

Porównanie charakterystyk energetycznych urabiania kombajnem chodnikowym z głowicami poprzecznymi o zróżnicowanej konstrukcji

Comparison of energy characteristics of cutting using a roadheader with transverse cutting heads of varied construction



*Dr hab. inż. Piotr Cheluszka,
prof. PŚ**



*Dr inż. Piotr Sobota**



*Mgr inż. Grzegorz Głuszek**

Treść: W Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej prowadzone są badania doświadczalne obejmujące urabianie bloku wykonanego z materiałów ekwiwalentnych kombajnem R-130 zainstalowanym na stanowisku badawczym. Wykonywanie skrawów równoległych do podłoża realizowane jest podczas wychylania wysięgnika kombajnu wyposażonego w głowice poprzeczne o zróżnicowanej konstrukcji. Kombajn chodnikowy wyposażony jest w układ pomiarowy rejestrujący parametry procesu urabiania. Dla potrzeb analizy obciążenia układu urabiania kombajnu chodnikowego z zarejestrowanych podczas realizacji procesu urabiania przebiegów czasowych wyznaczono prędkość wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża, moc mechaniczną silnika układu urabiania, wydajność, energochłonność urabiania oraz wskaźniki charakteryzujące proces urabiania. Dla wybranych skrawów przeanalizowano wpływ prędkości kątowej dwóch głowic o różnej konstrukcji na charakterystyki energetyczne procesu urabiania.

Abstract: The Department of Mining Mechanization and Robotization of the Faculty of Mining and Geology of the Silesian University of Technology conducts experimental research covering cutting of a block made of equivalent materials using R-130 roadheader installed on a test station. Cuts parallel to the floor are carried out during swinging of a boom of a roadheader equipped with transverse cutting heads of varied construction. A roadheader is equipped with a measuring system which is recording the parameters of the cutting process. For the purposes of the analysis of a roadheader cutting system load on the basis of time lines registered during the cutting process, the speed of a boom deflection in the plane parallel to the floor, cutting system engine mechanical power, efficiency, cutting energy consumption and indicators characterizing the cutting process have been determined. The impact of angular velocity of two cutting heads of different constructions on the cutting process energy characteristics has been analyzed for selected cuts.

Słowa kluczowe:

kombajn chodnikowy, urabianie, energochłonność urabiania, charakterystyki energetyczne urabiania, pomiary

Keywords:

roadheader, cutting, specific energy consumption, cutting process energy characteristics, measurements

1. Wstęp

Drażenie podziemnych wyrobisk korytarzowych dla potrzeb górnictwa węglowego prowadzone jest najczęściej przy użyciu technologii kombajnowej. Proces urabiania skał głowicami urabiającymi kombajnu chodnikowego jest skomplikowany ze względu na jego fizykalną istotę. Świadczą o tym wyniki wielu prac badawczych – teoretycznych

i doświadczalnych realizowanych w różnych ośrodkach naukowych (Balci i in. 2004, Dolipski, Cheluszka 2002, Ebrahimabadi i in. 2011, Kotwica 2015, Li i in. 2013, Podgórski, Jonak 2006, Rojek 2007, Sikora i in. 2000, Zhang i in. 2017). W efekcie, na wydajność urabiania oraz zapotrzebowanie energii niezbędnej do realizacji tego procesu wpływa wiele czynników, w tym stereometria głowic urabiających. W polskim górnictwie węgla kamiennego eksploatowane są aktualnie kombajny chodnikowe o zróżnicowanych wielko-

* Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Gliwice

ściach, wytwarzane przez różnych producentów (głównie FAMUR S.A. i Sandvik). Układy urabiania tych kombajnów wyposażone są w poprzeczne głowice urabiające. Wielkość głowic, kształt pobocznicy, liczba i sposób rozmieszczenia noży na pobocznicy głowicy zależą przy tym od wielkości kombajnu chodnikowego, mocy zainstalowanej w jego układzie urabiania oraz przewidywanej wytrzymałości skał, do urabiania których te głowice są przeznaczone. Zasadniczym ruchem roboczym, któremu towarzyszy proces urabiania czoła przodku jest wychylenie wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu z określoną prędkością kątową (Heiniö 1999). Skała urabiana jest wówczas skrawami równoległymi do spągu. Zmianie ulega przy tym kształt przekroju i parametry geometryczne wykonywanego skrawu, a głowice urabiające kombajnu przecinają w tym czasie różne warstwy o określonej wytrzymałości na ściskanie.

W Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa na Wydziale Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej prowadzone są badania nad możliwością redukcji obciążeń dynamicznych układu urabiania kombajnu chodnikowego i obniżenia energochłonności urabiania. Do osiągnięcia tego celu niezbędna jest znajomość obciążenia głowic urabiających i układu urabiania kombajnu chodnikowego w zależności od prędkości kątowej głowic urabiających i prędkości ich przemieszczania. W obszarze badań doświadczalnych prace obejmują skrawanie bloku wykonanego z materiałów ekwiwalentnych, zbudowanego w warstw o różnej wytrzymałości na ściskanie, na stanowisku badawczym wyposażonym w kombajn chodnikowy R-130.

2. Stanowisko badawcze

Do badań stanowiskowych wybrany został kombajn chodnikowy R-130 (rys.1), który przygotowany został przez

producenta (firmę FAMUR S.A.) do zabudowy czujników pomiarowych na stanowisku badawczym. Dla potrzeb pomiaru i rejestracji charakterystyk dynamicznych oraz przebiegu parametrów pracy kombajnu chodnikowego podczas realizacji procesu urabiania zaprojektowano tory pomiarowe oraz dokonano konfiguracji zestawu czujników oraz układu do akwizycji, przetwarzania i archiwizacji danych pomiarowych. Układ pomiarowy tworzy 75 torów pomiarowych umożliwiających pomiar i rejestrację istotnych, z punktu widzenia dynamiki kombajnu chodnikowego, charakterystyk.

Zaprojektowane i wykonane tory pomiarowe umożliwiają rejestrację następujących przebiegów (Cheluska i in. 2015):

- momentu i prędkości kątowej na wale silnika elektrycznego układu urabiania mierzonych z wykorzystaniem momentomierza,
- ciśnienia i natężenia przepływu medium roboczego w układzie hydraulicznym za pomocą czujników ciśnienia i przepływomierzy włączonych w układ zasilania siłowników wychylenia wysięgnika,
- sił oddziaływania podwozia kombajnu chodnikowego na podłoże mierzonych za pomocą czujników sił w punktach podparcia,
- kątów wychylenia wysięgnika mierzona za pomocą czujników linkowych,
- przemieszczenia kombajnu chodnikowego do czoła bloku mierzonych za pomocą czujnika linkowego,
- przyspieszenia drgań w wybranych punktach kombajnu (wysięgnika, obrotnicy, ramy głównej kombajnu, fotela operatora) mierzonych za pomocą akcelerometrów,
- temperatury silnika elektrycznego w układzie urabiania mierzonej za pomocą termometru rezystancyjnego,
- charakteryzujących przepływ energii w układzie zasilania silnika elektrycznego układu urabiania mierzonych za pomocą przetworników napięcia i prądów,
- obciążenia dynamicznego wybranej grupy trzech noży



Rys. 1. Obiekt badań: kombajn chodnikowy R-130 na stanowisku badawczym wraz z torami pomiarowymi
Fig. 1. The research subject : R-130 roadheader on a test station with measuring system

urabiających mierzonych za pomocą specjalistycznych trójosiowych czujników sił.

W celu wyznaczenia energochłonności urabiania badanego kombajnu chodnikowego, wykorzystano pomiary momentu obrotowego i prędkości kątowej wirnika silnika w napędzie głowic urabiających z pomocą momentomierza.

Położenie głowic urabiających w przestrzeni roboczej określano za pomocą kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża i jego kąta wychylenia w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża. Ruch poziomy wysięgnika określany był za pomocą czujnika linkowego, którego korpus zamocowany jest na specjalnym wsporniku do ramy kombajnu, a koniec linki pomiarowej przymocowany jest do korpusu obrotnicy. Do określenia wychylenia pionowego wysięgnika kombajnu wykorzystano sygnał z czujnika linkowego mierzącego wysunięcie tłoczek siłowników podnoszenia wysięgnika. Korpus czujnika linkowego zamocowany jest za pomocą obejm do cylindra siłownika, a koniec linki – do ucha wysuwającego się tłoczyska.

Silnik napędowy w układzie urabiania kombajnu chodnikowego na stanowisku badawczym zasilany jest przez przełącznik częstotliwości umożliwiający regulację prędkości kątowej głowic urabiających. Częstotliwość zadaną napięcia zasilania silnika w układzie urabiania f_{ZAD} zmieniano w zakresie od 30 Hz do 50 Hz.

Dla potrzeb wyznaczenia charakterystyk energetycznych kombajnu chodnikowego na stanowisku badawczym skrawki wykonywane były w bloku z materiałów ekwiwalentnych (mas cementowo-piaskowych). Zastosowanie tego rodzaju materiałów dało możliwość wykonania bloku o wymiarach gabarytowych dostosowanych do zasięgu urabiania badanego

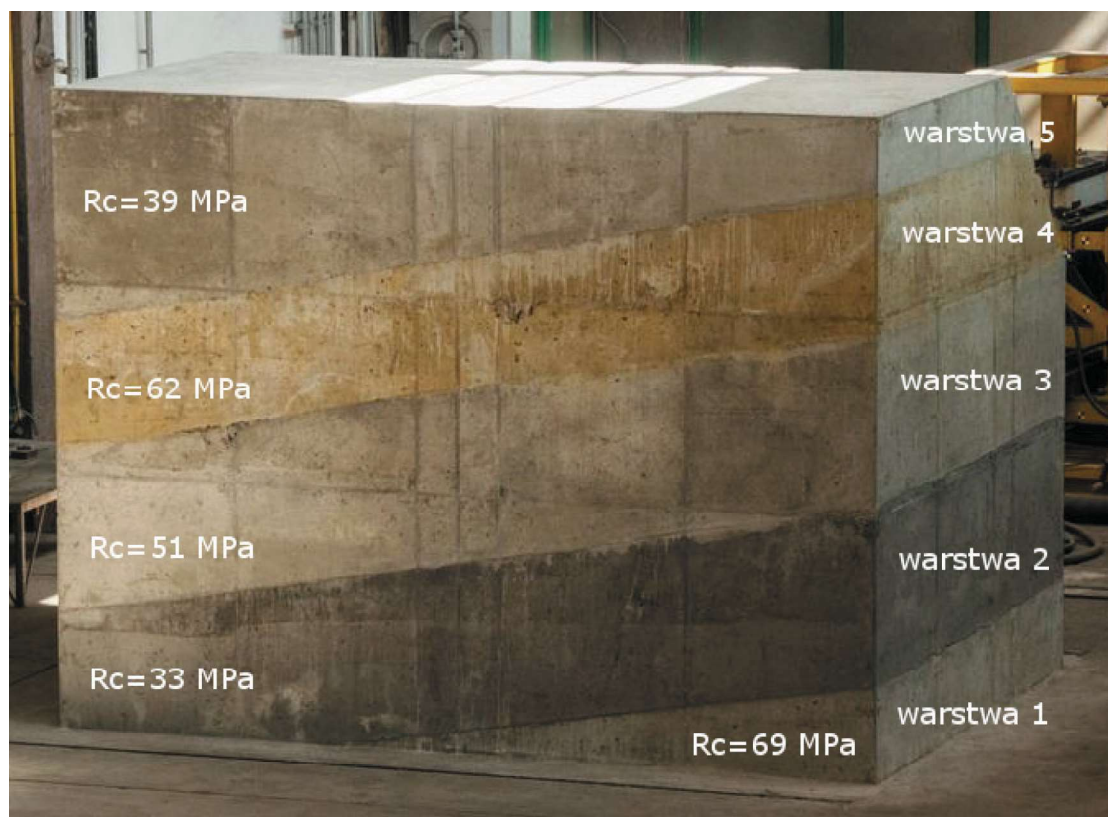
kombajnu oraz budowie warstwowej (urabiany blok tworzą warstwy o różnych własnościach mechanicznych). Możliwe jest dzięki temu prowadzenie badań eksperymentalnych w zdeterminowanych warunkach, jeśli chodzi o własności urabianego materiału, co w przypadku rzeczywistych warunków eksploatacyjnych nie jest praktycznie możliwe. Na rysunku 2 pokazano wykonany blok cementowo-piaskowy o wymiarach (szerokość \times wysokość \times głębokość): $4 \times 3 \times 3$ m, przed rozpoczęciem urabiania.

Charakterystyki energetyczne procesu urabiania kombajnem chodnikowym R-130 na stanowisku badawczym wyznaczono dla dwóch typów głowic poprzecznych o zróżnicowanej konstrukcji, oznaczonych jako A i B.

Produkowana seryjnie głowica urabiająca typu A (rys.3) może być stosowana w kombajnach chodnikowych R-130 lub R-150. Przy prędkości kątowej głowicy $\omega_G = 7,65$ rad/s, wierzchołki noży umieszczone na maksymalnej średnicy $D_{MAX} = 714$ mm skrawają skałę z prędkością $v = 2,7$ m/s. Wyposażona jest ona w 40 noży rozmieszczonych na korpusie głowicy wzdłuż czterech spiral o dużym kącie zwicia i uporządkowanych w grupach wchodzących równocześnie w kontakt z urabianą skałą wzdłuż spiral o małym kącie zwicia. W jednej linii skrawania rozmieszczone są przy tym dwa noże.

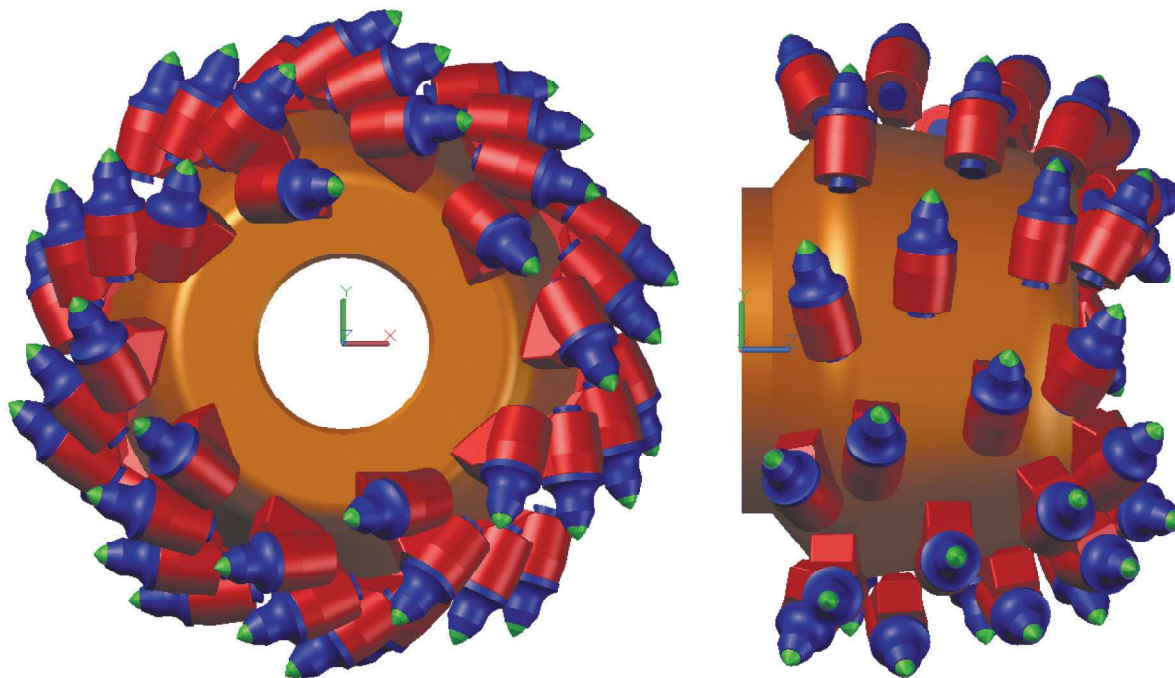
Podstawowe parametry stereometryczne głowicy A są następujące:

- średnica maksymalna obwiedni ostrzy noży $D_{MAX} = 714$ mm;
- średnica minimalna obwiedni ostrzy noży $D_{MIN} = 332$ mm;
- średnica minimalna obwiedni ostrzy noży od strony reduktora $D_R = 650$ mm;
- długość głowicy mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy po wierzchołkach skrajnych noży $L_G = 446$ mm;



Rys. 2. Blok cementowo-piaskowy o budowie warstwowej na stanowisku badawczym w Hali Technologicznej Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej (dla każdej warstwy podano wytrzymałość na ściskanie)

Fig. 2. A cement and sand block located on a test station in the Technological Hall of the Faculty of Mining and Geology of the Silesian University of Technology (compression strength has been given to each layer)



Rys.3. Rozmieszczenie noży na głowicy urabiającej A
Fig. 3. Arrangement of cutting picks on cutting head A

- długość zasadniczej części głowicy mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy od wierzchołków noży na maksymalnej średnicy do noży na końcu głowicy $L_z = 325$ mm;
- długość części głowicy od strony reduktora mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy od wierzchołków noży na maksymalnej średnicy do noży przy podstawie głowicy $L_R = 121$ mm;
- całkowita liczba noży $N = 40$;
- liczba noży na zasadniczej części głowicy $N_z = 30$;
- liczba noży od strony reduktora $N_R = 10$.

Głowica typu B zaprojektowana została w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa na Wydziale Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej dla potrzeb badań stanowiskowych. Na korpusie głowicy typu B rozmieszczono 54 noże wzdłuż trzech spiral o dużym kącie zwicia oraz uporządkowano w grupach, w których noże wchodzi kolejno w kontakt z urabianą skałą, poprzez rozmieszczenie ich na spiralach o małym kącie zwicia (rys. 4). Dzięki temu stereometria głowicy charakteryzuje się wysokim stopniem uporządkowania uchwytów i noży skrawających. W jednej linii skrawania rozmieszczone są przy tym trzy noże.

Rys. 4

Podstawowe parametry zaprojektowanej głowicy B są następujące:

- średnica maksymalna obwiedni ostrzy noży $D_{MAX} = 800$ mm;
- średnica minimalna obwiedni ostrzy noży na końcu głowicy $D_{MIN} = 300$ mm;
- średnica minimalna obwiedni ostrzy noży od strony reduktora $D_R = 640$ mm;
- długość głowicy mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy po wierzchołkach skrajnych noży $L_G = 466$ mm;
- długość zasadniczej części głowicy mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy od wierzchołków noży na maksymalnej średnicy do noży na końcu głowicy $L_z = 331$ mm;
- długość części głowicy od strony reduktora mierzona wzdłuż osi obrotu głowicy od wierzchołków noży na maksymalnej średnicy do noży przy podstawie głowicy $L_R = 135$ mm;

- całkowita liczba noży $N = 54$;
- liczba noży na zasadniczej części głowicy $N_z = 45$;
- liczba noży od strony reduktora $N_R = 9$.

Obydwie badane głowice urabiające zostały wyposażone w noże stożkowe tego samego typu, o wysunięciu z uchwytu $l_n = 64$ mm i kącie ostrza $\beta = 93^\circ$.

3. Charakterystyki energetyczne urabiania kombajnem chodnikowym

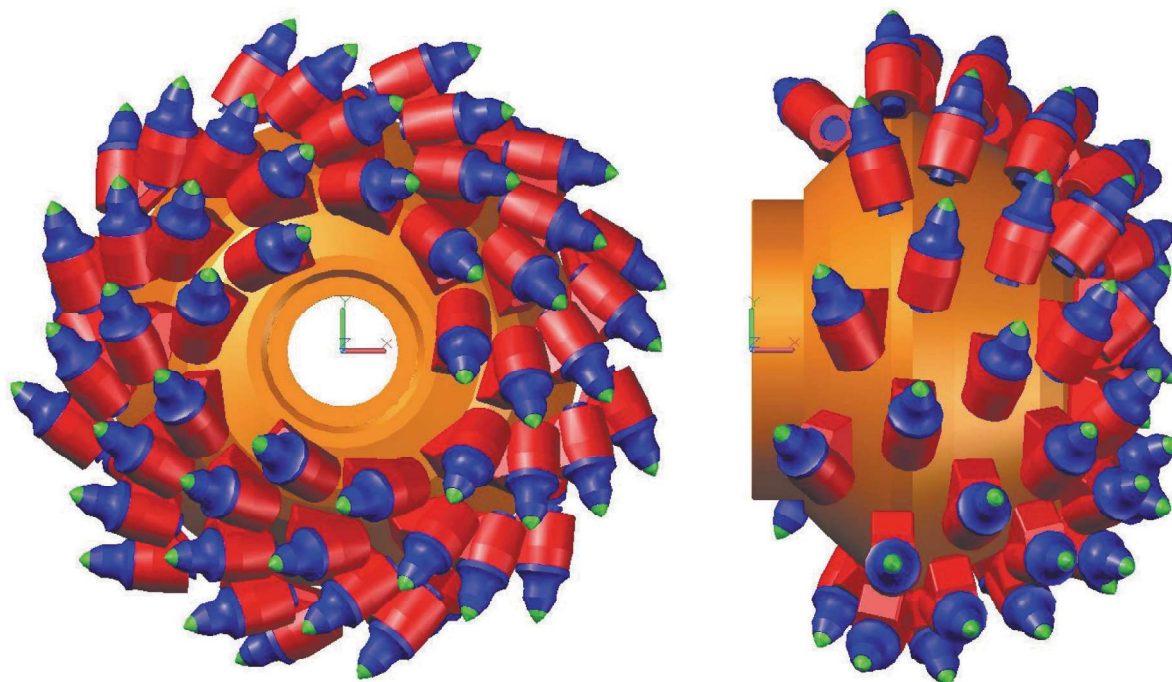
Dla potrzeb analizy obciążenia układu urabiania kombajnu chodnikowego z zarejestrowanych podczas realizacji procesu urabiania przebiegów czasowych, dla dwóch typów głowic urabiających, wyznaczono prędkość wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża v_{ow} , moc mechaniczną silnika układu urabiania P , wydajność Q , energochłonność urabiania E_i oraz wskaźnik energochłonności W_{EI} charakteryzujący proces urabiania.

Ze względu na powtarzalność obciążenia noży rozmieszczonych na głowicy urabiającej po pełnym obrocie głowicy, czas urabiania podzielono na przedziały odpowiadające okresowi obrotu głowicy. Wykorzystano w tym celu znacznik obrotów głowicy zamontowany pomiędzy prawą głowicą a korpusem przekładni zębatej. Wszystkie analizowane parametry uśredniono w przedziałach odpowiadających okresowi obrotu głowicy urabiającej. Różnica kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża $\Delta\alpha_H$ na początku i końcu przedziału była podstawą do określenia średniej prędkości obwodowej wychylenia wysięgnika dla każdego obrotu głowicy, którą wyznaczono z zależności:

$$v_{ow} = \sqrt{(L_2 + L_1 \cdot \cos\alpha_V)^2 + L_3^2} \cdot \Delta\alpha_H / t_G \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

gdzie:

- L_1 – długość wysięgnika [m],
- L_2 – odległość osi obrotu wysięgnika od osi obrotu obrotnicy [m],



Rys.4. Rozmieszczenie noży na głowicy urabiającej B
Fig. 4. Arrangement of cutting picks on cutting head B

- L_s – odległość noży rozmieszczonych na maksymalnej średnicy głowicy od osi wysięgnika [m],
 α_v – kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [rad],
 $\Delta\alpha_H$ – przyrost wartości kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża w czasie jednego obrotu głowicy [rad],
 t_G – okres obrotu głowicy [s].

Energochłonność jednostkowa urabiania E_j stanowi syntetyczny wskaźnik charakteryzujący energię (pracę) wymaganą do urobienia jednostki objętości skały (Balci i in. 2004). Wychodząc z definicji tego wskaźnika, uwzględniając wielkości mierzone w trakcie realizacji badań doświadczalnych, wyznaczony on został z następującej zależności:

$$E_j = M_{MI} \cdot j_{MI} / 1000 \cdot v_{OW} \cdot S \quad [\text{kWh/m}^3] \quad (2)$$

gdzie:

- M_{MI} – średni moment obrotowy silnika układu urabiania [Nm],
 j_{MI} – średnia prędkość kątowa wirnika silnika [rad/s],
 S – uśrednione pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu [m²],
 v_{OW} – uśredniona prędkość obwodowa wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża [m/s].

Aby porównać, dla analizowanych skrawów, wpływ wartości wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału na przebieg charakterystyk energetycznych wyznaczono wskaźnik energochłonności W_{E1} będący stosunkiem uśrednionej na obrót głowicy urabiającej energochłonności urabiania i wytrzymałości na ściskanie warstw leżących w przekroju skrawu:

$$W_{E1} = \frac{E_j}{R_c} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{MPa}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

- E_j – średnia energochłonność jednostkowa urabiania w

czasie jednego obrotu głowicy urabiającej [kWh/m³],

R_c – średnia wytrzymałość warstw urabianych w czasie jednego obrotu głowicy urabiającej [MPa].

Wskaźnik energochłonności W_{E1} określający energochłonność jednostkową urabiania przypadającą na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału, umożliwia porównanie energii urabiania przy skrawaniu warstw o zróżnicowanej wytrzymałości.

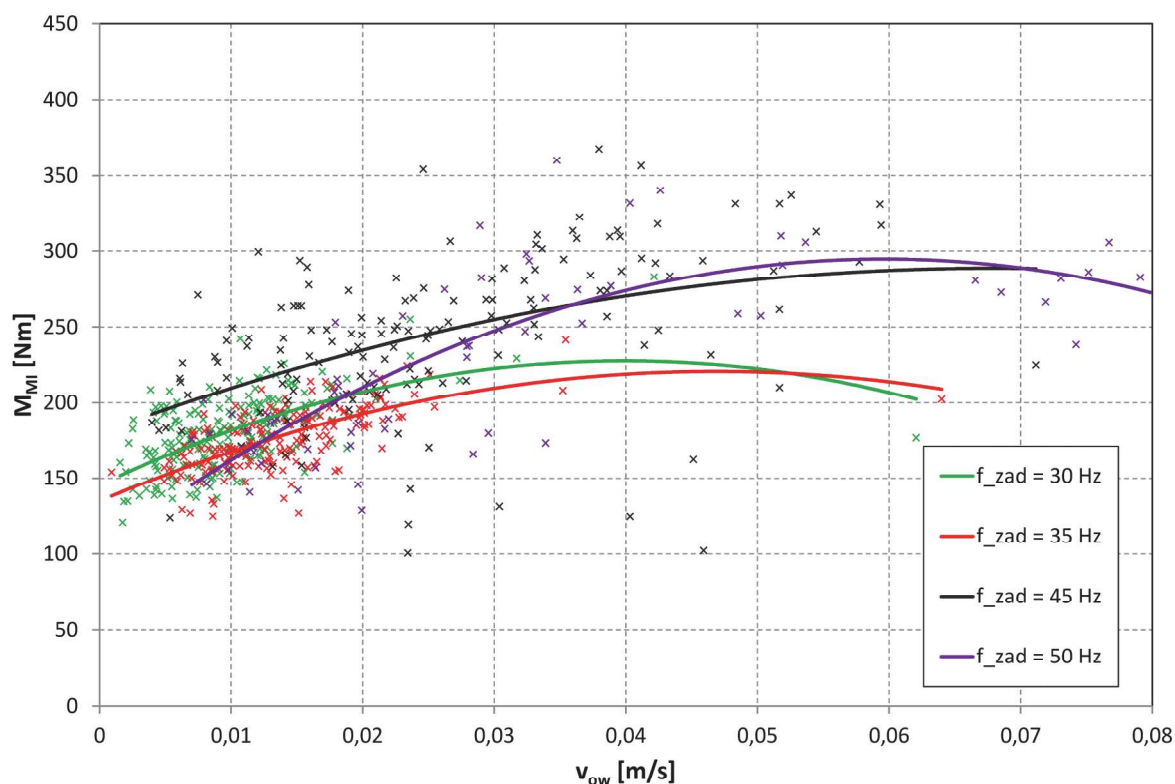
4. Wpływ prędkości kątowej głowic urabiających typu A na energochłonność urabiania

Analizie poddano cztery skrawy górne, równoległe do podłoża, oznaczone jako nr 20, nr 21, nr 44 i nr 24, wykonane głowicą prawą w trakcie wychylenia wysięgnika w prawo. Wybrane do analizy skrawy zrealizowane były przy różnych wartościach częstotliwości napięcia zasilania silnika elektrycznego napędu głowic f_{ZAD} (przy różnych prędkościach kątowych głowic φ_G), przy czym pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawów S były do siebie zbliżone (tab.1).

Uśrednione na obrót głowicy wartości momentu obrotowego M_{MI} są bardzo zróżnicowane, co jest efektem dużej dynamiki procesu urabiania głowicami kombajnu chodnikowego. Zależności uśrednionego momentu obrotowego od prędkości wychylenia wysięgnika dla różnych prędkości kątowych głowicy tworzą chmury punktów. Wyznaczone dla tych zbiorów linie trendu opisane wielomianem drugiego stopnia mają jednak ten sam charakter – ze wzrostem prędkości wychylenia wysięgnika obciążenie napędu głowic urabiających najpierw rośnie, a po osiągnięciu maksimum – maleje (rys. 5). Podobnie przedstawiają się zależności mocy mechanicznej od prędkości wychylenia wysięgnika. Jednak zbiory punktów układają się na innych poziomach, co jest efektem zróżnicowania prędkości kątowych głowic urabiających – im mniejsza prędkość kątowa głowic (mniejsza częstotliwość napięcia zasilania) tym mniejsze wartości mocy.

Tablica 1. Parametry procesu urabiania podczas wykonywania analizowanych skrawów
Table 1. Parameters of the cutting process during the analyzed cuts

Oznaczenie skrawu	Typ głowicy	Częstotliwość napięcia zasilania f_{ZAD}	Kąt wychylenia wysięgnika α_r	Pole powierzchni poprzecznego przekroju skrawu $S_{max} \cdot 10^4$
		Hz	stopnie	m ²
nr 20	A	30	7,1	215
nr 21	A	35	8,9	202
nr 44	A	45	-1,2	195
nr 24	A	50	15,1	215



Rys. 5. Zależność uśrednionego momentu obrotowego M_{Mi} od prędkości wychylenia wysięgnika v_{OW} dla różnych prędkości kątowych głowicy urabiającej typu A

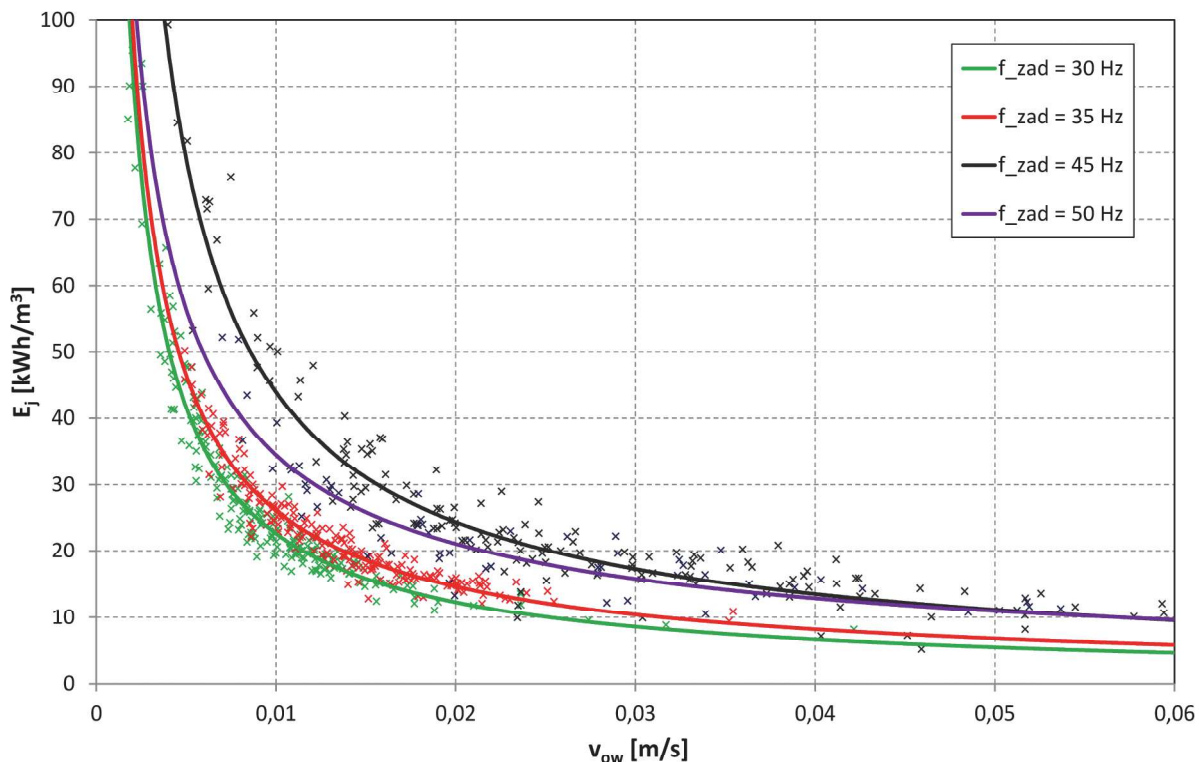
Fig. 5. Dependency of averaged torque M_{Mi} on the velocity of a roadheader boom deflection v_{OW} for various angular velocities of cutting head type A

Na zależność średniej energochłonności urabiania E_j od prędkości wychylenia wysięgnika wyraźnie wpływa prędkość kątowa głowic urabiających (rys. 6). Im mniejsze wartości częstotliwości napięcia zasilania, tym niżej położone są linie odwzorowujące badaną zależność. Jedynie charakterystyka energetyczna skrawu nr 44 (linia w kolorze czarnym na rys.6), wyznaczona dla urabiania z prędkością kątową wirnika silnika $\dot{\phi}_{Mi} = 141,4$ rad/s (dla częstotliwości napięcia $f_{ZAD} = 45$ Hz), położona jest powyżej charakterystyki skrawu nr 24 wykonywanego przy częstotliwości $f_{ZAD} = 50$ Hz.

Ponieważ analizowane skrawy wykonywane były przy różnych wartościach kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża α_r , skrawy przecinały ukośne warstwy bloku o różnej wytrzymałości. Miało to wpływ na energochłonność urabiania E_j . Wytrzymałość warstw bloku cementowo-piaskowego, w których wykonane były analizowane skrawy była bardzo zróżnicowana. Skraw nr 20 rozpoczął się w warstwie piątej o wytrzymałości $R_c = 39$ MPa, a kończył w warstwie czwartej o wytrzymałości $R_c = 62$ MPa (rys. 2). Podobnie skraw nr 21 przecinał te dwie warstwy,

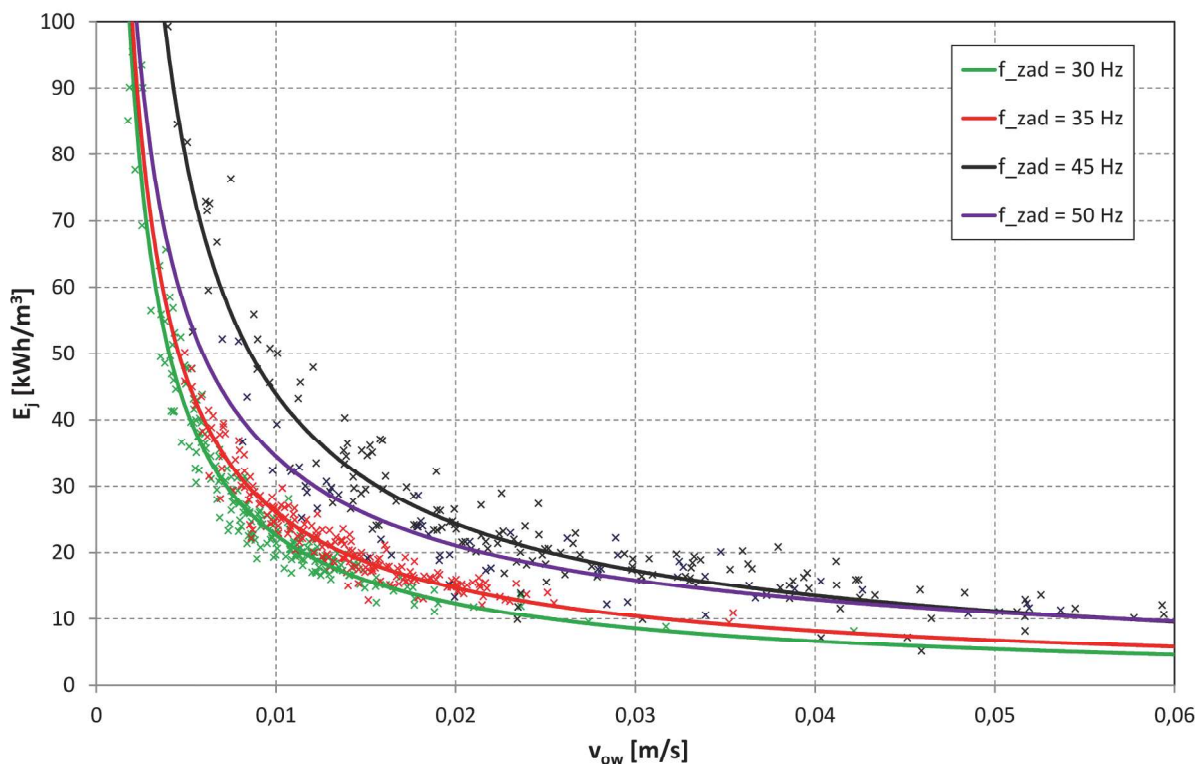
jednak znacznie większa jego część została zrealizowana w warstwie piątej o wytrzymałości na ścisnienie wynoszącej 39 MPa. Skraw nr 44 wykonywany był w warstwach czwartej i trzeciej, głównie w warstwie czwartej. Natomiast cały skraw nr 24 został wykonany w warstwie piątej. Zmienność wytrzymałości na ścisnienie urabianego materiału w miarę przemieszczania się głowic urabiających dla rozpatrywanych skrawów pokazano na rys.7.

Aby porównać, dla analizowanych skrawów, wpływ prędkości kątowej głowicy na przebieg charakterystyk energetycznych wyznaczono wskaźnik energochłonności W_{EI} według wzoru (3), uwzględniający wytrzymałość na ścisnienie warstw bloku znajdujących się w przekroju poprzecznym skrawu. Krzywe odwzorowujące zależność wskaźnika W_{EI} od prędkości v_{OW} , wyznaczone dla poszczególnych skrawów (rys. 8) układają się na różnych poziomach zależnych od prędkości kątowej głowic urabiających (od częstotliwości napięcia zasilania silnika w układzie urabiania). Przebieg zależności wskaźnika energochłonności procesu urabiania dla skrawu nr 44 (linia w kolorze czarnym na rys. 8), wyznaczony dla ura-



Rys. 6. Zależność średniej energochłonności urabiania E_j od prędkości wychylania wysięgnika v_{ow} dla różnych prędkości kątowych głowicy urabiającej A

Fig. 6. Dependency of average specific energy consumption E_j on the velocity of a roadheader boom deflection v_{ow} for various angular velocities of cutting head type A



Rys.7. Zmienność wytrzymałości urabianych warstw na ściskanie R_c przy wykonywaniu skrawów głowicą urabiającą typu A

Fig. 7 Variability of uniaxial compressive strength of excavated layers R_c during cuts using cutting head type A

biania przy prędkości kątowej odpowiadającej częstotliwości napięcia $f_{ZAD} = 45$ Hz, położony jest poniżej charakterystyki dla skrawu nr 24 (dla częstotliwości napięcia $f_{ZAD} = 50$ Hz). Wyznaczone dla rozpatrywanych skrawów badane charakterystyki są wyraźnie zależne od częstotliwości napięcia zasilania silnika układu urabiania. Im mniejsze wartości tej częstotliwości, tym niżej położone są te charakterystyki, co oznacza mniejszą energochłonność urabiania przypadającą na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału przy tej samej prędkości wychylania wysięgnika.

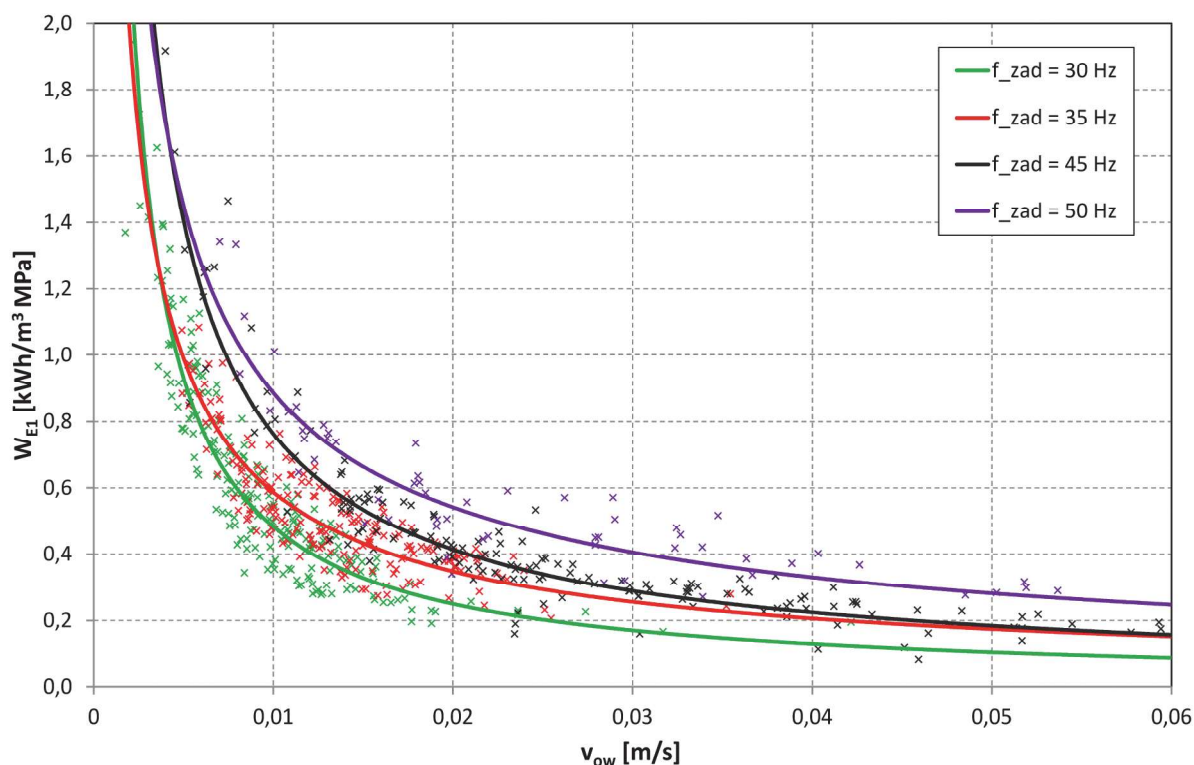
5. Wpływ prędkości kątowej głowic urabiających typu B na energochłonność urabiania

Analizie poddano cztery skrawy górne, równoległe do podłoża, oznaczone jako nr 69, nr 73, nr 77 i nr 80, wykonane głowicą typu B w trakcie wychylania wysięgnika w prawo. Wybrane do analizy skrawy zrealizowane były przy takich samych, jak dla głowicy A, wartościach częstotliwości napięcia

zasilania silnika elektrycznego napędu głowic urabiających (przy takich samych prędkościach kątowych głowic urabiających), przy czym pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawów S były do siebie zbliżone (tab. 2).

Podobnie, jak dla głowicy typu A, uśrednione na obrót głowicy wartości momentu obrotowego M_{Ml} są bardzo zróżnicowane, co jest efektem dużej dynamiki procesu urabiania głowicami kombajnu chodnikowego. Zależności uśrednionego momentu obrotowego od prędkości wychylania wysięgnika dla różnych prędkości kątowych głowicy tworzą chmury punktów, lecz wyznaczone dla tych zbiorów linie trendu opisane wielomianem drugiego stopnia mają podobny charakter – ze wzrostem prędkości wychylania wysięgnika v_{ow} obciążenie napędu głowic urabiających najpierw rośnie, a po osiągnięciu maksimum – maleje (rys. 9).

Głowice typu B wykonywały analizowane skrawy ze zróżnicowanym udziałem warstwy trzeciej o wytrzymałości $R_c = 51$ MPa oraz warstwy czwartej o wytrzymałości $R_c = 62$ MPa (rys. 2). Stąd, średnia wytrzymałość urabianego materiału zawiera się w granicach od 51 do 62 MPa (rys.10).



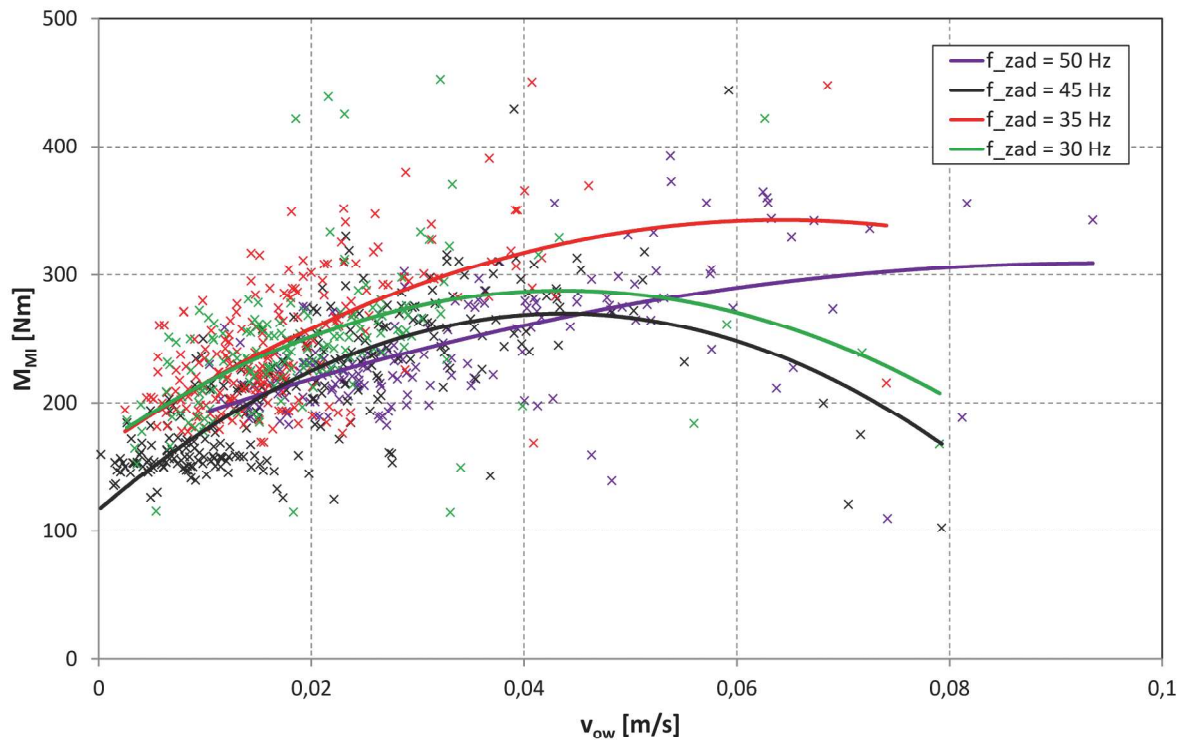
Rys. 8. Zależność wskaźnika energochłonności W_{El} od prędkości wychylania wysięgnika v_{ow} dla skrawów wykonywanych głowicą urabiającą typu A

Fig. 8. Dependency of W_{El} energy consumption indicator on the velocity of a boom deflection v_{ow} for cuts made using cutting head type A

Tab. 2. Parametry procesu urabiania podczas wykonywania analizowanych skrawów

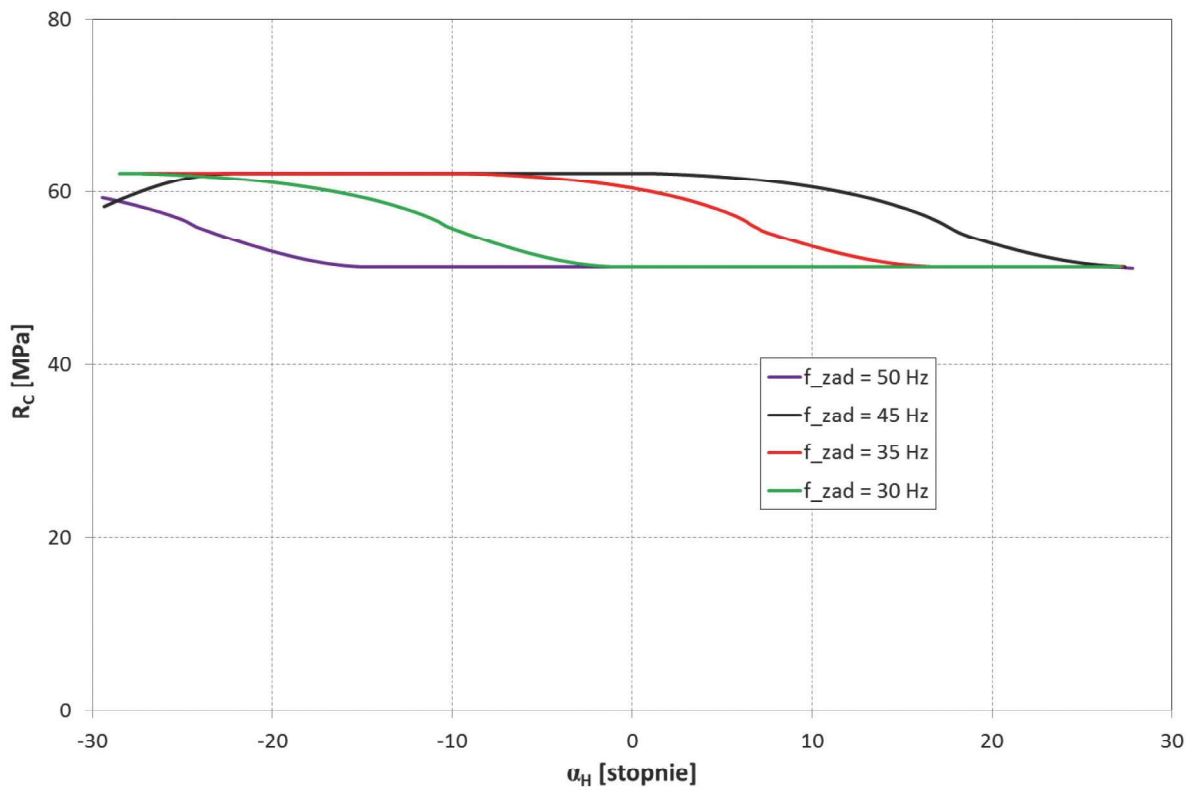
Tab. 2. Parameters of the mining process during the analyzed cuts

Oznaczenie skrawu	Typ głowicy	Częstotliwość napięcia zasilania f_{ZAD}	Kąt wychylenia wysięgnika α_v	Pole powierzchni poprzecznego przekroju skrawu $S_{max} \cdot 10^4$
		Hz	stopnie	m ²
nr 73	B	30	-6,0	249
nr 77	B	35	-2,1	285
nr 80	B	45	0,1	265
nr 69	B	50	-9,6	246



Rys. 9. Zależność uśrednionego momentu obrotowego M_{MI} od prędkości wychylania wysięgnika v_{ow} dla różnych prędkości kątowych głowicy urabiającej typu B

Fig. 9. Dependency of averaged torque M_{MI} on the velocity of a roadheader boom deflection v_{ow} for various angular velocities of cutting head type B



Rys. 10. Zmienność wytrzymałości urabianych warstw na ściskanie R_c przy wykonywaniu rozpatrywanych skrawów głowicą urabiającą typu B

Fig. 10. Variability of uniaxial compressive strength of excavated layers R_c during considered cuts using cutting head type B

Zróznicowanie wytrzymałości urabianego materiału miało wpływ na moment obrotowy, moc i energochłonność urabiania.

Aby porównać dla analizowanych skrawów, wykonywanych w warstwach o zróżnicowanej wytrzymałości na ściskanie, wpływ prędkości kątowej głowicy urabiającej na przebieg charakterystyk energetycznych wyznaczono wskaźnik energochłonności W_{EI} ze wzoru (3) uwzględniający wytrzymałość na ściskanie warstw bloku znajdujących się w przekroju poprzecznym skrawu. Podobnie, jak dla głowicy typu A, zależności wskaźnika energochłonności W_{EI} od prędkości wychylenia wysięgnika mają charakter hiperbolicznie malejący dla wszystkich analizowanych skrawów. Im mniejsze wartości częstotliwości napięcia zasilania, tym niżej położone są linie odwzorowujące badaną zależność (rys. 11), co oznacza mniejszą energochłonność urabiania przy tej samej prędkości wychylenia wysięgnika, przypadającą na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału.

6. Porównanie charakterystyk energetycznych urabiania głowicami poprzecznymi typu A i B

Wyznaczone dla głowic urabiających typu A i B charakterystyki energetyczne procesu urabiania uwzględniające wytrzymałość na ściskanie warstw bloku znajdujących się w przekroju poprzecznym skrawu porównano ze sobą. W tym celu, linie trendu opisujące zależność wartości wskaźnika energochłonności W_{EI} od prędkości wychylenia wysięgnika przedstawiono na rysunku 12, przy czym głowicy typu A odpowiadają linie ciągłe, zaś głowicy typu B – linie przerywane. Dla wszystkich analizowanych prędkości kątowych głowic (dla wszystkich częstotliwości napięcia zasilania silnika elektrycznego napędu głowic) linie przerywane odpowiadające przebiegom wskaźnika energochłonności dla

głowicy B położone są poniżej linii ciągłych odpowiadających przebiegom wskaźnika energochłonności dla głowicy A. Oznacza to, że dla tej samej prędkości wychylenia wysięgnika energia potrzebna do urobienia jednostki objętości skrawanego materiału przypadająca na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału jest mniejsza przy urabianiu głowicą typu B niż przy urabianiu głowicą typu A. Różnice w wartościach wskaźnika energochłonności są tym większe, im większa jest prędkość kątowa głowicy urabiającej (im większa jest częstotliwość napięcia zasilania silnika elektrycznego napędu głowic). Przykładowo, dla prędkości wychylenia wysięgnika kombajnu $v_{ow} = 0,05$ m/s, wskaźnik energochłonności osiąga wartości:

dla $f_{ZAD} = 30$ Hz ($j_G = 5,54$ rad/s):

$W_{EI} = 0,105$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu A

$W_{EI} = 0,104$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu B

dla $f_{ZAD} = 35$ Hz ($j_G = 6,47$ rad/s):

$W_{EI} = 0,172$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu A

$W_{EI} = 0,114$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu B

dla $f_{ZAD} = 45$ Hz ($j_G = 8,32$ rad/s):

$W_{EI} = 0,193$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu A

$W_{EI} = 0,135$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu B

dla $f_{ZAD} = 50$ Hz ($j_G = 9,24$ rad/s):

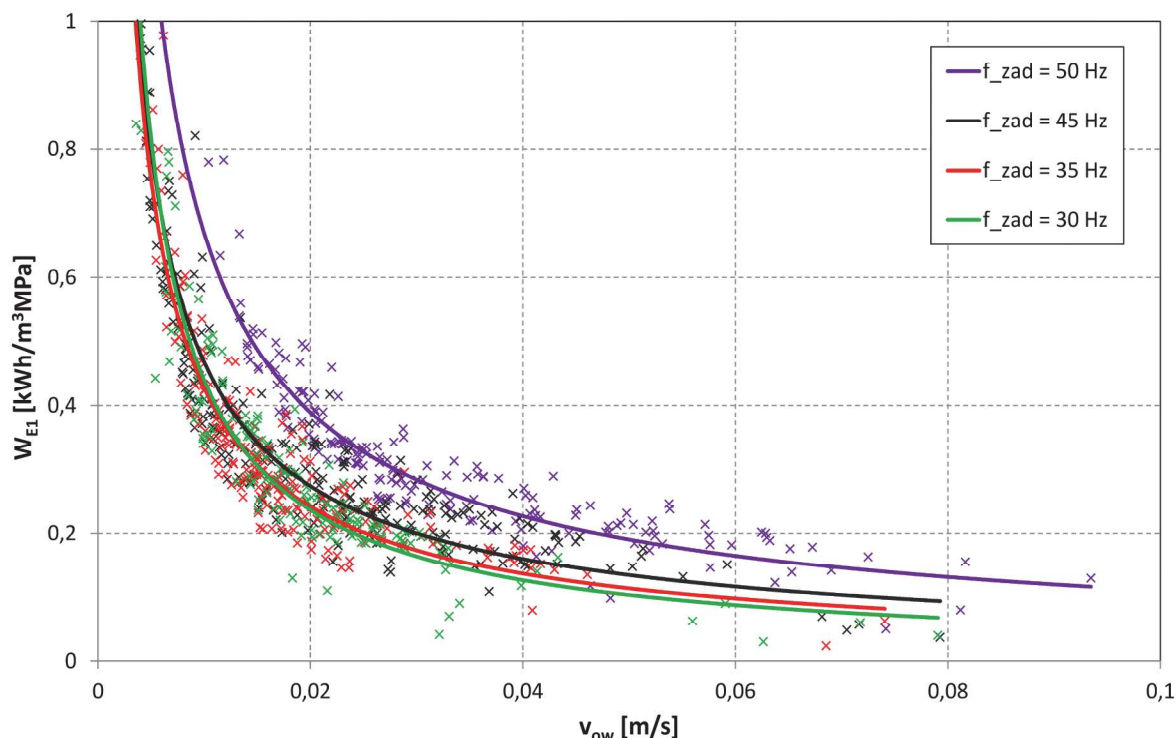
$W_{EI} = 0,282$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu A

$W_{EI} = 0,190$ kWh/m³ MPa – dla głowicy typu B

W całym zakresie zmienności częstotliwości napięcia zasilania silnika elektrycznego napędu głowic urabiających skrawanie głowicą typu B wymaga mniejszej energii niż skrawanie głowicą typu A.

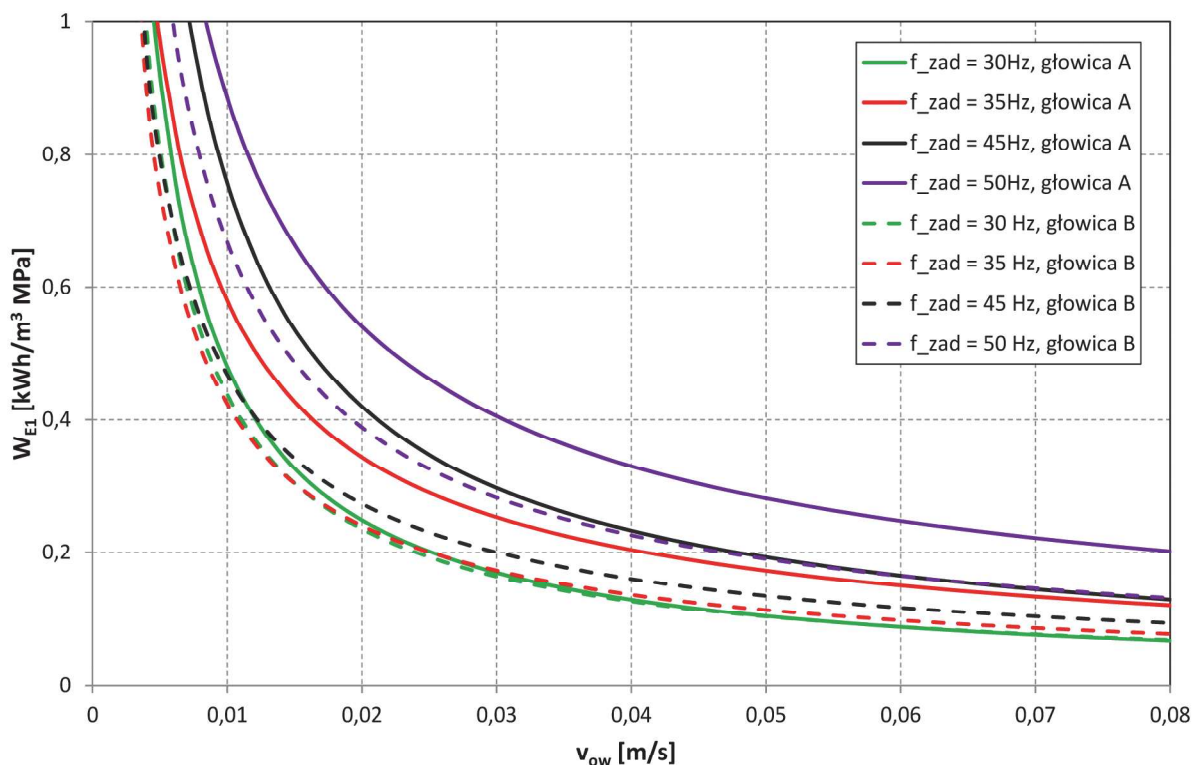
7. Podsumowanie

Stereometria głowic urabiających (kształt pobocznicy, liczba i sposób rozmieszczenia noży na pobocznicy głowicy)



Rys. 11. Zależność wskaźnika energochłonności W_{EI} od prędkości wychylenia wysięgnika v_{ow} dla badanych skrawów wykonywanych głowicą urabiającą typu B

Fig. 11. Dependency of W_{EI} energy consumption indicator on the velocity of a boom deflection v_{ow} for studied cuts made using cutting head type B



Rys. 12. Porównanie zależności wskaźnika energochłonności W_{EI} od prędkości wychylenia wsięgnika v_{OW} dla badanych skrawów wykonywanych głowicami urabiającymi typu A i B

Fig. 12. Comparison of W_{EI} energy consumption indicator dependence on the velocity of a boom deflection v_{OW} for studied cuts made using cutting heads type A and B

ma wpływ na energochłonność urabiania. Wskazują na to między innymi badania doświadczalne realizowane w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa na Wydziale Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, których celem jest określenie możliwości redukcji obciążeń dynamicznych układu urabiania kombajnu chodnikowego i obniżenia energochłonności urabiania. Obejmują one skrawanie bloku, wykonanego z materiałów ekwiwalentnych, zbudowanego z warstw o różnej wytrzymałości na ściskanie, na stanowisku badawczym wyposażonym w kombajn chodnikowy R-130.

Dla wybranych skrawów przeanalizowano wpływ prędkości kątowej dwóch głowic o różnej konstrukcji na charakterystyki energetyczne procesu urabiania. W tym celu zarejestrowane przebiegi czasowe podczas skrawania bloku cementowo-piaskowego uśredniono na okres obrotu głowicy. Wyznaczono prędkość wychylenia wsięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża v_{OW} , moc mechaniczną silnika w układzie urabiania P , wydajność Q i dalej – energochłonność urabiania E_j oraz wskaźnik energochłonności W_{EI} charakteryzujący proces urabiania.

Zarówno dla głowicy typu A, jak i dla głowicy typu B, zależności wskaźnika energochłonności W_{EI} od prędkości wychylenia wsięgnika mają charakter hiperbolicznie malejącej dla wszystkich analizowanych skrawów. Im mniejsze wartości częstotliwości napięcia zasilania, tym niżej położone są przy tym linie odwzorowujące badaną zależność. Oznacza to mniejszą energochłonność urabiania przy tej samej prędkości wychylenia wsięgnika przypadającą na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału.

Dla wszystkich analizowanych prędkości kątowych głowic urabiających (dla wszystkich częstotliwości napięcia zasilania silnika elektrycznego napędu głowic) przebiegi wskaźnika energochłonności W_{EI} dla głowicy B położone są poniżej

przebiegów wskaźnika energochłonności dla głowicy A. Oznacza to, że dla tej samej prędkości wychylenia wsięgnika energia potrzebna do urobienia jednostki objętości skrawanego materiału przypadająca na jednostkę wytrzymałości na ściskanie urabianego materiału jest mniejsza przy urabianiu głowicą typu B niż przy urabianiu głowicą typu A. Różnice w wartościach wskaźnika energochłonności są tym większe, im większa jest prędkość kątowa głowic urabiających.

Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu pt.: „Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych” dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B2/15/2015).

Literatura

- BALCI C., DEMIRCI M.A., COPUR H., TUNCDMIR H. 2004 – Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy Iss. 11, p. 633–641.
- CHELUSZKA P., GLUSZEK G., GIZA T., MANN R., REMIORZ E., SOBOTA P. 2015 – Charakterystyka układu pomiarowego do badań dynamiki kombajnu chodnikowego. Konferencja „Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju 2015”, Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Gliwice.
- DOLIPSKI M., CHELUSZKA P. 2002 – Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- EBRAHIMABADI A., GOSHTASBI K., SHAHRIAR K., CHERAGHI-SEIFABAD M. 2011 – Predictive models for roadheaders' cutting

- performance in coal measure rocks. *Yerbilimleri Dergisi* Vol. 32, Iss. 2, p. 141–168.
- HEINIÖ M. (ed.) 1999 – Rock excavation handbook. Sandvik Tamrock Corp.
- KOTWICA K. 2015 – Nowe rozwiązania narzędzi urabiających oraz uchwytów noży dla organów kombajnów chodnikowych. „Napędy i Sterowanie” nr 4, s. 122–127.
- LI X., HUANG B., MA G., ZENG Q. 2013 – Study on Roadheader Cutting Load at Different Properties of Coal and Rock. *The Scientific World Journal* Vol. 2013, Article ID 624512, pp. 8.
- PODGÓRSKI J., JONAK J. 2006 – Numeryczne badania procesu skrawania skał anizotropowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.
- ROJEK J. 2007 – Discrete element modeling of rock cutting. *Computer Methods in Materials Science* Vol. 7, Iss. 2, p. 224–230.
- SIKORA W. (red.) 2000 – Określenie sił i energochłonności urabiania nożami stożkowymi. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- ZHANG Q., HAN Z., ZHANG M., ZHANG J. 2017 – New model for predicting Instantaneous cutting rate of axial-type roadheaders. *KSCE Journal of Civil Engineering* Vol. 21, Iss. 1, p. 168–177.

Artykuł wpłynął do redakcji - styczeń 2018
Artykuł akceptowano do druku 20.02.2018