwytów nożowych rozmieszczonych w okolicy podstawy głowicy (od strony reduktora). Efekt ten wynika ze sposobu ukształtowania powierzchni zewnętrznej pobocznicy głowicy urabiającej, co opisano przy okazji analizy mapy odchyłek powierzchni badanego obiektu. Na rysunku 13 pokazano rozkłady wartości odchyłek wykonawczych poszczególnych parametrów stereometrycznych. Wartości parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej, zawarte w dokumentacji technicznej, są wymiarami nietolerowanymi, w pracy [2] ustalono dopuszczalne tolerancje tych parametrów, określone przez odchyłki: górną i dolną. Oparte to zostało na analizie wrażliwości procesu urabiania na zmiany rozmieszczenia i ustawienia uchwytów nożowych spowodowane na przykład błędami wykonawczymi. Zakresy zmienności parametrów odpowiadające dopuszczalnym odchyłkom granicznym zaznaczono na rysunku 13.

W przypadku współrzędnej r (rys. 13a), aż 83% uchwytów nożowych posiadało odchyłki o wartości ujemnej. W blisko 70% przypadków odchyłki te mieściły się w przedziale ± 5 mm. Tylko dla 44% uchwytów nożowych wymiar ten mieścił się w polu tolerancji. Wartość średnia odchyłki współrzędnej r wyznaczona dla wszystkich uchwytów nożowych wyniosła w rozpatrywanym przypadku $-2,1$ mm, zaś odchylenie standardowe było równe $9,6$ mm. Odchyłki wykonawcze współrzędnej z (rys. 13b), dla zdecydowanej większości uchwytów nożowych, osiągały wartości dodatnie (84%). Dla 63% przypadków odchyłka tej współrzędnej mieściła się przy tym w przedziale od 0 do $+5$ mm. Dla prawie 40% z nich współrzędna z mieściła się w polu tolerancji. Wartość średnia wyniosła tu $+2,1$ mm, przy czym odchylenie standardowe było równe $6,3$ mm. W rozkładzie odchyłek wykonawczych trzeciej ze współrzędnych walcowych, opisujących położenie



Rys. 13. Rozkłady wartości odchyłek wykonawczych parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej objętej pomiarem na tle tolerancji tych parametrów

Fig. 13. Distribution of values of execution deviations of stereometric parameters of cutter head subject to measurement against allowable tolerances of such parameters

wierzchołków ostrzy noży związanych z poszczególnymi uchwytami nożowymi (kąt ϑ), dominują wartości mieszczące się w polu tolerancji ($\pm 2,5^\circ$) – rys. 13c. Wartości odchyłek tego kąta z wymienionego przedziału odnotowano bowiem dla 90% uchwytów nożowych, w które wyposażona jest badana

głowica urabiająca.

Jest to parametr cechujący się najmniejszym rozrzutem wartości (odchylenie standardowe wynosi $1,9^\circ$, przy wartości średniej równej $+0,6^\circ$ – tab.2).

Wartości odchyłek wykonawczych kąta ustawienia osi

Tab. 2. Zestawienie wartości podstawowych statystyk odchyłek wykonawczych wyznaczonych dla parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej objętej pomiarem

Tab. 2. Basic statistical values determined for distribution of stereometric parameters of cutter head subject to measurement

Parametr	Odchyłki wykonawcze			
	MIN	MAX	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
r [mm]	-36,4	+46,0	-2,1	9,6
z [mm]	-30,1	+20,5	+2,1	6,3
ϑ [st.]	-0,8	+8,4	+0,6	1,9
δ [st.]	-5,7	+9,0	-0,3	2,6
ε [st.]	-5,3	+5,8	+0,5	2,2
Θ [st.]	-21,8	+28,2	-0,2	8,8

noża δ zawierały się w granicach od $-5,7^\circ$ do $+9^\circ$ (tab. 2). W blisko 2/3 przypadków wartości odchyłek tego parametru mieściły się w polu tolerancji (rys. 13d). Przeważały przy tym odchyłki ujemne (73%). Odchyłki tego kąta cechowały się również relatywnie małym rozrzutem (odchylenie standardowe jest równe $2,6^\circ$, zaś wartość średnia kształtuje się tu na poziomie $-0,3^\circ$). Dla 1/3 uchwytów nożowych wartości odchyłek kąta odchylenia osi noża ε zawierały się w zakresie odpowiadającym dopuszczalnej jego tolerancji (rys. 13e). W 65% przypadków odchyłki tego kąta przyjmowały przy tym wartości z przedziału $\pm 2^\circ$. Dla blisko połowy uchwytów nożowych wartości rzeczywiste kąta ε były mniejsze od wartości nominalnych. Zakres zmienności wartości odchyłek wykonawczych tego kąta był także dość wąski (tab. 2). Średnia wartość odchyłki kąta ε wyniosła $+0,5^\circ$, zaś odchylenie standardowe było równe $2,2^\circ$.

Odchyłki wykonawcze kąta wychylenia uchwytu nożowego Θ od wartości nominalnych określonych w dokumentacji technicznej głowicy były dość duże. Wartości tych odchyłek zawierały się bowiem w przedziale od $-21,8^\circ$ do $+28,2^\circ$, przy wartości średniej i odchyleniu standardowym równym odpowiednio: $-0,2^\circ$ i $8,8^\circ$. Jedynie dla 35% uchwytów nożowych badanej głowicy urabiającej wartości tego kąta mieściły się w dopuszczalnym polu tolerancji (rys. 13f). W przypadku $\frac{3}{4}$ uchwytów nożowych odchyłki kąta Θ były dodatnie. Dla 60% uchwytów nożowych wartości rzeczywiste kąta Θ mieściły się w granicach $\pm 5^\circ$.

Podsumowanie i wnioski

Stereometria organów roboczych maszyn urabiających stosowanych w górnictwie, budownictwie inżynieryjnym oraz drogownictwie ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia skuteczności urabiania skał, w szczególności trudno urabialnych oraz innych materiałów o podobnych do tego rodzaju skał własnościach mechanicznych. Rozpatrywane tu organy robocze mają niejednokrotnie skomplikowaną stereometrię. Dlatego wykonanie ich z zachowaniem określonych na etapie projektowania wartości parametrów charakteryzujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni poszczególnych uchwytów nożowych, nawet w tolerancji odpowiadającej dokładności warsztatowej, jest trudne. Kumulacja błędów wykonawczych w poszczególnych etapach ich wytwarzania prowadzić może nawet do znacznych odchyłek wartości parametrów stereometrycznych, co skutkować będzie niezgodnym z dokumentacją usytuowaniem uchwytów nożowych oraz związanych z nimi noży. Skutkować to może w konsekwencji obniżeniem, w stosunku do przewidywanej na etapie projektowania, efektywności realizacji procesu urabiania, nie spełniając tym samym oczekiwań użytkownika. Dlatego istotnym elementem procesu wytwarzania jest kontrola jakości na każdym jego etapie.

W kontekście prowadzonych w niniejszej pracy rozważań odnosi się ona do kontroli geometrii rozpatrywanych organów roboczych, a więc oceny prawidłowości ustawienia uchwytów nożowych na etapie ich montażu oraz po ostatecznym ich przyspawaniu.

W pracy tej przedstawiono możliwości wykorzystania pomiarów stereometrii organów roboczych maszyn urabiających opartych na metodzie światła strukturalnego. Istotną zaletą tej metody jest możliwość automatyzacji procesu pomiarowego, zwłaszcza na etapie akwizycji danych pomiarowych (wykorzystanie stacji zrobotyzowanej), realizowanego z wystarczającą jak dla tego rodzaju pomiarów dokładnością.

Przeprowadzone pomiary stereometrii głowicy urabiającej kombajnu AM-50z na zrobotyzowanym stanowisku metrologicznym w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej umożliwiły ocenę dokładności jej wykonania. Inspekcja kształtu głowicy urabiającej, w trakcie której porównany on został z kształtem wzorcowym (modelem CAD) w środowisku GOM Inspect umożliwiła identyfikację obszarów o szczególnie dużych odchyłkach od kształtu nominalnego. W oparciu o opisany w pracy [4] model pomiaru wyznaczono estymaty parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej wraz z odpowiadającą im niepewnością rozszerzoną (stanowiącą wynik pomiaru). Na tej podstawie, w powiązaniu z danymi zawartymi w dokumentacji technicznej wyznaczono wartości odchyłek wykonawczych. Skonfrontowane one zostały z wartościami dopuszczalnymi wynikającymi z pola tolerancji tych wielkości.

Jak wskazują wyniki przeprowadzonych pomiarów niektóre uchwytów nożowe usytuowane są niezgodnie z dokumentacją techniczną głowicy, poza dopuszczalną tolerancją. Analizując rozkłady odchyłek wykonawczych poszczególnych parametrów stereometrycznych stwierdzono, iż udział wartości mieszczących się w polu tolerancji jest mocno zróżnicowany, gdyż waha się w granicach od 34% do 90%. Największą zgodność z dokumentacją osiągnięto przy tym dla kąta obwodowego ϑ . Zaobserwowane błędy wykonawcze wynikają w dużej mierze z konstrukcji zastosowanego do montażu (ustawiania) uchwytów nożowych przyrządu oraz technologii ich montażu. Błędy w rozmieszczeniu noży (współrzędne: r , z i ϑ) oraz ich ustawieniu (kąty: δ i ε) będą miały negatywny wpływ na przebieg procesu urabiania. Duże odchyłki wartości kąta wychylenia uchwytu nożowego Θ , jakie odnotowano dla niektórych uchwytów nożowych będą z kolei przyczyną niewłaściwego ich ustawienia względem powierzchni urabianej skały. Może to skutkować nadmiernym zużyciem się uchwytów nożowych (ścieraniem), co jest szczególnie niepożądane w przypadku zastosowania zraszania wewnętrznego strefy urabiania poprzez dysze wodne zabudowane w uchwytach nożowych.

Literatura

- [1] Cheluszka P.: *Zrobotyzowana technologia montażu uchwytów nożowych na organach roboczych maszyn urabiających*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa Nr 11(477)/2010, s. 11–17
- [2] Cheluszka P.: *Metrologia organów roboczych górniczych maszyn urabiających*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012
- [3] Cheluszka P.: *Computer-aided design of robotised technology for manufacturing working units of mining machines*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment (29)2015 Nr 1, s. 62–81
- [4] Cheluszka P., Kaźmierczak M.: *Pomiary stereometrii organów roboczych maszyn urabiających z wykorzystaniem techniki współrzędnościowej*. Przegląd Mechanicznym nr 12/2011, s. 28–37
- [5] Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P.: *Komputerowe wspomaganie doboru głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla określonych warunków górniczo – geologicznych*. 3. Szkoła Mechanizacji i Automatyzacji Górnictwa. Wisła, 26–28 kwiecień 2006 r., s.13–25
- [6] Karpiński M.: *Kombajny chodnikowe nie tylko dla górników*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Styczeń–Luty 2006, s. 17–18
- [7] Lasota J., Wach M., Basałyka J.: *Drążenie wyrobisk chodnikowych zespołem kombajnów w warunkach KGHM Polska Miedź S.A.* III Międzynarodowy Kongres Górnictwa Rud Miedzi. Lubin, 16–18 wrzesień 2015, s. 46–75
- [8] Nocoń M.: *Zastosowanie skanera światła strukturalnego do oceny dokładności wykonania głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego*. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Dr hab. inż. Piotra Cheluszki, prof.nzw. w Pol.Śl., Gliwice 2015
- [9] Speight H.E.: *Observations on drag tool excavation and the consequent performance of roadheaders in strong rock*. The AusIMM Proc. 302, 1997, No. 1, p. 17–32
- [10] Tiryaki B., Ayhan M., Hekimoglu O.Z.: *A New computer program for cutting head design of roadheaders and drum shearers*. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001, p. 655–662
- [11] Ziętkowski L., Młynarczyk J.: *Mechaniczne urabianie skał zwięzłych kombajnami w kopalniach KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.* Inżynieria Maszyn 19(2014) z. 2, s. 17–27
- [12] Instrukcja obsługi programu OPTOCAT 2013
- [13] Leksykon górniczy. Praca zbiorowa. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1989
- [14] Specyfikacja techniczna skanera smartSCAN 3D-HE
- [15] System pomocy programu GOM Inspekt V8
- [16] 3D Measurements with Robots: OptocatRobotXML – dokumentacja techniczna oprogramowania Optocat. Breuckmann GmbH, 2011
- [17] <http://famur.com.pl>
- [18] <http://c1cleantechnicacom.wpengine.netdna-cdn.com/files/2012/05/SOLWARA-img4.jpg>
- [19] <http://www.nautilusminerals.com>
- [20] <http://www.wirtgen.de>

