

Identyfikacja cech geometrycznych skrawów wykonanych nożami kombajnów górniczych z wykorzystaniem skanera laserowego

Identification of geometric features of cuts made by combined cutter loaders with the use of laser scanner



*Dr hab. inż. Piotr Cheluszka,
prof. nzw. w Pol. Śl. *)*



*Mgr inż. Jakub Dziędział***)*

Treść: W artykule podjęto temat analizy cech geometrycznych skrawów wykonywanych nożami stożkowymi (stycznymi obrotowymi) w aspekcie modelowania ich kształtu dla potrzeb komputerowej symulacji procesu urabiania kombajnami chodnikowymi i ścianowymi. Dokonany został pomiar geometrii skrawów wykonanych nożem stożkowym w bloku cementowo-piaskowym na stanowisku do skrawania skał w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa. Komputerowa rekonstrukcja kształtu skrawów zrealizowana została w oparciu o digitalizację ich powierzchni z wykorzystaniem skanera laserowego. Umożliwiło to przeprowadzenie obszernych analiz wartości podstawowych parametrów geometrycznych skrawów objętych pomiarem. Wyniki pomiarów skonfrontowano z wartościami teoretycznymi uzyskanymi w oparciu o powszechnie stosowane modele skrawów w celu określenia stopnia dopasowania teoretycznego (modelowego) kształtu skrawu do kształtu rzeczywistego.

Abstract: This paper presents the analysis of geometric features of cuts made by point pivots (tangential tools) in the context of shape modeling for the purpose of computer simulation of heading machines and longwall shearers mining process. Geometry measurements of the cuts made by a point pivot in a cement-sand block were taken at the stand for rock machining in the laboratory of the Mining Mechanization Institute. The computer reconstruction of the cuts' shape was performed by digitizing their surfaces with the use of a laser scanner. This allowed to carry out comprehensive analyses of the values of basic geometric parameters of the cuts subjected to measurements. The results were compared with the theoretic values obtained on the basis of widely-applied cut models in order to determine the extent of matching the theoretic (model) cut shape with the real shape.

Słowa kluczowe:

nóż stożkowy, urabianie, parametry geometryczne skrawów, skanowanie, skaner laserowy, digitalizacja

Key words:

point pivot, mining, geometric parameters of cuts, scanning, laser scanner, digitizing

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych sposobów mechanicznego urabiania skał oraz materiałów o podobnych do skał właściwościach jest skrawanie. W górnictwie podziemnym węgla kamiennego, drążenie wyrobisk korytarzowych w technologii kombajnowej oraz wybieranie pokładów węgla w systemie

ścianowym, czy komorowo-filarowym realizowane jest z stosowaniem kombajnów – chodnikowych i ścianowych, których organy robocze wyposażone są w noże stożkowe urabiające skałę na zasadzie skrawania.

Zagadnieniem podstawowym w procesie projektowania, optymalizacji cech konstrukcyjnych i doboru parametrów technicznych głównych zespołów roboczych tego rodzaju maszyn, a w szczególności ich układu urabiania, w tym – układu noży organów roboczych dla danych warunków eksploatacyjnych, jest określenie stanu obciążenia narzędzi urabiających (noży) towarzyszącego procesowi urabiania skały. Wyznaczenie wartości sił działających na noże będące

*) Instytut Mechanizacji Górnictwa, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska. **) Absolwent Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej na specjalności Maszyny Górnicze, Budowlane i Drogowe

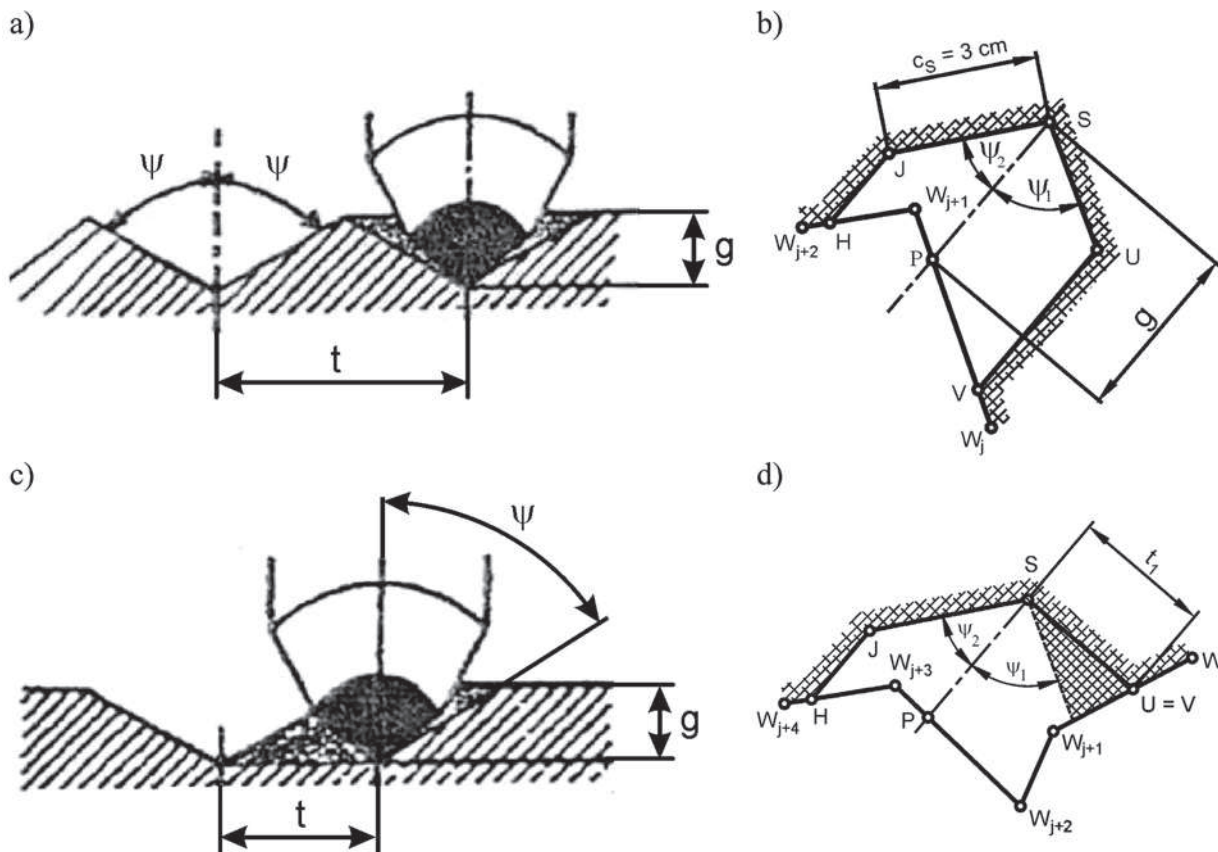
w kontakcie z urabianą calizną leży również u podstaw predykcji zapotrzebowania mocy, energochłonności urabiania, wymaganej siły posuwu kombajnu, czy analizy dynamiki kombajnu. Określenie wielkości i charakteru przebiegu obciążenia noży w procesie urabiania jest jednym z istotnych etapów komputerowej symulacji procesu roboczego maszyny urabiającej stanowiącej narzędzie do rozwiązywania wyżej wymienionych zagadnień. Realizowana jest ona w oparciu o modele matematyczne procesu urabiania powierzchni czoła przodku organami urabiającymi (w przypadku kombajnu ścianowego) lub głowicami urabiającymi (w przypadku kombajnu chodnikowego) wyposażonymi w określony układ noży. Częścią składową tych modeli jest matematyczny opis przebiegu procesu skrawania nożem urabiającym o założonej geometrii. Jednym z początkowych etapów algorytmu procedury symulacji procesu urabiania skał jest projekcja skrawów. Stanowi ona graficzną reprezentację skrawów (kształtu oraz ich następstwa) wykonywanych nożami urabiającymi w trakcie ruchu organu roboczego maszyny urabiającej. W oparciu o projekcję skrawów dokonywana jest identyfikacja wartości parametrów geometrycznych skrawów, co stanowi punkt wyjścia dla wyznaczenia przebiegu obciążenia noży.

W wykorzystywanych dla potrzeb symulacji procesu roboczego kombajnów górniczych modelach matematycznych procesu urabiania skał nożami stożkowymi kształty przekroju poprzecznego skrawów modelowane są w dość prosty sposób. Przykładowo, w przypadku skrawów otwierających zakłada się trójkątny kształt ich przekroju poprzecznego (w płaszczyźnie prostopadłej do wektora prędkości skrawania) – rysunek 1a. Powierzchnie boczne skrawu nachylone są w stosunku do prostopadłej do dna skrawu pod kątem odpowiadającym wartości kąta bocznego rozkruszenia urabianej

skały ψ , względnie – pod kątem wynikającym z rzutu ostrza stożkowego na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu noża [3, 4, 7, 10, 11, 12]. Wysokość tego trójkąta odpowiada głębokości skrawu g , przy czym jego wierzchołek, od którego ta wysokość jest mierzona pokrywa się z wierzchołkiem ostrza noża wykonującego rozpatrywany skraw. Wartość kąta bocznego rozkruszenia ψ wynika z właściwości urabianej skały. W przypadku skał zwięzłych przyjmuje się jego wartość na poziomie 45° , zaś dla skał kruchych wartość tego kąta jest z reguły większa [3, 9]. Stosowane są również modele bardziej rozbudowane, w których długość powierzchni bocznych skrawu ograniczona jest do pewnej wartości c_s [1, 9] – rysunek 1b. Na podstawie badań [13] dla skał zwięzłych przyjmuje się długość tego odcinka na poziomie 3 cm. Skrawy półotwarte (rys. 1c,d) modeluje się z kolei w formie równoległoboku o bokach nachylonych pod kątem ψ . Długość podstawy wynika przy tym z wartości podziałki skrawania t , zaś jego wysokość jest równa głębokości skrawu g .

Zjawiska towarzyszące oddziaływaniu ostrzy noży, w szczególności o dużym kącie ostrza, na urabianą skałę i w efekcie – sposób kształtowania się bruzdy na jej powierzchni są o wiele bardziej skomplikowane. W konsekwencji, przekroje poprzeczne skrawów mają bardziej złożony kształt. W rzeczywistości bowiem odspojenie skały w obrębie powierzchni bocznych skrawu nie następuje od wierzchołka ostrza noża, lecz rozpoczyna się na pewnej głębokości skrawu [5, 6, 8].

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistych kształtów oraz wartości charakterystycznych parametrów skrawów wykonanych nożem stożkowym o kącie ostrza $\beta=85^\circ$ na stanowisku do skrawania skał w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Pomiary geometrii skrawów



Rys. 1. Modele skrawów wykonanych nożem stożkowym [1, 10]: a,b) otwierającego, c,d) półotwartego
Fig. 1. Cut models made by point pivot [1, 10]: a, b) first cut opening c, d) second cut opening

zrealizowane zostały w ramach pracy dyplomowej magisterskiej [2]. Identyfikacji cech geometrycznych skrawów dokonano w oparciu o kształt zdigitalizowanej ich powierzchni uzyskanej w trakcie skanowania laserowego. Stanowiło to punkt wyjścia do przeprowadzenia komputerowej analizy wartości podstawowych parametrów geometrycznych skrawów objętych pomiarem.

2. Stanowisko pomiarowe oraz metoda pomiaru

Dla potrzeb cyfrowej rekonstrukcji powierzchni skrawów wykorzystano skaner laserowy M2-iLAN-2-120/60 firmy Mel Mikroelektronik GmbH (rys. 2 i 3, tabl. 1). Skanery tego typu stosowane są szeroko w automatyzacji procesów produkcji, między innymi na liniach spawalniczych – jako narzędzie umożliwiające analizę kształtu powierzchni elementów i profili dla potrzeb automatycznego pozycjonowania narzędzi. Funkcjonalna, modułowa budowa umożliwia jego wykorzystanie w różnych aplikacjach, w tym również w trudnych warunkach środowiskowych [16].

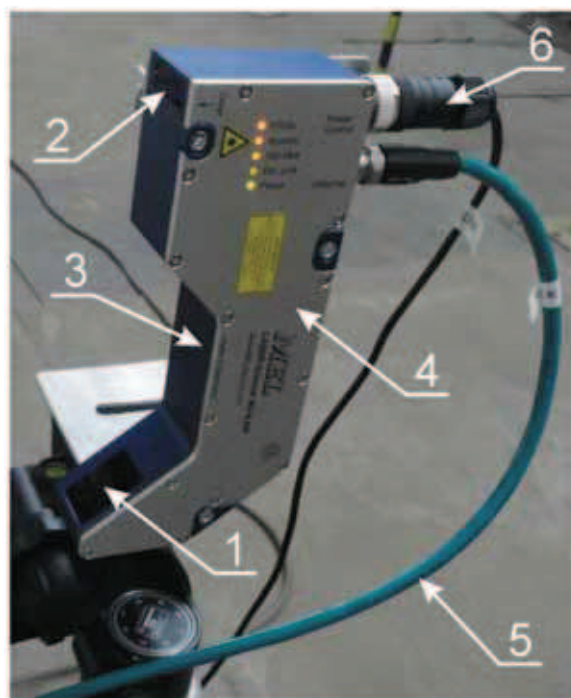
W skanerze laserowym M2-iLAN-2 zabudowana jest kamera CCD, laser liniowy oraz układ elektroniczny, który przetwarza dane pomiarowe rejestrowane przez kamerę. Całość tworzy zwarty układ głowicy pomiarowej o konstrukcji dostosowanej do pracy w warunkach przemysłowych. Dane pomiarowe ze skanera transmitowane są do komputera lub sterownika przemysłowego za pośrednictwem sieci Ethernet przez skonfigurowane połączenie adresów IP komputera i skanera [15]. Dedykowane oprogramowanie komputerowe zaimplementowane w sterowniku skanera przetwarza dane pomiarowe w czasie rzeczywistym, przy użyciu zaawansowanych algorytmów detekcji obrazu. Umożliwia ono wykrycie oraz rozpoznanie zarysu powierzchni skanowanych elementów oraz jego wymiarowanie. Algorytmy detekcji dobierane są przy tym w zależności od geometrii skanowanego obiektu oraz rodzaju żądanych informacji z procesu skanowania. Ponieważ podczas realizacji pomiarów wykorzystano uproszczoną wersję oprogramowania udostępnionego przez producenta skanera, dlatego dla potrzeb komputerowej analizy wyników pomiarów opracowane zostało oprogramowanie (w postaci skryptu) umożliwiające konwersję obrazów cyfrowych uzyskanych ze skanera do postaci numerycznej (współrzędnych kartezjańskich punktów tworzących linie przekrojowe skanowanych skrawów).

Pomiary geometrii przeprowadzono dla skrawów otwierających wykonanych w bloku cementowo-piaskowym, w postaci sześciianu o boku równym 800 mm z jedną odpowiednio wyprofilowaną powierzchnią (rys. 4). Skawy objęte pomiarem, o różnej głębokości, wykonane zostały w trakcie przemieszczania noża stożkowego wzdłuż łuku o promieniu wynoszącym około 1000 mm. Nóż o kącie ostrza $\beta=85^\circ$ ustawiony był przy tym względem skrawanej powierzchni w taki sposób, że kąt przyłożenia był równy $+2^\circ$. Skanowanie powierzchni skrawów realizowano na odcinku pomiarowym o długości wynoszącej około 350 mm (rys. 4) w trakcie przemieszczania skanera w kierunku pionowym – z góry w dół, z krokiem równym 5 mm. Dla kolejnych położenia skanera względem powierzchni skrawu, na ekranie komputera uzyskiwano obraz linii przekrojowych skrawu utworzonych przez zbiory punktów zarejestrowanej wiązki lasera (rys. 5). Liczba tych punktów oraz ich gęstość wynikała z rozdzielczości skanera, długości linii emitowanej przez laser (zakresu pomiarowego w kierunku osi X – tabl. 1) oraz jego położenia względem skanowanej powierzchni. Obrazy te zostały zapisane w postaci rastrowej do plików dyskowych. Dla każdego skrawu objętego analizą wykonano przeciętnie 72 skany umożliwiające odtworzenie ich kształtu na odcinku pomiarowym.



Rys.2. Stanowisko do pomiaru geometrii skrawów w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa: 1 – skaner laserowy, 2 – stanowisko komputerowe, 3 – statyw, 4 – obiekt badań (blok cementowo-piaskowy z wykonaną serią skrawów)

Fig. 2. Stand for measuring the cut geometry in the laboratory of Mining Mechanization Institute: 1 – laser scanner, 2 – computer work station, 3 – stand, 4 – subject of research (cement-sand block with a series of cuts)

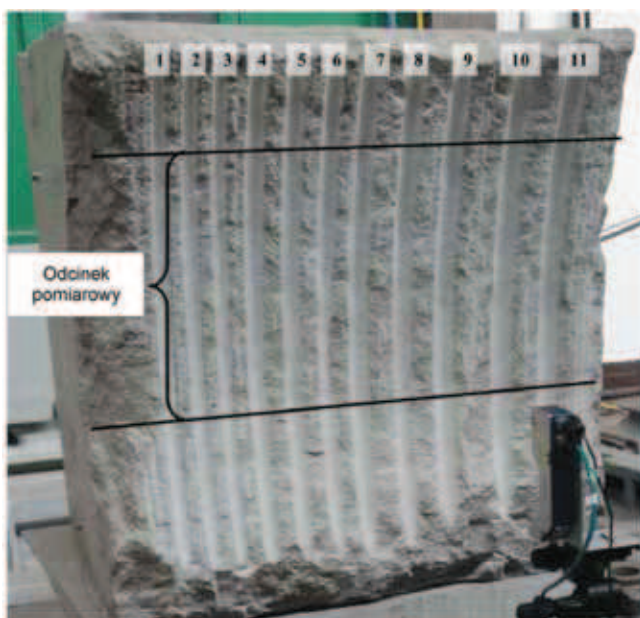


Rys.3. Skaner laserowy M2-iLAN-2-120/60 na stanowisku pomiarowym: 1 – kamera CCD, 2 – laser liniowy, 3 – kadłub, 4 – panel boczny, 5 – łącze Ethernet, 6 – zasilanie

Fig. 3. Laser scanner M2-iLAN-2-120/60 at the measuring position: 1 – CCD camera, 2 – line laser, 3 – body, 4 – sidebar, 5 – Ethernet connection, 6 – power supply

Tablica 1. Charakterystyka techniczno-metrologiczna skanera M2-iLAN-2-120/60 [14]
Table 1. Technical and metrological characteristics of the M2-iLAN-2-120/60 scanner [14]

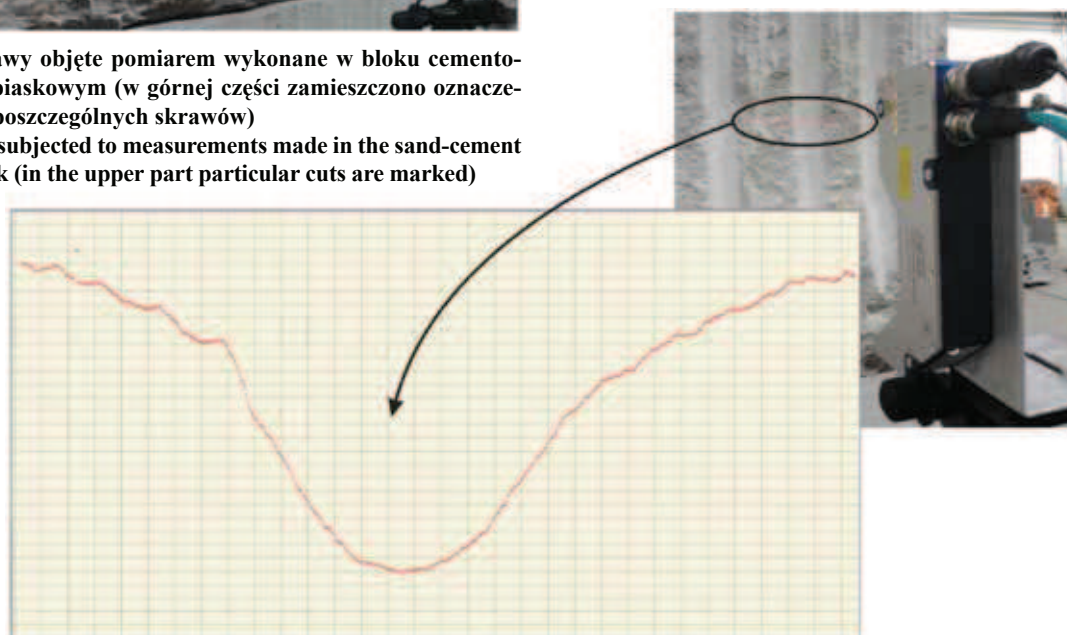
Zakres pomiarowy w kierunku osi Z (prostopadłej do skanowanej powierzchni)	120 mm
Minimalna odległość skanera od powierzchni skanowanej	84 mm
Zakres pomiarowy w kierunku osi X (równoległej do skanowanej powierzchni)	60 ÷ 80 mm
Rozdzielczość w kierunku osi Z	0,06 mm
Rozdzielczość w kierunku osi X	0,14 mm
Liniowość	0,2% zakresu pomiarowego
Klasa lasera	2
Źródło światła	promień lasera o długości fali 658 nm, widmo czerwone
Częstotliwość próbkowania	100 Hz (27000 pkt/s)
Światło otoczenia	5 000 lux
Żywotność diody lasera	50 000 h
Temperatura pracy	0 ÷ 40°C
Parametry zasilania	DC 12 ÷ 30 V (15 W)



Rys. 4. Skrawki objęte pomiarem wykonane w bloku cementowo-piaskowym (w górnej części zamieszczono oznaczenia poszczególnych skrawków)

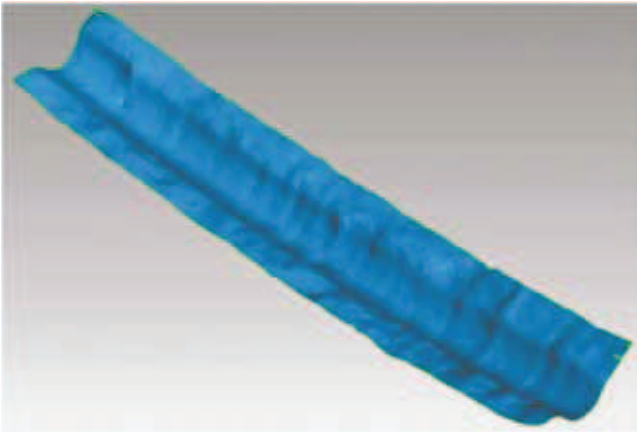
Fig. 4. Cut subjected to measurements made in the sand-cement block (in the upper part particular cuts are marked)

Na etapie przetwarzania wyników pomiaru, w pierwszej kolejności zdjęcia pomiarowe poddano obróbce graficznej (filtrowaniu), która polegała na zredukowaniu liczby kolorów do dwóch. Piksele tworzące tło zostały odizolowane od punktów tworzących linie przekrojowe skrawów. Tło zostało zastąpione barwą czarną, której przypisana jest wartość 0, zaś punkty tworzące linie przekrojowe skrawów – barwą białą o wartości 1. Dla tak przetworzonych zdjęć pomiarowych wyznaczone zostały wartości współrzędnych punktów tworzących linie przekrojowe skanowanego skrawu w poszczególnych ich przekrojach z uwzględnieniem zmiennej gęstości punktów pomiarowych wynikającej ze zmiennej odległości skanera od skanowanej powierzchni dla kolejnych jego położań (odległość ta zmieniała się w zakresie od 120 do 194 mm). W celu trójwymiarowej rekonstrukcji skanowanego skrawu wprowadzona została trzecia współrzędna opisująca położenie płaszczyzny rozpatrywanego przekroju w kierunku pionowym (wzdłuż odcinka pomiarowego). Rekonstrukcja skrawów



Rys. 5. Wiązka lasera rzutowana na powierzchnię skrawu oraz linia przekrojowa uzyskana w trakcie procesu skanowania na ekranie komputera w oprogramowaniu dołączonym do skanera

Fig. 5. Laser beam projected on the computer screen in the attached software



Rys. 6. Trójwymiarowy model powierzchni skrawu uzyskany w programie Geomagic Studio

Fig. 6. 3D model of the cut's surface obtained in the program Geomagic Studio

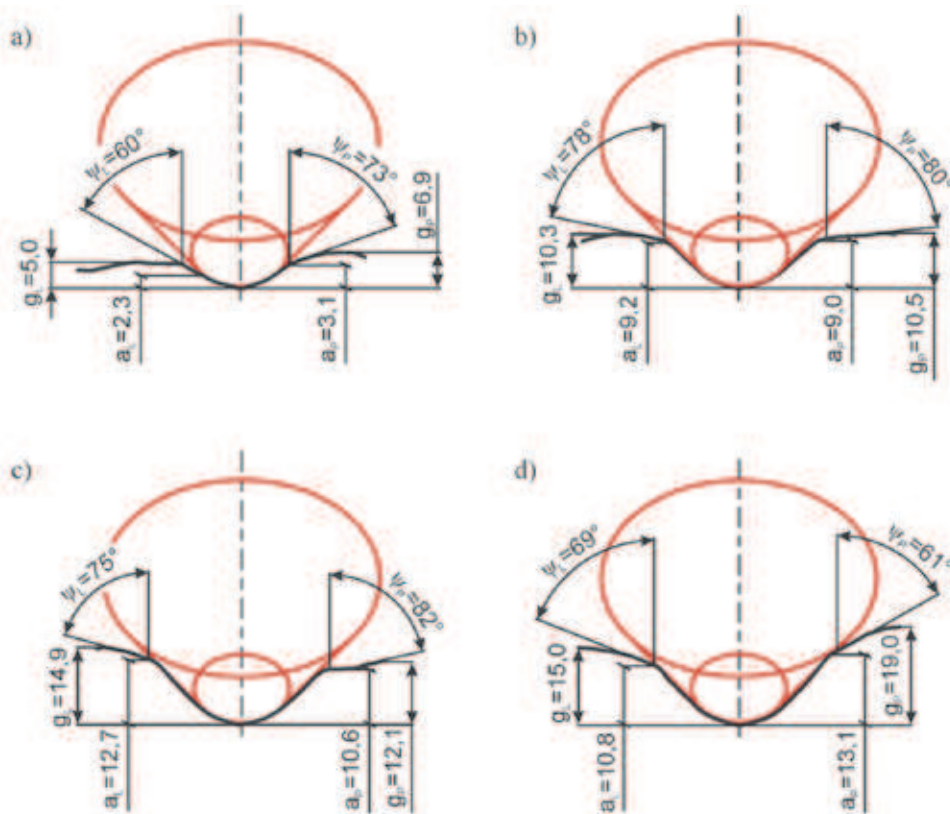
dokonana została w środowisku Geomagic Studio, w którym w oparciu o uzyskane w procesie skanowania chmury punktów o współrzędnych przestrzennych zapisanych do plików tekstowych odtworzony został kształt powierzchni skrawów w postaci siatki trójkątów (rys. 6). W następnej kolejności wykonano 21 przekroi utworzonych w ten sposób wirtualnych modeli 3D skrawów w płaszczyznach prostopadłych do ich dna. Ponieważ skrawy wykonane zostały w trakcie ruchu noża po torze łukowym, płaszczyzny kolejnych przekroi nie są do siebie równoległe, lecz usytuowane radialnie i obrócone względem siebie o kąt wynikających z założonej ich gęstości

na odcinku pomiarowym (przekroje skrawów wykonane zostały w odstępach co około 18 mm). Uzyskane w ten sposób linie przekrojowe zaimportowane zostały do programu AutoCAD, w którym zostały one zwymiarowane. Stanowiło to punkt wyjścia dla analizy cech geometrycznych skrawów wykonanych nożem stożkowym o założonej geometrii.

Analizą objętych zostało osiem spośród jedenastu skrawów wykonanych w bloku cementowo-piaskowym (o wytrzymałości na ścislenie $R_c=25$ MPa) o głębokości zadanej g_z wynoszącej: 7 mm (skraw nr 2 i 3), 10 mm (skraw nr 5 i 6), 15 mm (skraw nr 8 i 9) oraz 20 mm (skraw nr 10 i 11). Skrawy te wykonane zostały przy różnej wartości podziałki, zawierającej się w granicach do 36 mm (skrawy o głębokości zadanej wynoszącej 7 mm) do 72 mm (skrawy o głębokości zadanej wynoszącej 20 mm).

3. Analiza wyników pomiarów

Na rysunku 7 pokazano przykładowe przekroje skrawów o rozpatrywanych głębokościach z naniesionym zarysem ostrza noża stożkowego, którym zostały one wykonane. Na przekrojach widoczna jest wyraźnie strefa oddziaływania ostrza noża na powierzchnie boczne i dno skrawów. Skutkiem tego oddziaływania jest ukształtowanie dna skrawu wynikające z kształtu ostrza noża oraz jego ustawienia względem powierzchni urabianej skały. Samoistne odpajanie urabianego materiału pod kątem odpowiadającym kątowi bocznego rozkruszenia następuje przy tym relatywnie blisko powierzchni swobodnej (powierzchni urabianej), a nie jak to się powszechnie przyjmuje – od wierzchołka ostrza noża. Zasięg oddziaływania ostrza noża stożkowego, określony w dalszej części



Rys. 7. Przykładowe przekroje skrawów wykonanych nożem stożkowym w bloku cementowo-piaskowym dla założonej głębokości skrawu: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

Fig. 7. Examples of cut sections made with the point pivot in the sand-cement block for the assumed cut depth: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

pracy, charakteryzowany będzie za pomocą odległości a oraz współczynnika k_a . Kształt przekroju skrawów nie jest symetryczny pomimo braku odchylenia noża od płaszczyzny jego ruchu. Efekt ten wywołany jest wpływem podziałki skrawania, która w powiązaniu z głębokością skrawu decyduje o zasięgu zjawiska samoistnego odspajania żebra pomiędzy sąsiednimi bruzdami. Stąd, odległości dna skrawu od powierzchni swobodnej mierzone po obu stronach przekroju skrawu (g_L i g_P) mogą różnić się i to dość znacznie. Dla skrawów objętych pomiarem różnica rzeczywistej głębokości skrawu mierzona po obu jego stronach dochodziła nawet do: 2,9 mm (58 %) – dla $g_z = 7$ mm; 6,1 mm (61 %) – dla $g_z = 10$ mm; 4,7 mm (31 %) – dla $g_z = 15$ mm oraz 5,3 mm (28 %) dla $g_z = 20$ mm. Jednak średnie wartości różnicy głębokości po obu stronach skrawu, wyznaczone dla całego odcinka pomiarowego nie przekraczały 10 % wartości teoretycznej głębokości skrawu wynikającej z zadanej ich głębokości – w przypadku skrawów o głębokości zadanej wynoszącej 15 i 20 mm oraz 18 % – dla skrawów o głębokości zadanej równej: 10 i 7 mm.

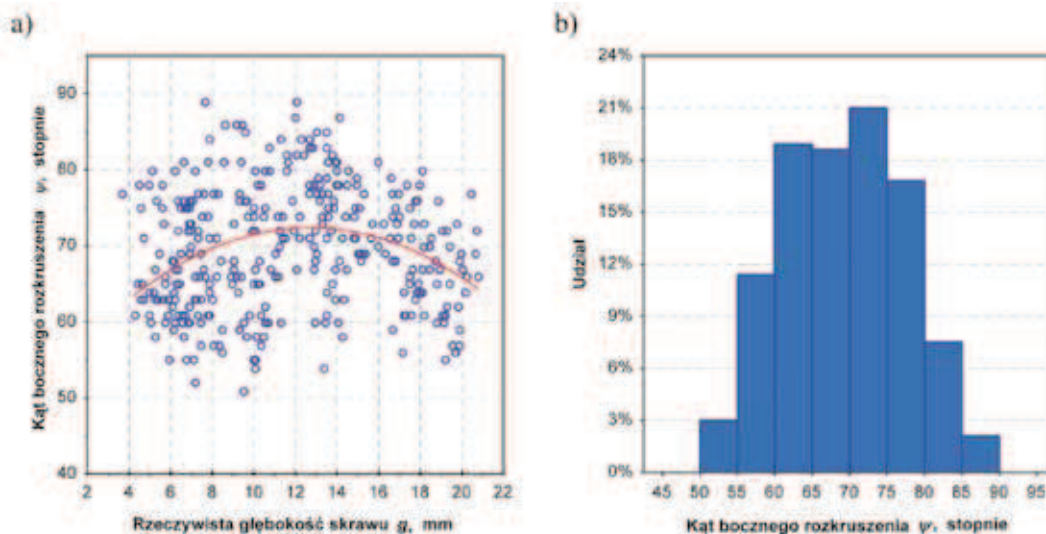
Ze względu na występujące asymetrie przekroju skrawów pomiar wartości podstawowych ich parametrów geometrycznych, takich jak: głębokość g , kąt bocznego rozkruszenia ψ oraz zasięg oddziaływania ostrza noża a dokonany został oddzielnie dla lewej oraz prawej strony przekroju każdego skrawu. Wielkości te oznaczono indeksami: „L” – dla lewej strony przekroju skrawu oraz „P” – dla strony prawej (por. rys.7).

Parametrem decydującym o zasięgu, przy danej głębokości skrawu, propagacji pęknięcia skały w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu noża jest kąt bocznego rozkruszenia. Parametr ten zaliczyć należy do własności materiałowych urabianego ośrodka. W przypadku skrawów objętych pomiarem wykonanych w bloku cementowo-piaskowym zmierzone wartości tej wielkości zawierały się w szerokim zakresie, bo od 50 do blisko 90° (rys. 8a). Pomimo, że wartości analizowanego tu parametru wynikają z własności urabianego materiału, widoczny jest jednak również wpływ głębokości skrawu. W przypadku analizowanych skrawów jest to zależność aproksymacyjnie paraboliczna z widocznym maksimum funkcji $\psi=f(g)$ odpowiadającym rzeczywistej głębokości skrawu $g=13$ mm. Wartość średnia kąta bocznego rozkruszenia wyznaczona dla wszystkich rozpatrywanych skrawów wyniosła 70°. Dla 75 % badanego zbioru wartości

kąta bocznego rozkruszenia zawierały się w zakresie od 60 do 80°, przy czym największy udział (21 %) miały wartości z przedziału od 70 do 75° (rys. 8b). Prognozowany zakres zmienności wartości kąta bocznego rozkruszenia dla badanego bloku cementowo-piaskowego, dla przedziału ufności $P=0,95$, wynosi przy tym: 54÷86°.

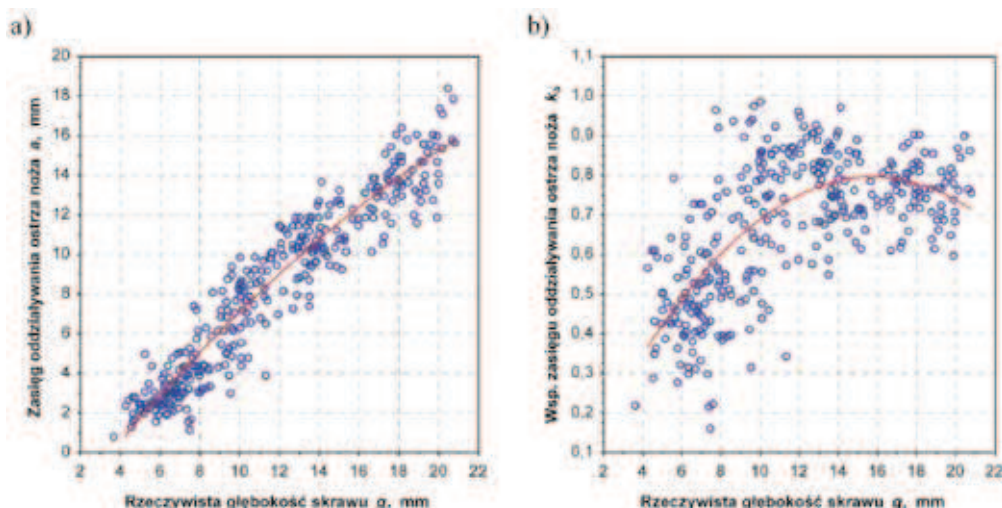
Jak już wcześniej zauważono, linie przekrojowe skrawów wykonanych w bloku cementowo-piaskowym na stanowisku do skrawania wskazują na to iż w dolnej części ich kształt wynika bezpośrednio z geometrii ostrza noża oraz sposobu jego ustawienia względem urabianej powierzchni. Wielkość tej części przekroju skrawu określona została poprzez zasięg oddziaływania ostrza noża a oraz współczynnik zasięgu oddziaływania ostrza noża k_a (rys. 9). W miarę wzrostu głębokości skrawu zasięg oddziaływania ostrza noża a rośnie. Zależność ta jest w zasadzie aproksymacyjnie liniowa (rys. 9a). Głębokość, na jakiej kształt dna i powierzchni bocznych skrawu wynika wprost z kształtu ostrza noża oraz jego ustawienia zawierała się dla skrawów objętych pomiarem w granicach od 0,8 mm – dla $g=3,6$ mm do nawet 18,4 mm – dla $g=20,4$ mm. W celu określenia wpływu głębokości skrawu na intensywność analizowanego tu zjawiska wprowadzono współczynnik zasięgu oddziaływania ostrza noża k_a zdefiniowany jako stosunek odległości od dna skrawu miejsca, od którego powierzchnia boczna skrawu nachylona jest pod kątem ψ (będącej miarą zasięgu oddziaływania ostrza noża) do głębokości skrawu mierzonej po tej samej jego stronie, co wymieniona wcześniej odległość: $k_{aL}=a_L/g_L$ oraz $k_{aP}=a_P/g_P$. Wartości wyznaczonego w ten sposób wskaźnika zawierały się w szerokim zakresie bo od 0,16 do nawet 0,99 (rys. 9b). Zależność współczynnika k_a od głębokości skrawu g jest przy tym aproksymacyjnie paraboliczna.

Analizując dalej funkcję regresji $k_a=f(g)$, w miarę zwiększania głębokości skrawu wartość tego współczynnika początkowo rosła w zakresie od 0,35 do 0,8. Maksimum badana funkcja osiągnęła przy głębokości skrawu kształtującej się na poziomie 16 mm. Dla ponad ¼ głębokości skrawu (mierzonej od jego dna) kształt powierzchni bocznych skrawu wynika tu więc z geometrii ostrza noża oraz sposobu jego ustawienia względem urabianej powierzchni. Dalszy wzrost głębokości skrawu powodował spadek wartości analizowanej funkcji do około 0,73. W zakresie małych głębokości skrawu (do



Rys. 8. Rzeczywiste wartości kąta bocznego rozkruszenia dla bloku cementowo-piaskowego: a) w funkcji rzeczywistej głębokości skrawu, b) histogram

Fig. 8. Real values of rake angle crush for the sand-cement block: a) in relation to the real cut depth, b) histogram

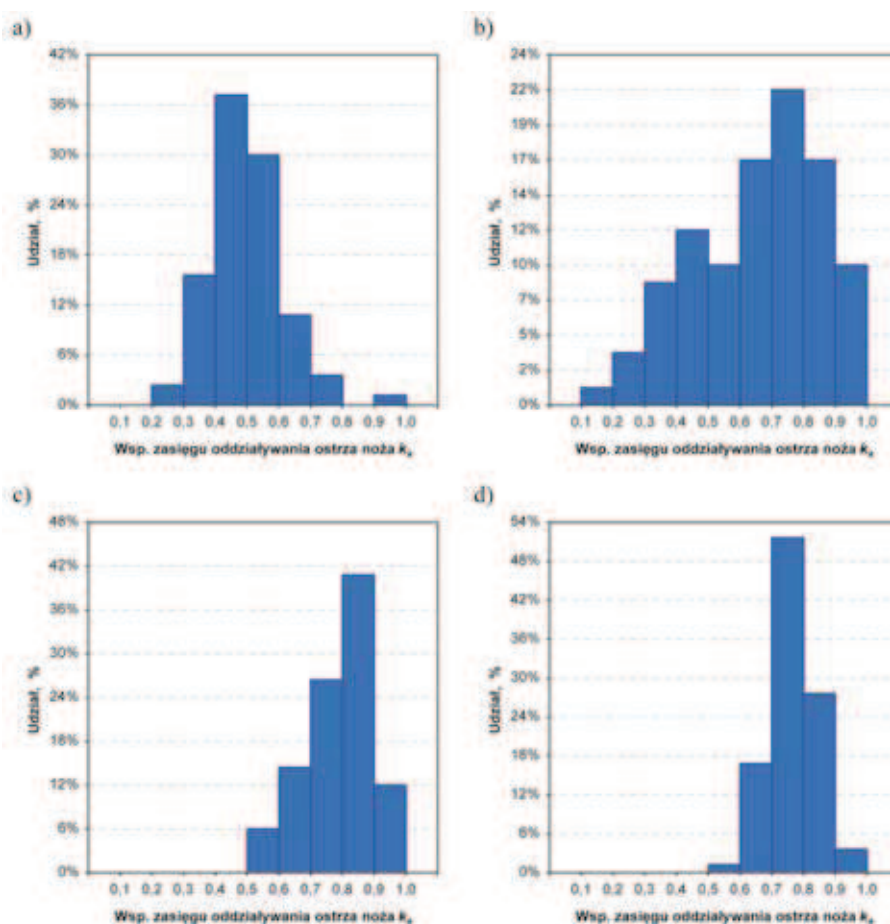


Rys. 9. Zasięg oddziaływania ostrza noża stożkowego na dno skrawu i jego powierzchnie boczne
 Fig. 9. Reach of impact of the point pivot edge on the bottom of cut and its lateral surfaces

10 mm) wzrost głębokości skrawu powodował duży wzrost udziału strefy kontaktu ostrza noża z dnem oraz powierzchniami bocznymi skrawu w jego przekroju poprzecznym. Ze wzrostem bowiem głębokości skrawu od ~4 do 10 mm wartość funkcji $k_a = f(g)$ zwiększyła się 2-krotnie (od 0,35 do 0,7). W zakresie zmienności głębokości skrawu od 10 do około 20 mm wartości badanej funkcji regresji mieściły się natomiast w pasie o szerokości 0,1 (od 0,7 do 0,8). Dla całego zakresu zmienności rzeczywistej głębokości skrawów objętych pomiarem, wartość średnia współczynnika zasięgu oddziaływania ostrza noża k_a wyniosła 0,68. Przeciętnie zatem, wysokość

strefy, której kształt wynika z geometrii ostrza noża stanowiła 2/3 głębokości skrawu.

Ponieważ wartość współczynnika zasięgu oddziaływania ostrza noża zależy od głębokości skrawu przeanalizowano histogramy dla czterech założonych głębokości skrawu w celu określenia wartości najczęściej występujących (rys. 10). W przypadku skrawów o najmniejszej z rozpatrywanych głębokości (rys. 10a) największy udział miały wartości współczynnika k_a z zakresu od 0,4 do 0,6 (67 %). Wartość średnia wyniosła w tym przypadku 0,49, zaś odchylenie standardowe było równe 0,11.



Rys. 10. Histogramy wartości współczynnika zasięgu oddziaływania ostrza noża na dno skrawu i jego powierzchnie boczne dla założonej głębokości skrawu: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

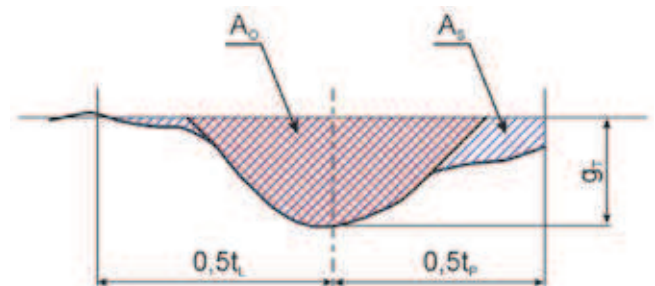
Fig. 10. Histograms of coefficient value of reach of the point pivot impact on the bottom of cut and its lateral surfaces for the assumed cut depth: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

W przypadku skrawów o założonej głębokości $g_z=10$ mm dominowały wartości współczynnika k_a z przedziału od 0,7 do 0,8 (rys. 10b). Udział wartości z przedziału od 0,6 do 0,9 wyniósł przy tym blisko 60 %. Wartość średnia oraz odchylenie standardowe rozkładu wartości współczynnika zasięgu oddziaływania ostrza noża dla rozważanej założonej głębokości skrawu wyniosły odpowiednio: 0,66 i 0,2. Zwiększenie zadanej głębokości skrawów do 15 mm spowodowało dalsze przesunięcie wartości badanego parametru w stronę większych wartości (rys. 10c). W tym przypadku największy udział (40 %) miały wartości z przedziału od 0,8 do 0,9. Blisko 2/3 zbioru wartości współczynnika k_a zawierało się przy tym w zakresie od 0,7 do 0,9. Wartość średnia dla analizowanych głębokości skrawu wyniosła 0,79, zaś odchylenie standardowe było równe 0,1.

W przypadku skrawów o największej głębokości ($g_z=20$ mm) dominujące były wartości współczynnika zasięgu oddziaływania ostrza noża k_a z przedziału od 0,7 do 0,8 (~50%) – rys. 10d. Pomimo, że udział wartości tego parametru z przedziału od 0,8 do 0,9 był również relatywnie wysoki, wartość średnia dla badanego tu rozkładu była nieco mniejsza w stosunku do wartości uzyskanej dla skrawów o głębokości zadanej $g_z=15$ mm. Wyniosła ona bowiem 0,76. Odchylenie standardowe było natomiast równe 0,07.

W dalszej części analizy porównano pole przekroju poprzecznego skrawów (A_s) z polem powierzchni rzutu ostrza noża na płaszczyznę prostopadłą do kierunku jego ruchu (A_o). Ponieważ nie był znany rzeczywisty kształt powierzchni skrawanej, zanim wykonany został dany skraw, przekrój poprzeczny każdego skrawu ograniczony został trzema prostymi. Dwie z nich – prostopadłe do dna skrawu, rozmieszczone były w odległości równej połowie podziałki mierzony od osi skrawu: $t_p/2$ – z lewej strony oraz $t_p/2$ – z prawej strony. Trzecia

linia, równoległa do dna skrawu, położona była natomiast w odległości wynikającej z teoretycznej, dla rozpatrywanego przekroju, głębokości skrawu g_r (rys. 11). Analizowano różnicę względną wymienionych wyżej pól powierzchni przekroju poprzecznego wyrażoną wzorem:



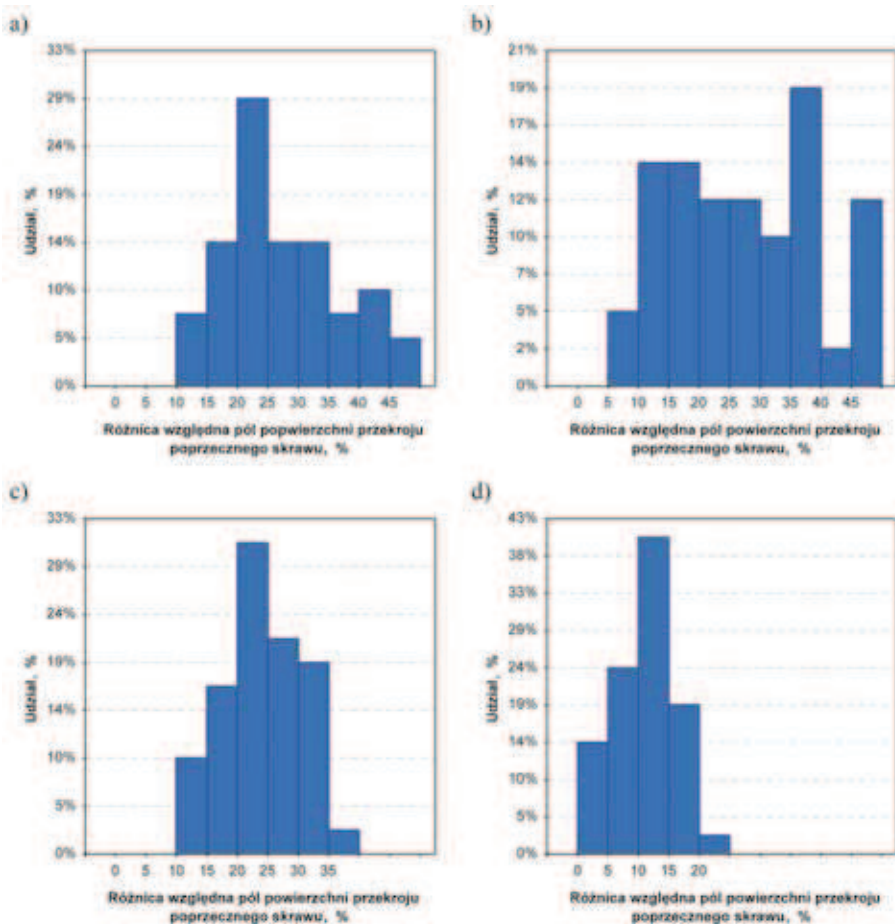
Rys. 11. Szkic ilustrujący sposób wyznaczenia pola przekroju poprzecznego skrawu

Fig. 11. Illustration of method of determining the area of the cut cross-section

$$\Delta_A = \frac{A_s - A_o}{A_o} \cdot 100\% \quad (1)$$

Wskaźnik ten jest miarą intensywności samoistnego odpajania urabianego materiału w obrębie powierzchni bocznych skrawu.

W przypadku skrawów o najmniejszej głębokości $g_z=7$ mm wartość tego parametru zmieniała się w szerokim zakresie, bo od 12 % do nawet 69 %. Największy udział 29 % miały przy tym wartości różnicy względnej pól powierzchni przekroju Δ_A w przedziale od 20 do 25 % (rys. 12a). Dla około



Rys. 12. Rozkład różnic względnych pól przekroju poprzecznego skrawów dla założonej głębokości: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

Fig. 12. Distribution of relative differences of areas of the cut cross-section for the assumed depth: a) $g_z = 7$ mm, b) $g_z = 10$ mm, c) $g_z = 15$ mm, d) $g_z = 20$ mm

70 % badanych przypadków pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawów A_s było większe od pola powierzchni rzutu noża A_o w granicach od 15 % do 35 %. Przeciętnie, różnica względna pól powierzchni przekroju poprzecznego Δ_A dla rozpatrywanych skrawów wyniosła około 29 %.

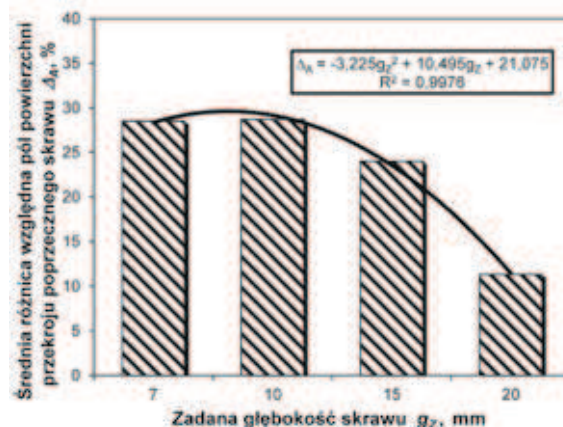
Dla skrawów o głębokości zadanej $g_z=10$ mm widoczne jest przesunięcie najliczniej reprezentowanej grupy wartości wskaźnika Δ_A w stronę większych wartości. Dla blisko 20% analizowanych przekrojów skrawów pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawów było większe od 35 % do 40 % od pola rzutu noża na płaszczyznę prostopadłą do kierunku jego ruchu (rys. 12b). Dla skrawów tych widoczny jest jednak duży rozrzut wartości analizowanego wskaźnika. Udział wartości tego parametru z przedziału od 10 % do 40 % stanowił bowiem aż 81 %. Wartość średnia różnicy względnej pól powierzchni przekroju poprzecznego skrawów i rzutu noża wyniosła w tym przypadku ~29 %. Wartość ta była zatem porównywalna do uzyskanej dla skrawów o najmniejszej głębokości.

Gdy $g_z=15$ mm, podobnie, jak w poprzednich przypadkach wartości pola przekroju poprzecznego skrawów A_s były większe od wartości pola powierzchni rzutu ostrza noża A_o . Przyrost powierzchni przekroju poprzecznego skrawu spowodowany samoistnym odspajaniem urabianego materiału w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu noża jest tu jednak mniejszy w porównaniu z efektem, jaki odnotowano dla $g_z=7$ mm i $g_z=10$ mm. Pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu było w tym przypadku większe od pola powierzchni rzutu noża o 12 ÷ 42 %. Dla ponad 30 % liczby badanych przekrojów skrawów wartości wskaźnika Δ_A zawierały się w granicach od 20 ÷ 25 % (rys. 12c). Udział różnicy względnej pól powierzchni przekroju skrawu i rzutu noża w zakresie od 20 do 35 % stanowił przy tym ponad 70 % rozpatrywanych przypadków. Wartość średnia względnej różnicy pól powierzchni Δ_A dla analizowanej grupy skrawów wyniosła 24 %. Tak więc, pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu było przeciętnie o 1/4 większe w stosunku do pola powierzchni rzutu noża.

Dla skrawów o największej głębokości $g_z=20$ mm różnica względna pól powierzchni przekroju poprzecznego zawierała się w granicach od 3 % do 22 % (rys. 12d). W blisko 2/3 liczby analizowanych przekrojów skrawów, wskaźnik Δ_A przyjmował wartości z przedziału od 5 do 15 %. Największy udział (40 %) miały przy tym wartości różnicy względnej pól przekroju poprzecznego w granicach od 10 % do 15 %. Zwiększenie głębokości skrawów spowodowało zatem przesunięcie rozkładu wartości tego wskaźnika w stronę mniejszych wartości. Wartość średnia wskaźnika Δ_A wyniosła w tym przypadku 11 %.

Porównując wartości średnie przyrostu różnicy względnej pól powierzchni przekroju poprzecznego dla poszczególnych zadanych głębokości skrawów widoczna jest pewna prawidłowość (rys. 13). Wraz ze wzrostem głębokości skrawu przyrost pola powierzchni jego przekroju poprzecznego w stosunku do pola powierzchni rzutu noża na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu noża maleje. Widoczne jest to szczególnie wyraźnie dla głębokości skrawu z zakresu od 10 do 20 mm. Odnotowany spadek wartości różnicy względnej analizowanych pól powierzchni przekroju był przy tym duży. Ponad 2-krotnemu zwiększeniu głębokości skrawów odpowiadało bowiem blisko 3-krotne zmniejszenie wartości wskaźnika Δ_A . Ze wzrostem głębokości skrawu malała więc intensywność samoistnego odspajania urabianego materiału w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu noża.

W celu porównania rzeczywistego pola przekroju skrawu z wartością tego parametru dla stosowanych powszechnie modeli skrawu otwierającego wprowadzono wskaźnik dopasowania modelu skrawu W_{MS} . Zdefiniowany jest on jako



Rys. 13. Wpływ głębokości skrawu na przyrost wartości względnej pola przekroju poprzecznego skrawu

Fig. 13. Influence of cut depth on the increase of relative value of the area of the cut cross-section

stosunek teoretycznej wartości pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawu do wartości rzeczywistej (zmierzonej) tego pola. Rozpatrzono przy tym dwa modele skrawu otwierającego:

– Model I – przekrój skrawu ma postać trójkąta o wysokości odpowiadającej teoretycznej głębokości skrawu g_T oraz kącie wierzchołkowym równy 2ψ (podwojonej wartości średniej kąta bocznego rozkruszenia wyznaczonej dla skrawów o określonej głębokości zadanej g_z)

$$W_{MS} = \frac{g^* \cdot (2g_T - g^*) \cdot tg\psi}{A_S} \quad (2)$$

Model II – przekrój skrawu ma postać zaproponowaną w pracy [13], w którym maksymalna długość boków nachylonych w stosunku do osi skrawu pod kątem bocznego rozkruszenia jest równa $c_S=3$ cm (por. rys. 1b)

$$W_{MS} = \frac{g^* \cdot (2g_T - g^*) \cdot tg\psi}{A_S} \quad (3)$$

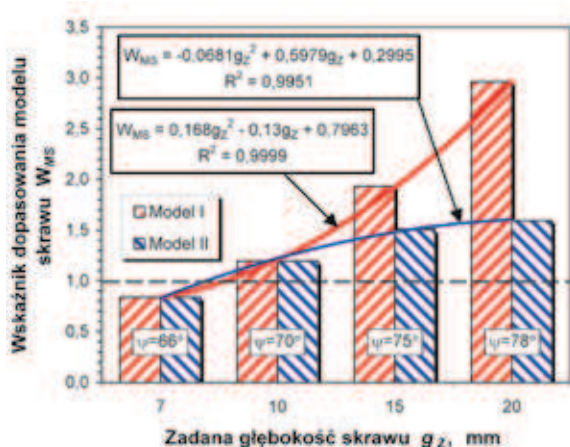
przy czym:

$$g^* = \begin{cases} c_S \cdot \cos\psi & , \text{gd}y \ g_T > c_S \cdot \cos\psi \\ g_T & , \text{gd}y \ g_T \leq c_S \cdot \cos\psi \end{cases} \quad (4)$$

Wskaźnik W_{MS} jest miarą dopasowania teoretycznego kształtu skrawu (modelu) do rzeczywistego kształtu skrawu odpowiadającego danej jego głębokości.

Wartość wskaźnika W_{MS} zależy w dużym stopniu od głębokości skrawu (rys. 14). W przypadku modelu I, ze wzrostem zadanej głębokości skrawów g_z w zakresie od 7 do 20 mm wartość średnia tego wskaźnika rosła w zakresie od 0,84 do 2,96 (kolor czerwony). Jak widać, zależność $W_{MS}=f(g_z)$ jest nieliniowa. Teoretyczne wartości pola przekroju poprzecznego skrawów otwierających uzyskane dla modelu I były dość zbliżone z wartościami rzeczywistymi jedynie dla głębokości skrawów nie przekraczających 10 mm (różnica tych wartości nie przekraczała 20 %). Z kolei w przypadku skrawów o głębokości zadanej większej od 10 mm, w miarę wzrostu ich głębokości, teoretyczne wartości pola poprzecznego przekroju skrawu w coraz większym stopniu przewyższały wartości rzeczywiste (dla największej spośród rozpatrywanych głębokości skrawów pole przekroju poprzecznego dla modelu trójkątnego skrawu otwierającego było blisko 3-krotnie większe w porównaniu do wartości rzeczywistych).

Wzrost wartości wskaźnika W_{MS} dla modelu II dla skrawów o głębokości powyżej 10 mm jest wyraźnie mniejszy



Rys. 14. Wpływ głębokości skrawu na wartość wskaźnika dopasowania modelu skrawu

Fig. 14. Influence of cut depth on the value of the coefficient of matching the cut model

w porównaniu do wyników uzyskanych dla modelu I (rys. 14 – kolor niebieski). W tym bowiem przypadku, dla skrawów o największej z rozpatrywanych głębokości wskaźnik ten osiągnął wartość 1,59. Teoretyczna wartość pola przekroju skrawu przewyższała zatem wartość rzeczywistą o prawie 60 %. W zakresie głębokości skrawów poniżej 10 mm wartości wskaźnika W_{MS} dla modelu II odpowiadają wartościom uzyskanym dla modelu I. Rzeczywiste głębokości skrawów były tu mniejsze od wartości granicznej g^* , w rezultacie czego przekrój skrawu w modelu II miał również kształt trójkątny, tak jak to ma miejsce w modelu I.

Przeszacowanie pola powierzchni przekroju skrawów szczególnie w przypadku dużych ich głębokości prowadzić może w efekcie bądź do przeszacowania, bądź niedoszacowania wartości niektórych wskaźników charakteryzujących proces urabiania. Przykładem tego drugiego zjawiska może być energochłonność urabiania skały nożem stożkowym – ze względu na większą od rzeczywistej wartość pola przekroju przekroju skrawu wartość tego wskaźnika może być mocno zaniżona.

4. Podsumowanie

Zamodelowanie kształtu skrawów wykonywanych nożami urabiającymi jest istotnym elementem matematycznego modelu procesu roboczego maszyn urabiających. Projekcja skrawów, w której następuje odwzorowanie kształtu i następstwa skrawów wykonywanych przez poszczególne noże organu roboczego maszyny urabiającej stanowi bowiem podstawę dla predykcji obciążenia noży, organów roboczych oraz ich napędów w trakcie komputerowej symulacji procesu roboczego, w oparciu o określone na jej podstawie wartości parametrów geometrycznych skrawów.

Dla potrzeb określenia przydatności wykorzystywanych w praktyce modeli matematycznych procesu skrawania nożami kombajnów górniczych oraz ustalenia danych wejściowych do symulacji komputerowej w zakresie wartości parametrów modeli skrawów niezbędne jest wyznaczenie doświadczalne cech geometrycznych rzeczywistych skrawów wykonywanych nożami urabiającymi o zadanej geometrii w calinie skalnej, lub bloku wykonanym z materiałów ekwiwalentnych (na przykład masy cementowo-piaskowej) o założonych własnościach. Badania takie realizowane mogą być w wa-

runkach laboratoryjnych, na stanowisku do skrawania skał. Określenie kształtu oraz wartości podstawowych parametrów geometrycznych skrawów, takich jak: głębokość, kąt bocznego rozkruszenia, zasięg kontaktu ostrza noża ze skałą, czy pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu uzyskiwane przy danej jego głębokości możliwe jest przy zastosowaniu różnych technik pomiarowych. W niniejszej pracy wykorzystano metodę bezstykową opartą na skanowaniu laserowym za pomocą skanera liniowego. Metoda ta ma wiele zalet, do których zaliczyć należy między innymi [2]:

- możliwość zdalnego pomiaru bez konieczności kontaktu głowicy pomiarowej z objektem,
- dużą wydajność wynikającą z możliwości jednoczesnego pomiaru punktów rozmieszczonych wzdłuż całej linii przekrojowej,
- dużą dokładność,
- małą wrażliwość na czynniki środowiskowe (z wyjątkiem silnego zapylenia), dzięki czemu stosowana jest ona szeroko w wielu aplikacjach przemysłowych (np. w zautomatyzowanych systemach spawalniczych).

Przeprowadzone pomiary oraz analiza ich wyników doprowadziła do wyznaczenia wartości parametrów charakteryzujących geometrię skrawów otwierających wykonanych nożem stożkowym o kącie ostrza $\beta=85^\circ$ w bloku cementowo-piaskowym o wytrzymałości na ściskanie $R_c=25$ MPa. Uzyskane wartości kąta bocznego rozkruszenia pozwalają zakwalifikować urabiany materiał do kruchych (wartości średnie wyznaczone dla wszystkich zadanych głębokości skrawów były większe od 60°). Wyznaczone zostały ponadto wartości parametrów charakteryzujących zasięg strefy kontaktu ostrza noża z powierzchniami bocznymi i dnem skrawu, w której materiał skrawany przyjmuje kształt ostrza noża. Wysokość tej strefy dla skrawanego materiału kształtowała się, w zależności od głębokości skrawu, na poziomie średnim w granicach od 0,49 do 0,79 głębokości skrawu. Występowanie strefy kontaktu ostrza noża ze skałą na dnie skrawu ma istotny wpływ na rzeczywisty kształt oraz wielkość przekroju poprzecznego skrawu, który różni się od przyjmowanych powszechnie modeli. Przeprowadzona analiza stopnia dopasowania dwóch modeli skrawu otwierającego do rzeczywistego przekroju tego rodzaju skrawu wykazała wyraźne rozbieżności uzyskiwanych wyników na drodze teoretycznej, szczególnie w przypadku dużych głębokości skrawów. Wskazuje to na konieczność wprowadzenia współczynników korygujących wielkość pola przekroju poprzecznego skrawów uzyskiwaną z wykorzystaniem tych modeli matematycznych, lub budowę nowych modeli, w większym stopniu oddających postać geometryczną skrawów realizowanych nożami stożkowymi.

Zaprezentowana metoda pomiaru wskazuje kierunek badań procesu skrawania obejmujących identyfikację cech geometrycznych skrawów realizowanych nożami o różnej geometrii w skałach występujących w wyrobiskach górniczych kopalń podziemnych lub materiałach ekwiwalentnych. Badania te pozwolą na pozyskanie informacji stanowiących rozwinięcie istniejących baz danych o cechach materiałowych urabianych skał, niezbędnych dla realizacji komputerowej symulacji procesu roboczego maszyn urabiających.

Literatura

1. Dolipski M., Cheluska P.: Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2002.
2. Dziędział J.: Wyznaczenie geometrii skrawów wykonanych nożami stożkowymi na drodze skanowania laserowego. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału

- Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Dr hab. inż. Piotra Cheluski, prof. nzw. w Pol.Śl. Gliwice, 2014.
3. *Frenyo P., Lange W.*: Die Auslegung von Schneidköpfen für optimale Löseleistungen. Glückauf 129(1993) Nr. 7, s. 524÷531.
 4. *Hekimoglu O.Z., Fowell R.J.*: Theoretical and practical aspects of circumferential pick spacing on boom tunneling machine cutting heads. Mining Science and Technology 13(1991), nr 3, p. 257÷270.
 5. *Jonak J.*: Badania stanowiskowe wpływu wybranych parametrów noży urabiających na efekty urabiania skał. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1991.
 6. *Jonak J.*: Wpływ wybranych parametrów noży urabiających na efekty urabiania skał. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 218, Gliwice 1994, s.67÷95.
 7. *Jonak J.*: Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi. Wyd. Śląsk, Katowice 2002.
 8. *Klich A.* (red.): Maszyny i urządzenia dla inżynierii budownictwa podziemnego. Wyrobiska korytarzowe i szybowe w górnictwie. Wyd. Śląsk, Katowice 1999.
 9. *Knissel W., Wiese F.*: Möglichkeiten zur Verbesserung des Lösevorgangs von Teilschnitt-Vortirebsmaschinen. Glückauf 117(1981), Nr. 20, s. 1360÷1366.
 10. *Mahnert U., Gerhardt H., Bellmann A.*: Untersuchungen zur Gesteinszerspannung mit Rundschaftmeißeln im Hinblick auf die rechnergestützte Meißelbestückung und dimensionierung von Teilschnittgewinnungsorganen. Neue Bergbautechnik 18(1988) Nr. 10, s. 375÷381.
 11. *Tiryaki B., Ayhan M., Hekimoglu O.Z.*: A New komputer program for cutting head design of roadheaders and drum shearers. Proc. of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001.
 12. *Vasek J., Pinka J.*: Research into the critical state of rock cutting tools. Archives of Mining Science 51(2006), Iss. 3, p. 355÷369.
 13. *Wiese H.-F.*: Grundlagenuntersuchung zur Optimierung der Lösearbeit von Teilschnitt-Vortirebsmaschinen mit Querschneidkop. Diss. TU Clausthal, 1982.
 14. M2-iLAN-2 Laser Scanner. User manual.
 15. MelTrax Software for SeamTracking. Software Manual.
 16. <http://marel.superhost.pl>

NACZELNY REDAKTOR

w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie

POLEMIKI – DYSKUSJI.

Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.

Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań – zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!