

Pomiar stereometrii organów roboczych maszyn urabiających metodą bezstykową

Piotr Cheluszka

1. Wprowadzenie

Maszyny urabiające stanowią jedną z podstawowych grup maszyn roboczych wchodzących w skład kompleksów zmechanizowanych, przeznaczonych do drążenia wyrobisk oraz wybierania kopaliny użytecznej w zakładach górniczych. W górnictwie węgla kamiennego do urabiania skał stosowane są powszechnie kombajny ścianowe i chodnikowe. Proces urabiania realizowany jest w tym przypadku na zasadzie skrawania za pomocą organów roboczych – organów urabiających (kombajny ścianowe) oraz głowic urabiających (kombajny chodnikowe), wyposażonych w noże osadzone w uchwytach nożowych przyspawanych do ich pobocznicy. Zakres wykorzystania maszyn urabiających na zasadzie skrawania wykracza przy tym poza sferę górnictwa podziemnego surowców mineralnych. Stosowane są one bowiem również w robotach inżynierskich – do drążenia tuneli komunikacyjnych (dla autostrad, linii kolejowych czy linii metra), przy budowie różnego rodzaju podziemnych obiektów inżynierskich na terenach silnie zurbanizowanych (na przykład parkingów), jak również w budownictwie hydrotechnicznym (do drążenia sztolni dla elektrowni wodnych, kanałów i kolektorów). Maszyny tego rodzaju stosowane są również w górnictwie odkrywkowym niektórych minerałów, takich jak: węgiel kamienny, gips, wapień, łupki roponośne czy piaskowiec. W budownictwie i drogownictwie wykorzystywane są z kolei frezarki urabiające asfalt lub beton również na zasadzie skrawania. Osprzęt roboczy, na przykład koparek, wyposażony może być również w organy robocze o konstrukcji podobnej do kombajnów górniczych.

W procesie wytwarzania elementów maszyn ważną rolę spełnia kontrola jakości. W przypadku organów roboczych maszyn urabiających jednym z elementów tego procesu jest pomiar ich stereometrii, umożliwiający kontrolę zgodności rozmieszczenia i ustawienia uchwytów nożowych z dokumentacją techniczną w kolejnych etapach wytwarzania. Umożliwia on ocenę prawidłowości przebiegu montażu uchwytów nożowych na pobocznicy organu roboczego, co ma istotne znaczenie ze względu na skuteczność działania maszyn urabiających. Błędy powstałe na którymkolwiek z etapów wytwarzania skutkować bowiem będą nieprawidłowym działaniem organów roboczych, co w rezultacie prowadzi będzie do niskiej efektywności eksploatacyjnej maszyny urabiającej, przeciążenia dynamicznego jej napędów

Streszczenie: W eksploatacji złóż w górnictwie węgla kamiennego, soli, wapienia oraz innych minerałów stosowane są maszyny urabiające na zasadzie skrawania. Stereometria organów roboczych jest istotnym czynnikiem decydującym o skuteczności urabiania oraz efektywności eksploatacyjnej tych maszyn. Z tego względu już na etapie projektowania określana jest ona dla konkretnych warunków eksploatacyjnych. Istotnym elementem procesu wytwarzania organów roboczych maszyn urabiających jest kontrola poprawności rozmieszczenia uchwytów na ich pobocznicy. Pomiary stereometrii metodami stykowymi są tu jednak trudne i cechują się dużą czaso- i pracochłonnością. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania metod bezstykowych dla potrzeb pomiaru wartości parametrów stereometrycznych organów roboczych maszyn urabiających. Opracowany matematyczny model pomiaru oraz procedura pomiarowa przetestowane zostały w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa, na utworzonym stanowisku metrologicznym, w trakcie pomiaru stereometrii głowicy urabiającej wysięgnikowego kombajnu chodnikowego. Wyniki tych pomiarów zaprezentowane zostały w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: maszyna urabiająca, organ roboczy, parametry stereometryczne, pomiary, metody bezstykowe

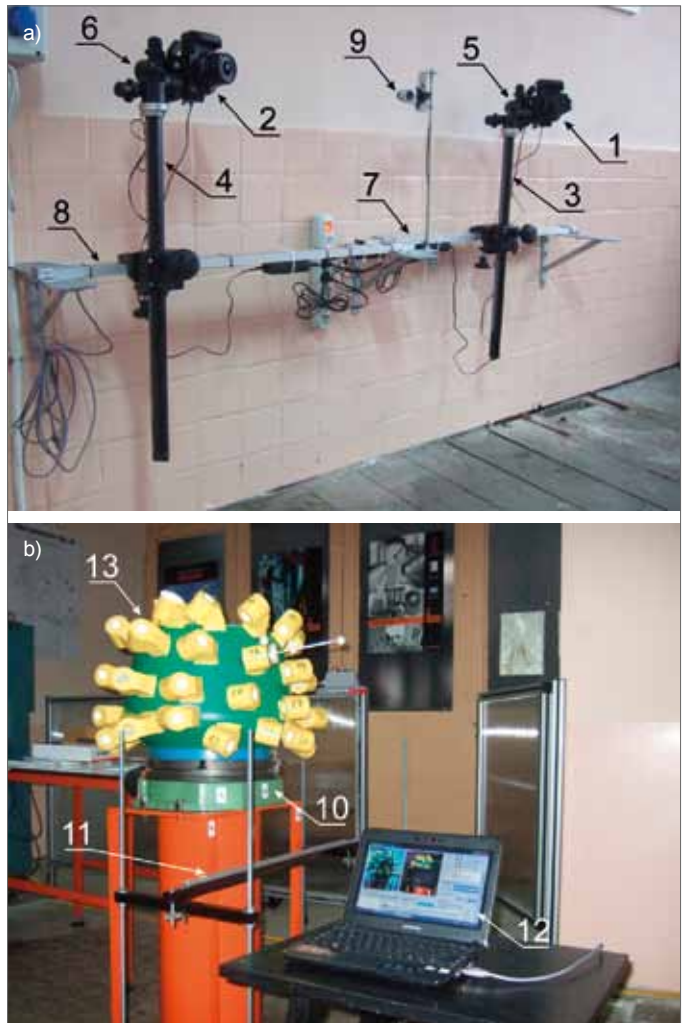
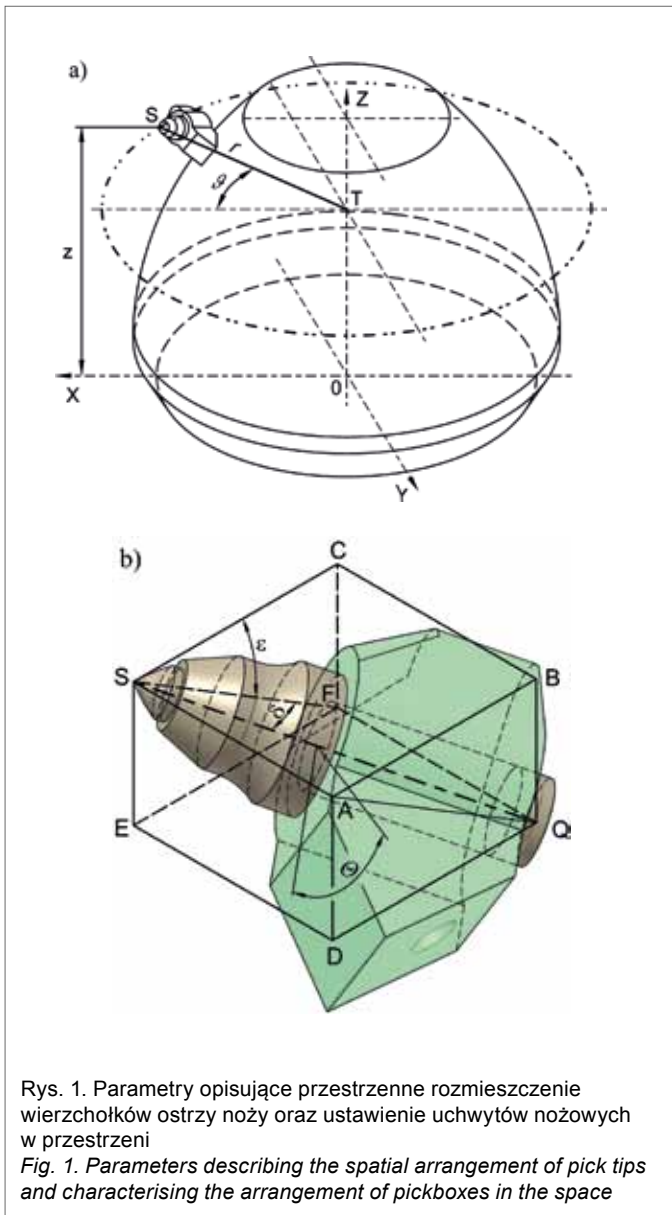
MEASUREMENT OF THE STEREOLOGY OF MINING MACHINES WORKING UNITS WITH THE CONTACTLESS METHOD

Abstract: *Cutting mining machines are used for extracting deposits in the hard coal, salt and lime mining industry and in other sectors. The stereometry of such machines' working units is an essential factor decisive for such machines' cutting efficiency and operational performance and for this reason this parameter is defined for specific operational conditions at the design stage. Therefore, an important stage of the manufacturing process of mining machines working units is to control the correct positioning of pick holders at their side surface. However, measurement with contact methods is difficult and time and labour intensive. The article discusses the potential uses of contactless methods for measuring the stereometry parameters values of mining machines working units. The mathematical measurement model and the measuring procedure established were tested at the laboratory of the Institute of Mining Mechanisation at a measuring stand when measuring the stereometry of a roadheader's cutting head. This article also presents the results of the measurements.*

Key words: *mining machine, working unit, stereometric parameters, measurements, contactless methods.*

i drgań, nadmiernego zużycia noży oraz energii, czy wreszcie zwiększonej awaryjności. Dotyczy to zwłaszcza maszyn stosowanych do drążenia wyrobisk korytarzowych i tuneli w skałach twardych (kombajnów chodnikowych).

Złożona stereometria organów roboczych górniczych maszyn urabiających, a także duże zróżnicowanie w zakresie ich wymiarów gabarytowych, liczby uchwytów nożowych (wahającej się przeciętnie od 40 do 60, a dochodzącej nawet do 90) oraz sposobu rozmieszczenia i ustawienia uchwytów nożowych na ich pobocznicy sprawiają, że brak jest dotąd efektywnej i jednocześnie prostej w realizacji metody ich pomiaru. Rozmieszczenie oraz ustawienie w przestrzeni poszczególnych uchwytów



nożowych wymaga określenia, dla każdego uchwytu nożowego, wartości sześciu parametrów [5]: współrzędnych walcowych wierzchołka ostrza noża związanego z rozpatrywanym uchwytem nożowym (r ; z ; ϑ) – rys. 1 a – oraz trzech kątów determinujących przestrzenne ustawienie osi tego noża oraz płaszczyzny symetrii uchwytu nożowego (δ , ε , Θ) – rys. 1 b. Dla potrzeb pomiarowych wykorzystywane są dotąd różnego rodzaju przyrządy oraz stanowiska pomiarowe obsługiwane ręcznie, wyposażone w liniały oraz kątomierze, a także konwencjonalne maszyny współrzędnościowe lub ramiona pomiarowe. Umożliwiają one pomiar stereometrii organów roboczych maszyn urabiających wyłącznie metodami stykowymi bezpośrednimi lub pośrednimi (maszyny współrzędnościowe), co ze względu na niejednokrotnie dużą liczbę uchwytów nożowych przyspawanych do poboczniczy sprawia, iż pomiar z wykorzystaniem tego rodzaju przyrządów cechuje się dużą czaso- i pracochłonnością. Stosowane rozwiązania cechują się przy tym w wielu wypadkach skomplikowaną konstrukcją oraz obsługą, szczególnie w zakresie pomiaru ustawienia przestrzennego uchwytów nożowych.

Wymienione przyczyny sprawiły, iż podjęte zostały prace w celu określenia przydatności pośrednich, bezstykowych metod pomiarowych oraz opracowania metodyki pomiaru dla po-

trzeb wyznaczenia wartości parametrów stereometrycznych organów roboczych maszyn urabiających. Opracowany został matematyczny model pomiaru [1, 2], jak również przeprowadzono badania komputerowe, między innymi w celu określenia niepewności pomiaru [3]. Badania teoretyczne wykazały przy tym przydatność metod bezstykowych dla potrzeb pomiaru stereometrii organów roboczych maszyn urabiających, a także pozwoliły na sformułowanie wymagań metrologicznych dla sprzętu pomiarowego oraz wymagań w zakresie geometrii stanowiska pomiarowego (sposobu rozmieszczenia elementów układu pomiarowego) [4]. Przyjęto, że pomiar realizowany będzie metodą fotogrametryczną, w oparciu o komputerową analizę zdjęć wykonanych z dwóch miejsc stanowiska pomiarowego (stereogramów).

2. Charakterystyka stanowiska pomiarowego

Dla potrzeb przetestowania procedury pomiarowej w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa utworzone zostało stanowisko do pomiaru stereometrii organów roboczych maszyn urabiających. Stanowisko to wyposażone zostało (rys. 2) w dwie cyfrowe kamery Canon EOS 550D o rozdzielczości

17,9 MPx (3456×5184 pikseli) – lewą (1) i prawą (2) – sprzężone sygnałowo z komputerem PC (12). Kamery fotograficzne zamocowane zostały do pionowych kolumn Manfrotto 131 TC (3) i (4) za pośrednictwem głowic fotograficznych Manfrotto 405 PRO DIGITAL (5) i (6). Głowice te, o trzech stopniach swobody, posiadają precyzyjne mechanizmy umożliwiające ustawienie osi optycznej kamery w żądanym kierunku. Kolumny (3) i (4) wyposażone są zaś w mechanizm zębatkowy umożliwiający regulację ustawienia kamery w kierunku pionowym.

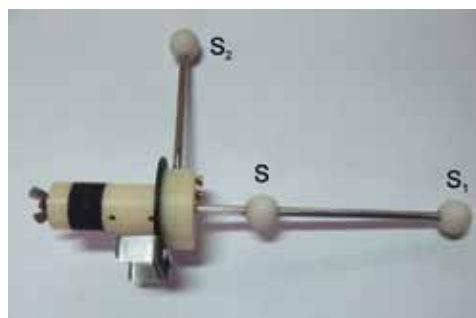
Kolumny fotograficzne z zamocowanymi do nich aparatami cyfrowymi przytwierdzone są do wsporników (7) i (8) w odległości, w stosunku do osi podłużnej stanowiska pomiarowego, wynikającej z przyjętej długości bazy stereogramu. W części centralnej tego wspornika zainstalowana została dodatkowa kamera (9) umożliwiająca bieżący podgląd sceny w czasie realizacji pomiarów. Możliwe jest dzięki temu takie ustawienie tarczy pozycjonera (10), aby uchwyt nożowy, dla którego realizowany jest pomiar, znajdował się w polu widzenia obu kamer pomiarowych.

Głowica urabiająca (13) na czas pomiarów posadowiona jest na tarczy pozycjonera (10) o napędzie elektrycznym. Pozycjoner ten umożliwia zmianę ustawienia głowicy urabiającej w trakcie pomiaru, tak aby kolejne uchwyty nożowe znajdowały się w przestrzeni pomiarowej stanowiska (w polu widzenia obu kamer). Wspornik (11) służy do zamocowania ekranu kalibracyjnego w trakcie kalibracji stanowiska pomiarowego.

Obiektywy kamer cyfrowych o stałej ogniskowej wynoszącej 35 mm ustawione zostały na odległość przedmiotową wynoszącą 1,5 m (przy wyłączonej funkcji autofocus), co daje głębię ostrości w zakresie od 0,82 m do nieskończoności. Zdjęcia realizowane były przy tym w trybie z preselekcją przysłony. W celu uzyskania odpowiedniej głębi ostrości ustawiono przy tym największą wartość przysłony ($f/22$).

Zarządzanie procesem pomiarowym oraz przetwarzanie obrazów rastrowych rejestrowanych przez kamery cyfrowe realizowane jest z wykorzystaniem komputera (12), z którym kamery oraz sterownik pozycjonera połączone są poprzez porty komunikacyjne magistrali szeregowej USB. Sterowanie pracą kamer, definiowanie parametrów ekspozycji, kalibracja stanowiska metrologicznego, akwizycja i archiwizacja danych pomiarowych (zdjęć pomiarowych) oraz sterowanie pozycjonerem realizowane są z wykorzystaniem opracowanego w tym celu oprogramowania komputerowego. Zaimplementowane w nim zostały funkcje z biblioteki Canon EOS Digital SDK EDSK 2.8, udostępnionej przez producenta zastosowanych aparatów cyfrowych.

Określenie wartości rozważanych sześciu parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni poszczególnych uchwytów nożowych realizowane jest w oparciu o pomiar współrzędnych przestrzennych trzech hipotetycznych punktów układu nóż – uchwyt nożowy [1]. Dla potrzeb identyfikacji tych punktów opracowany został specjalny przyrząd pomiarowy (rys. 3), który na czas pomiaru osadzany jest w gnieździe uchwytu nożowego. Przyrząd ten składa się z walcowego trzpienia o średnicy dostosowanej do średnicy gniazda w uchwycie nożowym, do którego przymocowane są dwa wzajemnie prostopadłe pręty. Na prętach tych osadzone są trzy kule (markery) o średnicy ~22 mm, wykonane z tworzywa sztucznego (DELFIN G III). Kule te reprezentują punkty pomiarowe zlokalizowane na osi gniazda uchwytu nożowego (punkt: S – wierzchołek ostrza noża związanego z rozpatrywanym uchwy-



Rys. 3. Przyrząd pomiarowy służący do identyfikacji punktów pomiarowych uchwytu nożowego
Fig. 3. The measuring instrument designed for identification of measuring points of pick box

tem i S_1 oraz punkt S_2 – wyznaczający z nimi płaszczyznę symetrii uchwytu nożowego).

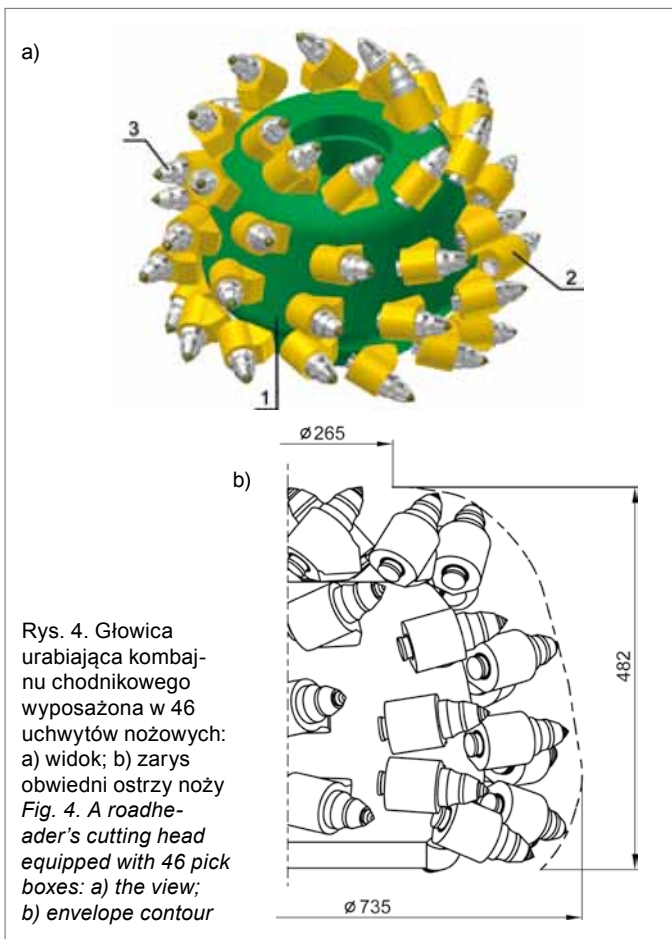
Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzona została kalibracja stanowiska z wykorzystaniem płaskiego pola testowego (ekranu kalibracyjnego). Miała ona na celu wyznaczenie wartości parametrów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej kamer oraz określenie postaci funkcji przekształcenia obrazów rastrowych do układu tłowego, w którym wartości poszczególnych współrzędnych określone są w jednostkach długości (tutaj w milimetrach).

3. Pomiar parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego

Przydatność zaproponowanej metody oraz opracowanego algorytmu pomiaru zbadano w trakcie pomiaru parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej wysięgnikowego kombajnu chodnikowego. Głowica urabiająca (rys. 4), dla której zrealizowano pomiary, wyposażona jest w 46 uchwytów nożowych (2) przyspawanych do jej pobocznic (1). W uchwytach tych osadza się noże skrawające (3). Średnica maksymalna mierzona po obwodni ostrzy noży wynosi $d_{max} = 735$ mm, zaś jej średnica minimalna jest równa $d_{min} = 265$ mm. Długość głowicy (mierzona wzdłuż jej osi obrotu po wierzchołkach ostrzy noży) wynosi przy tym $L = 482$ mm. Dla potrzeb przetestowania procedury pomiarowej dokonano pomiaru wartości parametrów stereometrycznych dla 28 uchwytów nożowych. Pomiar obejmował uchwyty rozmieszczone wzdłuż sześciu spośród dziesięciu linii śrubowych o małym kącie zwicia, przy czym 10 z nich zlokalizowanych było na dwóch liniach śrubowych przesuniętych względem siebie o 180° . W efekcie mierzono wartości parametrów stereometrycznych uchwytów nożowych położonych w różnych miejscach pobocznic głowicy urabiającej, w całym zakresie zmienności współrzędnych: r i z oraz cechujących się różnym ustawieniem przestrzennym.

W trakcie rejestracji zdjęć pomiarowych (rys. 5) do gniazda mierzzonego uchwytu nożowego włożony był przyrząd pomiarowy odwzorowujący położenie charakterystycznych punktów pomiarowych uchwytu nożowego (rys. 3). W celu zapewnienia możliwie dużego kontrastu markerów jako tła użyto matowego, czarnego kartonu.

W oparciu o algorytmy identyfikacji na zdjęciach pomiarowych położenia geometrycznych środków markerów oraz zaimplementowany matematyczny model pomiaru wyznaczone były, dla poszczególnych uchwytów nożowych, wartości współ-

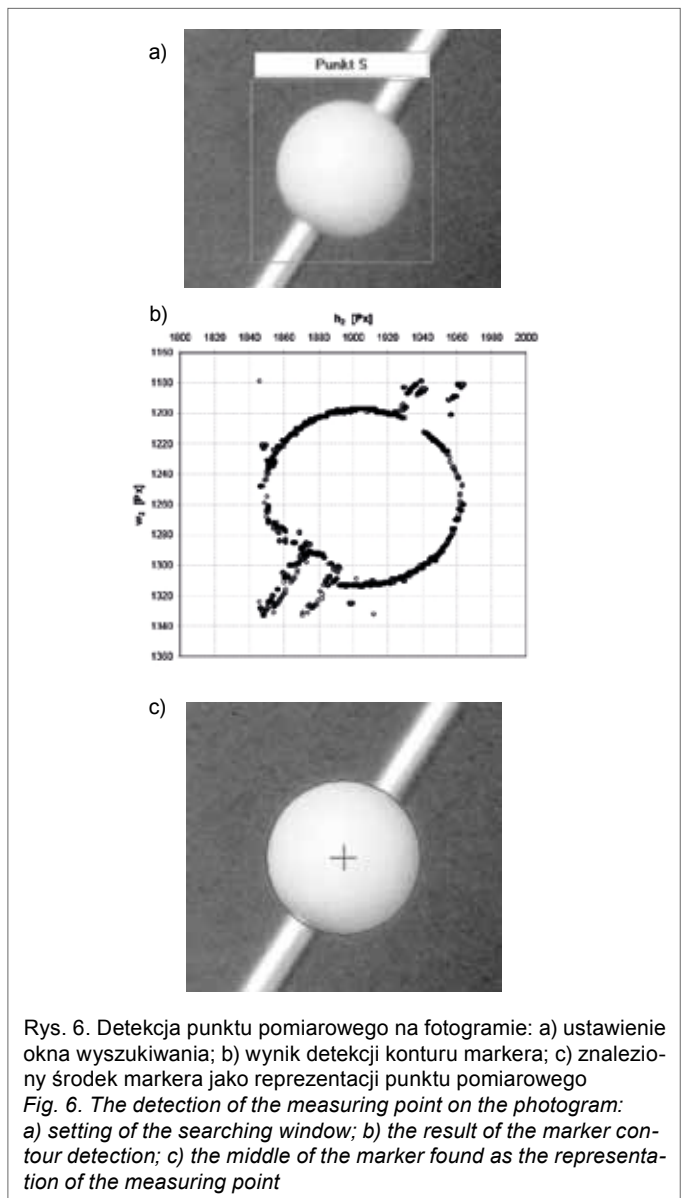


Rys. 4. Głowica urabiająca kombajnu chodnikowego wyposażona w 46 uchwytów nożowych: a) widok; b) zarys obwiedni ostrzy noży
Fig. 4. A roadheader's cutting head equipped with 46 pick boxes: a) the view; b) envelope contour



Rys. 5. Zdjęcia pomiarowe wykonane podczas pomiaru parametrów stereometrycznych uchwytu nożowego
Fig. 5. The photos taken during measurement of the pick box stereometric parameters

rzędnych przestrzennych geometrycznych środków markerów w kartezjańskim układzie odniesienia stanowiska pomiarowego (punktów: S , S_1 i S_2). Identyfikacja punktu pomiarowego, jako geometrycznego środka markera będącego jego fizyczną reprezentacją, należy do zagadnień z zakresu rozpoznawania i analizy obrazów. Jest to dziedzina nauki intensywnie rozwijana, między innymi dla potrzeb automatyzacji różnego rodzaju procesów w oparciu o „komputerowe widzenie”. W literaturze znaleźć można wiele prac dotyczących problematyki automatycznej detekcji obiektów na zdjęciach cyfrowych – na przykład w [6, 7, 13, 14]. Określenie położenia punktów pomiarowych na obrazach oparto na analizie jasności pikseli, z wykorzysta-



Rys. 6. Detekcja punktu pomiarowego na fotografii: a) ustawienie okna wyszukiwania; b) wynik detekcji konturu markera; c) znaleziony środek markera jako reprezentacji punktu pomiarowego
Fig. 6. The detection of the measuring point on the photograph: a) setting of the searching window; b) the result of the marker contour detection; c) the middle of the marker found as the representation of the measuring point

niem detektorów gradientowych, których działanie polega na znajdowaniu przejść przez zero drugiej pochodnej funkcji obrazowej [10]. W rozważanym zadaniu pomiarowym zastosowano w tym celu operator Laplace'a, definiowany jako suma pochodnych cząstkowych drugiego rzędu względem każdej ze zmiennych [12]. Efektem działania tego operatora jest zbiór punktów konturu markera, na podstawie którego wyznaczane było położenie jego geometrycznego środka w płaszczyźnie obrazów zarejestrowanych przez obie kamery (rys. 6).

Na podstawie współrzędnych przestrzennych geometrycznych środków markerów odwzorowujących, dla danego uchwytu nożowego, położenie rozpatrywanych punktów pomiarowych obliczane były następnie wartości parametrów stereometrycznych determinujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni uchwytów nożowych. Wraz z niepewnością rozszerzoną, przy założonym poziomie ufności, tworzą one wynik pomiaru.

4. Walidacja opracowanej metody pomiarowej

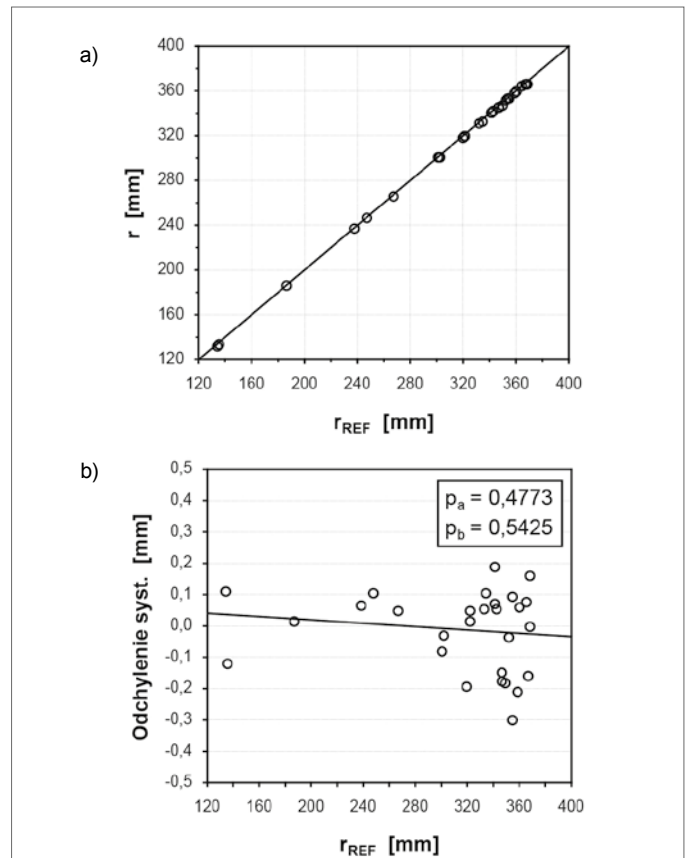
Walidacja jest potwierdzeniem, przez przedstawienie obiektywnego dowodu, że zostały spełnione wymagania dotyczące konkretnego użycia lub zastosowania. Jest ona zatem pro-

cesem potwierdzającym, że procedura analityczna użyta do wykonania konkretnego wyspecyfikowanego testu jest odpowiednia do zamierzonego celu [11]. Walidacja przeprowadzona została w oparciu o analizę porównawczą wyników uzyskanych na utworzonym stanowisku pomiarowym z wynikami pomiarów inną metodą, cechującą się znacznie niższą niepewnością pomiarową. Referencyjne wartości parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej, dla której realizowane były pomiary testowe, wyznaczone zostały przy tym z wykorzystaniem współrzędnościowej maszyny pomiarowej Zeiss AC-CURA 7, wyposażonej w sztywną aktywną głowicę skanującą VAST XT.

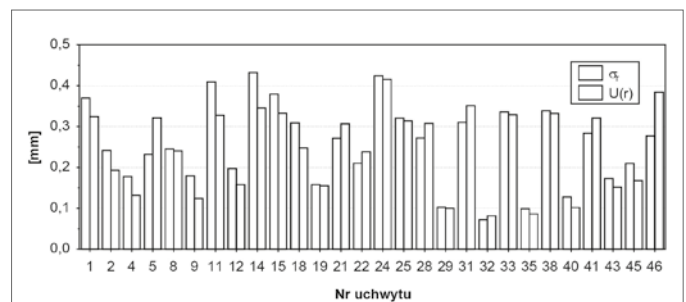
Proces walidacji metod pomiarowych obejmuje analizę pewnych istotnych cech charakterystycznych (właściwości metrologicznych) wyposażenia pomiarowego. Zaliczyć do nich należy przede wszystkim [8]: liniowość, poprawność oraz precyzję. Walidację rozpatrywanej metody pomiarowej oparto na opracowaniu statystycznym wyników pomiaru głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego zrealizowanego na utworzonym stanowisku pomiarowym. Dokonane to zostało z wykorzystaniem narzędzi dostępnych w środowisku Statistica 10 PL.

Analiza liniowości dokonana została w wyniku porównania wartości średnich serii pomiarów parametrów stereometrycznych głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego, zrealizowanych z wykorzystaniem ocenianej metody pomiarowej z wartościami odniesienia (referencyjnymi) – uzyskanymi w trakcie pomiaru tej samej głowicy urabiającej na maszynie współrzędnościowej. Wizualna ocena relacji pomiędzy zmierzonymi na testowanym stanowisku pomiarowym wartościami poszczególnych parametrów stereometrycznych oraz wartościami referencyjnymi wskazuje na liniowy charakter tych zależności (rys. 7 a). Wskaźnikiem jakości dopasowania wartości mierzonych parametrów do wartości referencyjnych jest odchylenie systematyczne, stanowiące różnicę pomiędzy wartością średnią z serii pomiarów danego parametru oraz jego wartością odniesienia (rys. 7 b). Zakres zmienności odchylenia systematycznego jest miarą wielkości potencjalnego błędu systematycznego towarzyszącego realizacji procedury pomiarowej. Warunkiem spełnienia założenia o liniowości metody pomiarowej jest zerowa wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji dla funkcji wiążącej odchylenie systematyczne z wartościami referencyjnymi [9]. Na rysunku 7 b przedstawiono graficzną interpretację tej zależności dla jednego z parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni uchwytów nożowych. Jak widać, prosta regresji w niewielkim stopniu jest odchylna od zera. Współczynniki kierunkowe oraz wyrazy wolne w równaniach opisujących te proste, dla wszystkich sześciu mierzonych parametrów, są istotnie różne od zera (prawdopodobieństwo testowe dla współczynników kierunkowych (p_a) oraz wyrazów wolnych (p_b) jest znacznie większe od przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$).

Pomimo braku istotności odchylenia systematycznego w sensie statystycznym, dla wszystkich parametrów stereometrycznych widoczny jest pewien rozrzut wartości średnich wyników pomiarów. Największy rozrzut wartości odchylenia systematycznego odnotowano dla współrzędnej r ($-0,3 \div +0,2$ mm) oraz kąta wychylenia uchwytu nożowego Θ ($-0,2 \div +0,3^\circ$). Najmniejszą zmiennością cechowały się natomiast wartości odchylenia systematycznego w przypadku współrzędnej z oraz kąta odchylenia osi noża ε . Wartości tego parametru zawierały się bowiem w granicach $\pm 0,1$ mm – w pierwszym przypadku – oraz $\pm 0,1^\circ$ –



Rys. 7. Przykładowa charakterystyka metrologiczna układu pomiarowego (a) oraz odchylenie systematyczne dla pomiaru odległości wierzchołków ostrzy noży od osi obrotu organu roboczego (b)
Fig. 7. Exemplary metrological characteristic of the measuring system (a) and the systematic deviation for the measurement of the distance between the tip of picks and the axis of rotation of the working unit (b)



Rys. 8. Odchylenie standardowe (σ) oraz niepewność rozszerzona (U) pomiaru odległości wierzchołków ostrzy noży od osi obrotu organu roboczego (dla $P = 0,95$)
Figure 8. Standard deviation (σ) and the expanded uncertainty (U) of measurement of the distance between tip of picks and the axis of rotation of the working unit (for $P = 0,95$)

w drugim przypadku. Zmienność wartości średnich z pomiarów poszczególnych parametrów stereometrycznych względem wartości odniesienia świadczyć może o niepełnym wyeliminowaniu błędów systematycznych w wyniku zastosowania poprawek wprowadzanych na etapie komputerowego przetwarzania wyników realizowanych pomiarów pośrednich.

Ocena poprawności (dokładności) opracowanej metody pomiaru parametrów stereometrycznych organów roboczych gór-

niczych maszyn urabiających sprowadza się do określenia zgodności średniej z pomiarów każdego parametru z wartością odniesienia uzyskaną metodą referencyjną. Dla każdego objętego pomiarem uchwytu nożowego głowicy urabiającej wykonany został w tym celu test *t*–Studenta. Dla wszystkich sześciu parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni uchwytów nożowych uzyskane wartości bezwzględne statystyki testowej *t* są mniejsze od wartości krytycznej. W przypadku współrzędnej *r* wartość prawdopodobieństwa testowego zawiera się w granicach od 0,0743 do 0,9671. Jest ono zatem większe od przyjętego poziomu istotności ($\alpha = 0,05$). Wartości prawdopodobieństwa testowego dla pozostałych dwóch współrzędnych opisujących położenie wierzchołka ostrza noży przypisanych poszczególnym uchwytom nożowym zmieniają się natomiast w zakresie od 0,0533 do 0,9139 – dla współrzędnej *z* – oraz od 0,0544 do 0,8954 – w przypadku kąta obwodowego ϑ . Podobnie uzyskane z pomiaru wartości średnie kątów charakteryzujących ustawienie w przestrzeni poszczególnych uchwytów nożowych różnią się nieistotnie od wartości odniesienia (referencyjnych). Minimalne wartości prawdopodobieństwa testowego były bowiem równe odpowiednio: 0,0572 – w przypadku kąta ustawienia osi noża δ , 0,0899 – dla kąta odchylenia osi noża ε oraz 0,051 – w przypadku dla kąta wychylenia uchwytu nożowego Θ . Są one więc nieznacznie większe od założonej wartości krytycznej 0,05.

Precyzja wiąże się ze zmiennością wartości mierzonego parametru w trakcie realizacji serii pomiarów. Jako miarę rozproszenia wyników pomiaru charakteryzującą powtarzalność pomiarów wykorzystano odchylenie standardowe, stanowiące podstawę oszacowania niepewności realizacji tego procesu. Przykładowo: dla pomiaru odległości wierzchołków ostrzy noży od osi obrotu organu roboczego maszyny urabiającej (współrzędna *r*) niepewność rozszerzona (dla przedziału ufności $P = 0,95$) oszacowana na podstawie rozrzutu wyników pomiaru $U(r)$ zawierała się w granicach od 0,08 (uchwyt nr 32) do 0,4 mm (uchwyt nr 24) – rys. 8.

5. Zakończenie

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań eksperymentalnych wykazały przydatność opracowanej procedury pomiarowej oraz zastosowanego matematycznego modelu pomiaru dla potrzeb pomiaru stereometrii organów roboczych górniczych maszyn urabiających. Zastosowanie bezstykowej metody pomiaru przyczyniło się do znacznego uproszczenia konstrukcji stanowiska pomiarowego oraz wydatnej redukcji kosztów dzięki rezygnacji z niejednokrotnie skomplikowanych mechanicznie i drogich przyrządów pomiarowych. Bezstykowy sposób pomiaru parametrów charakteryzujących rozmieszczenie i przestrzenne ustawienie uchwytów nożowych przyczynia się również do uproszczenia procedury pomiarowej oraz skrócenia czasu pomiaru w wyniku rezygnacji z fizycznego kontaktu przyrządów pomiarowych z mierzonym obiektem. Użytkowana dokładność pomiaru jest zadowalająca. Odpowiada ona przy tym wymaganiom wynikającym ze specyfikacji metrologicznej dla pomiarów stereometrii organów roboczych górniczych maszyn urabiających. Opracowane rozwiązanie cechuje się więc korzystną relacją jakości pomiarów do ceny wyposażenia metrologicznego. Układ pomiarowy może być bowiem oparty na wykorzystaniu dostępnych powszechnie na rynku i niedrogich, niemetrycznych kamer (aparatów) cyfrowych wy-

sokiej rozdzielczości, cechujących się dobrą jakością wykonania układu optycznego i mechaniki. Rozwiązanie to może być z powodzeniem wykorzystane w pomiarach laboratoryjnych i przemysłowych organów roboczych maszyn urabiających stosowanych w górnictwie i nie tylko.

Literatura

- [1] CHELUSZKA P.: *A method of measuring the stereometric parameters of working units of mining machines equipped with conical picks*. Archives of Mining Sciences 55(2010), nr 4, p. 747–760.
- [2] CHELUSZKA P.: *Zastosowanie metod bezstykowych w pomiarach wielkości geometrycznych maszyn górniczych*. Przegląd Górniczy 12/2010, s. 9–13.
- [3] CHELUSZKA P.: *Assessing the measurement uncertainty for the stereometry of mining machines working units used in the mining industry*. Archives of Mining Sciences 56(2011), nr 1, s. 3–20.
- [4] CHELUSZKA P.: *Computer setting of the technical parameters of a station for measuring stereometry of mining machines working units*. [w:] Mikołajczyk T. (red.) *Komputerowe wspomaganie nauki i techniki CAX'2010*. Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2011, s. 15–20.
- [5] DOLIPSKI M., CHELUSZKA P.: *Dynamic model of a roadheader's cutting system which incorporates transverse cutter heads*. Archives of Mining Sciences 1999, t. 44, nr 1, p. 113–146.
- [6] FREJLICHOWSKI D.: *Segmentacja obrazu na potrzeby automatycznej identyfikacji zawodników na podstawie cech ich strojów podczas telewizyjnej transmisji sportowej*. Metody Informatyki Stosowanej, 2/2007, s. 45–54.
- [7] GRZEGOREK M., MOKRZYCKI W.S.: *Filtracja obrazów konturowych za pomocą KRO*. I Konferencja Naukowo-Szkoleniowa „Komputerowe systemy rozpoznawania KOSYR'99”, Trzebiezowice, maj 1999, s. 283–291.
- [8] IWANIEC M.: *Kalibracja liniowa w zagadnieniach walidacji metod pomiarowych*. Czytelnia internetowa StatSoft Polska (www.statsoft.pl/czytelnia/czytelnia.html).
- [9] IWANIEC M.: *Walidacja metod pomiarowych*. Czytelnia internetowa StatSoft Polska (www.statsoft.pl/czytelnia/czytelnia.html).
- [10] MIERZWA W., MIKRUT S.: *Automatyczna identyfikacja elementów liniowych na obrazach cyfrowych*. Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, 10(2000), s. 52–1 – 52–8.
- [11] SALATA A.: *Walidacja metod badawczych*. Laboratorium 5/2009, s. 16–19.
- [12] SCHNARS U., JUEPTNER W.: *Digital holography. Digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg 2005.
- [13] TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
- [14] YOKOYAMA H., CHIKATSU H.: *Automatic break-line detection from laser scanner data using surface flatness*. ISPRS Commission V Symposium: „Image Engineering and Vision Metrology”, Dresden, 25–27 September 2006.

dr inż. Piotr Cheluszka – Instytut Mechanizacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice