

ZAGADNIENIA PEKANIA I SKRAWANIA
MATERIAŁÓW KRUCHYCH

pod redakcją
Józefa Jonaka

MONOGRAFIA

Lublin, 2008

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Józef Jonak, Politechnika Lubelska
Prof. dr hab. inż. Krzysztof Krauze, Akademia Górniczo-Hutnicza
Prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn, Politechnika Białostocka
Prof. dr hab. inż. Janusz Reś, Akademia Górniczo-Hutnicza

Autorzy:

Marta SŁOWIK, Ewa BŁAZIK-BOROWA (rozdz. 1)
Piotr JAREMEK, Miron CZERNIEC (rozdz. 2)
Krzysztof KRAUZE (rozdz. 3)
Jerzy PODGÓRSKI, Józef JONAK (rozdz. 4)
Jerzy PODGÓRSKI, Tomasz NOWICKI (rozdz. 5)
Jakub GAJEWSKI, Józef JONAK (rozdz. 6)

© Copyright by
Lubelskie Towarzystwo Naukowe
Lublin 2008

ISBN 978-83-87833-84-8

Druk: Wydawnictwo-Drukarnia Liber Duo s.c.
ul. Długa 5
20-346 Lublin
liberduo@o2.pl

Wydanie publikacji dofinansowane ze środków
Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Wstęp

Prezentowana monografia dotyczy głównie zagadnień mechaniki pękania materiałów kruchych w wybranych aspektach działalności inżynierskiej. W kolejnych rozdziałach omówiono zagadnienia konstrukcji narzędzi i technologiczne procesy skrawania skał narzędziami dyskowymi oraz symulacje numeryczne tego procesu. Przedstawiono wyniki badań numerycznych propagacji szczelin w ośrodkach kruchych o losowo ukształtowanej strukturze i parametrach wytrzymałościowych oraz przeanalizowano wpływ uziarnienia kruszywa na parametry pękania betonu. Omówiono wybrane aspekty kształtowania się trwałości uzbrojenia świrdrów gryzowych stosowanych w głębokich wierceniach prowadzonych w materiale skalnym oraz rozpatrzono aspekty wykorzystania tzw. sztucznej inteligencji w ocenie stanu narzędzi górniczych, pracujących w kruchym materiale skalnym o silnych właściwościach ściernych względem ostrza narzędzia.

Spis treści

1. WPŁYW UZIARNIENIA KRUSZYWA NA PARAMETRY PĘKANIA BETONU	6
1.1. WPROWADZENIE	6
1.2. WPŁYW UZIARNIENIA KRUSZYWA NA CECHY BETONU	8
1.3. WYNIKI BADAŃ I OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH	11
1.4. PODSUMOWANIE.....	16
1.5. LITERATURA	17
2. ANALIZA MATEMATYCZNA WPŁYWU PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WIERCENIA NA TRWAŁOŚĆ UZBROJENIA ŚWIDRÓW GRYZOWYCH	19
3. BADANIA STANOWISKOWE FREZUJĄCEGO ORGANU ŚLIMAKOWEGO WYPOSAŻONEGO W NARZĘDZIA DYSKOWE ...	29
3.1. WPROWADZENIE	29
3.2. BADANIA FREZUJĄCEGO ORGANU ŚLIMAKOWEGO Z NARZĘDZIAMI DYSKOWYMI.....	32
3.2.1. Plan i metodyka badań.....	33
3.2.2. Stanowisko do badania frezujących organów urabiających	34
3.2.3. Realizacja badań procesu urabiania organami z dyskami i nożami styczno-obrotowymi	36
3.2.4. Opracowanie wyników badań.....	37
3.2.5. Analiza wyników eksperymentu	46
3.2.6. Podsumowanie.....	48
3.3. FREZUJĄCY ORGAN ŚLIMAKOWY PRZEZNACZONY DO BADAŃ RUCHOWYCH	49
3.4. ZAKOŃCZENIE.....	51

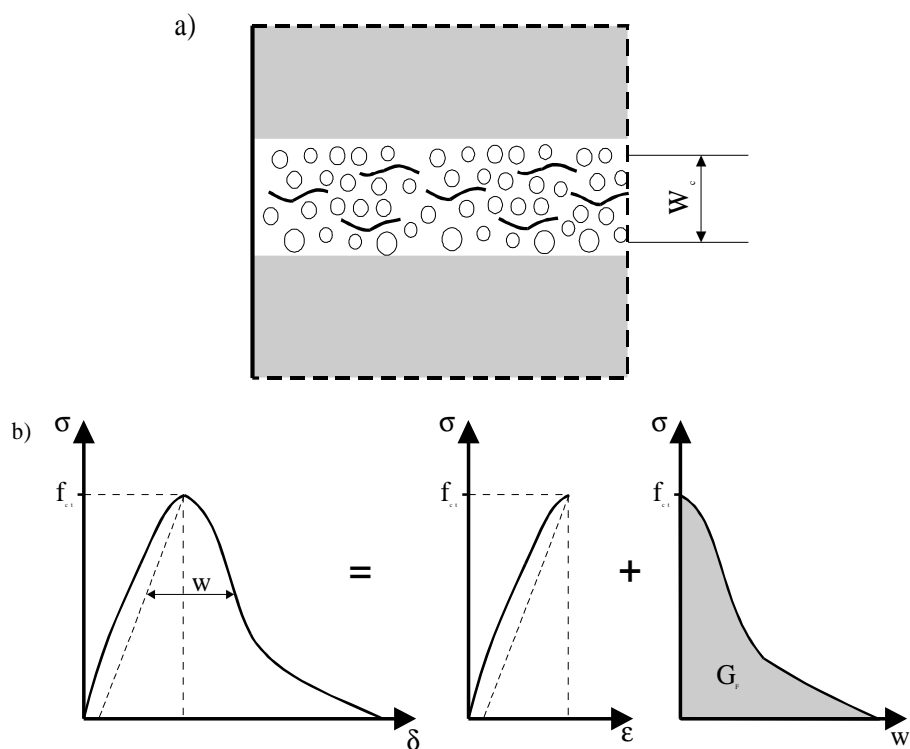
4. BADANIA NUMERYCZNE ODDZIAŁYWANIA DYSKOWEGO NARZĘDZIA URABIAJĄCEGO NA SKAŁĘ.....	52
4.1. WPROWADZENIE	52
4.2. Wpływ proporcji parametrów skrawania: podziałki i głębokości	53
4.3. Założenia analizy MES	55
4.4. Wpływ parametrów wytrzymałościowych skały.....	57
4.5. Wpływ kąta dysku	58
4.6. Wpływ orientacji dysku.....	59
4.7. Podsumowanie.....	61
4.8. Literatura.....	62
5. ANALIZA PROPAGACJI RYSY W MATERIAŁACH	63
O LOSOWEJ STRUKTURZE.....	63
5.1. Generowanie losowej struktury modelu	63
5.2. Analiza pękania	66
5.3. Wnioski.....	69
5.4. Literatura.....	70
6. KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW URABIANIA Z WYKORZYSTANIEM SSN.....	72
6.1. Wprowadzenie	72
6.2. Badania laboratoryjne procesu urabiania.....	73
6.3. Analiza wyników badań.....	77
6.4. Metody klasyfikacji przebiegów czasowych.....	81
6.4.1. Sygnał momentu urabiania	83
6.4.2. Sygnał mocy urabiania	89
6.5. Podsumowanie.....	93
6.6. Literatura.....	93

1. WPŁYW UZIARNIENIA KRUSZYWA NA PARAMETRY PĘKANIA BETONU

1.1. WPROWADZENIE

W klasycznych teoriach, dotyczących wymiarowania konstrukcji z betonu, przy opisie pęknięcia elementów w strefach rozciąganych operuje się wytrzymałością betonu na rozciąganie (np. przy określaniu sił rysujących). Jednak ta cecha materiałowa jest niewystarczająca do pełnego opisu powstawania i rozwoju rys. Bardzo ważna jest inna właściwość betonu, którą w literaturze (np. Hillerborg [1]) nazwano odpornością betonu na rozciąganie (tensile toughness). Gdyby beton był idealnie kruchy (nie posiadał odporności na rozciąganie), to każda rysa prowadziłaby do natychmiastowego zniszczenia. Wpływ odporności na rozciąganie na zachowanie elementu z betonu przy pękaniu można analizować na podstawie metod nieliniowej mechaniki pęknięcia, w ramach których wyróżnia się dwa modele: model rysy fikcyjnej (RF) i model pasma mikrorys (PM). W obu przypadkach beton traktowany jest jako materiał liniowo-sprężysty z osłabieniem w zakresie pokrytycznym. Osłabienie materiału w zakresie pokrytycznym wiąże się ściśle ze zjawiskiem lokalizacji strefy zarysowania i zniszczenia, w której koncentrują się wydłużenia elementu, powodując odciążenie jego pozostałej części. Pełną charakterystykę materiałową betonu, definiowaną w ramach nieliniowej mechaniki pęknięcia, określa się na podstawie zależności siła rozciągająca-wydłużenie całkowite, uzyskiwanej w próbie osiowego rozciągania (rys. 1).

Energia pęknięcia GF charakteryzuje zakres pokrytyczny zależności napężenie-wydłużenie i jest stałą materiałową rozciąganego betonu (rys. 1.b). W modelu PM występuje jako dodatkowy parametr pęknięcia szerokość pasma mikrorys w_c (rys. 1.a) Jest to efektywna szerokość strefy zlokalizowanego zniszczenia, w obrębie której rozwija się rysa właściwa w betonie posiadającym strukturę rozluźnioną na skutek wcześniej powstałych mikrorys w zaprawie i warstwie kontaktowej, łączącej ją z ziarnami kruszywa grubego.



Rys. 1. Interpretacja geometryczna parametrów pęknięcia betonu:
 a) szerokość pasma mikrorys w_c , b) energia pęknięcia G_F

Bezpośrednim sposobem wyznaczenia podstawowych parametrów opisujących rozciągany beton jest test jednoosiowego rozciągania. Wymogi stawiane takiemu badaniu sprawiają, że jest on trudny do przeprowadzenia i większość laboratoriów nie ma możliwości wykonania go. Z tego powodu wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ct} i moduł sprężystości betonu E_c są najczęściej określane na podstawie wytrzymałości betonu na ściskanie f_c , wyznaczanej na próbkach walcowych lub sześciennych w teście osiowego ściskania, a energia pęknięcia jest określana na podstawie testu trzypunktowego zginania belki z nacięciem. Jak dotąd nie opracowano metodyki doświadczalnego wyznaczania szerokości pasma mikrorys, mimo przeprowadzania prób w tym zakresie, np. Cedolin, Poli, Iori [2] i Tang, Yang, Zollinger [3].

1.2. WPŁYW UZIARNIENIA KRUSZYWA NA CECHY BETONU

Dotychczasowe badania i analizy wskazują na wyraźny wpływ uziarnienia kruszywa na parametry betonu, głównie na wytrzymałość betonu na ściskanie i energię pękania. Dobór uziarnienia kruszywa może mieć zatem wpływ na cechy wytrzymałościowe betonu jak również na przebieg procesów pękania betonu.

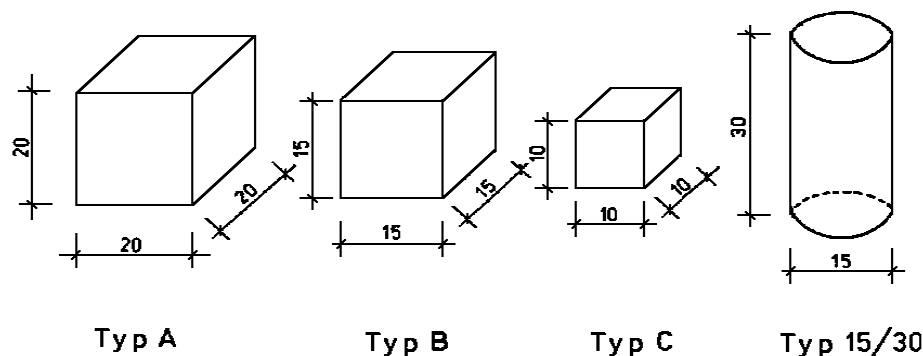
W zwykłych betonach konstrukcyjnych o wytrzymałości na ściskanie do 50 MPa zalecane jest stosowanie kruszywa o maksymalnym wymiarze do 32 mm. Nevill [4] podaje, że na korzyść stosowania większych ziaren kruszywa można przypisać zwiększoną wytrzymałość betonu przy stałej zawartości cementu. Wynika to z faktu mniejszej powierzchni kruszywa na jednostkę masy koniecznej do zwilżenia a tym samym obniżenia zapotrzebowania na wodę i stosunku wodno-cementowego. Z drugiej strony stosowanie kruszyw o dużych wymiarach powoduje zmniejszenie się powierzchni przyczepności i powstania nieciągłości. Beton staje się wtedy bardziej niejednorodny, co może objawić się obniżeniem nie tylko wytrzymałości, ale i rysoodporności betonu. Z tego względu zasady doboru uziarnienia kruszywa podlegają normalizacji. W normie PN-88/B-06250 „Beton zwykły” podane zostały następujące warunki, ograniczające największą średnicę ziaren kruszywa D_{max} :

- 1/3 najmniejszego wymiaru przekroju elementu;
 - 3/4 odległości w świetle między dwoma prętami leżącymi poziomo,
 - 2 odległości między prętami pionowymi;
 - 32 mm w przypadku żelbetu,
 - 63 mm w przypadku betonu niezbrojonego lub żelbetu o wymiarach nie mniejszych niż 50 cm,
 - 120 mm w konstrukcjach masywnych o przekroju poprzecznym od 50 do 150 cm;
- do wielkich masywów można wprowadzać otoczki o średnicy 320 mm w ilości do 20% objętości betonu.

W przypadku oceny doświadczalnej wytrzymałości betonu dobór próbek jest również uzależniony od maksymalnego wymiaru kruszywa D_{max} . Jeśli maksymalny wymiar kruszywa jest znaczny w porównaniu do wymiaru formy, wówczas ma to wpływ na zagęszczenie betonu i na nierównomierność rozmieszczenia dużych ziaren kruszywa. Aby zminimalizować to zjawisko zwane efektem ściany, używane są w badaniach próbki o różnych kształtach i wymiarach. Najczęściej stosowane są następujące próbki (rys. 2):

- sześcienne typu A, 200/200/200 mm, do betonu o maksymalnej średnicy ziaren $D_{max}=63$ mm,
- sześcienne typu B, 150/150/150 mm, gdy $D_{max}=32$ mm,
- sześcienne typu C, 100/100/100 mm, gdy $D_{max}=16$ mm,

walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm przy $D_{max}=32$ mm.



Rys. 2. Próbki do badania wytrzymałości betonu

Wpływ uziarnienia kruszywa na wielkość energii pęknięcia był tematem wielu prac naukowo badawczych np. Zhao, Kwon, Shah [5,6]. Kleinschrodt i Winkler [7] uzyskali 25-cio procentowy wzrost energii pęknięcia w badaniach belek z nacięciem pęknięcia w badaniach belek z nacięciem pęknięcia przy podwojeniu maksymalnej średnicy ziaren kruszywa z 8 na 16 mm. Rossello, Elices, Giinea [8] zwrócili uwagę na zaobserwowany w doświadczeniach wpływ przyczepności kruszywa do zaprawy na wartość energii pęknięcia. Ze względu na to, że dobór uziarnienia kruszywa ma bardzo duże znaczenie przy tworzeniu łańcuchów powiązań krystalicznych między zaprawą a kruszywem, ma zatem i wpływ na przyczepność między nimi.

Uzyskany w badaniach wpływ wielkości ziaren kruszywa na energię pęknięcia betonu ma odbicie w propozycjach analitycznego wyznaczenia tego parametru. Przykładem może być wzór zaproponowany w pracy [9]:

$$, G_F = 3,1 \times 10^{-6} (f_{ct} + 875665) f_{ct}^2 \frac{D_{max}}{E_c} \quad (1)$$

w którym: G_F podana jest w $[Nm/m^2]$, f_{ct} i E_c w $[Pa]$, a D_{max} w $[m]$, jak również uproszczona formuła podana w zaleceniach CEB-FIP [10]:

$$G_F = \alpha_F f_c^{0.7} \quad [Nm/m^2], \quad (2)$$

gdzie α_F zależy od D_{max} i wynosi odpowiednio $\alpha_F=4;6;10$ gdy $D_{max}=8;16;32$ mm, a f_c jest wytrzymałością betonu na ściskanie w $[MPa]$.

Także w przypadku doświadczalnego wyznaczania energii pęknięcia zgodnie z zaleceniami RILEM [11] należy dobierać wymiary próbki badawczej w zależności od D_{max} (tablica 1).

Tablica 1. Wymiary belek do określania G_F [11]

D_{max} [mm]	Wysokość d [mm]	Szerokość b [mm]	Długość L [mm]	Rozpiętość l [mm]
1 ÷ 16	100 ± 5	100 ± 5	840 ± 10	800 ± 5
16,1 ÷ 32	200 ± 5	100 ± 5	1190 ± 10	1130 ± 5
32,1 ÷ 48	300 ± 5	150 ± 5	1450 ± 10	1385 ± 5
48,1 ÷ 64	400 ± 5	200 ± 5	1640 ± 10	1600 ± 5

W literaturze naukowej przeważa pogląd, że szerokość pasma mikrorysy zależy od maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa i jest jego krotnością $w_c = (1 + 5)D_{max}$. Obecność ziaren grubego kruszywa zapobiega otwieraniu się pojedynczej szerokiej rysy. Ziarna te działają jako czynnik blokujący mikrorysy. Hu, Duan [12] wysunuli hipotezę, że szerokość pasma mikrorysy zmienia się wraz z rozwojem rysy właściwej. Bažant i Oh [9] definiując w_c podkreślają, że granice strefy zlokalizowanego pęknięcia nie powinny być ograniczane jedynie do strefy, w której dochodzi do łączenia się mikrorys, ale do całego obszaru mięknięcia materiału (strain-softening region), w obrębie którego wzrostowi odkształceń towarzyszy spadek maksymalnych naprężeń. Mięknięcie betonu jest spowodowane nie tylko przez mikropęknięcia, ale również na skutek miejscowej utraty przyczepności między kruszywem a matrycą cementową. W związku z tym autorzy proponują by do celów praktycznych przyjmować $w_c = 3D_{max}$.

Ciekawe wyniki badań dotyczące strefy zlokalizowanego mikrozarzysowania przedstawili Otsuka i Date [13]. Użycie metod emisji akustycznej i promieniowania X pozwoliło im na obserwację bezpośrednią rys wewnętrznych i na tej podstawie wysunięcia wniosków, co do wielkości obszaru aktywnego zarzysowania. W przypadku próbek o tych samych wymiarach wraz ze wzrostem D_{max} (beton o $D_{max} = 5; 10; 15$ lub 20 mm) zaobserwowali oni wzrost szerokości pasma mikrorysy przy jednoczesnym zmniejszeniu długości pasma.

Można znaleźć również rezultaty badań, które nie potwierdzają wpływu uziarnienia kruszywa na szerokość pasma mikrorysy. Uzyskana średnia wartość w_c w badaniach Wolińskiego [14] wyniosła $26,6$ mm i nie zależała, jak podaje autor, od

D_{max} . Przeprowadzone badania dotyczyły próbek rozciąganych osiowo wykonanych z betonu o maksymalnym uziarnieniu: $D_{max}=2; 4; 8; 16$ lub 32 mm.

Brak jednolitej metody badania szerokości pasma mikrorys czy empirycznego sposobu wyznaczania tej wielkości nastęca problemy przy numerycznym modelowaniu konstrukcji z betonu przez zastosowanie modelu pasma mikrorys. Wobec braku zgodności co do sposobu przyjmowania szerokości w_c nie ma pewności czy dobrana szerokość jest poprawna i czy jej wybór może mieć wpływ na końcowe wyniki obliczeń.

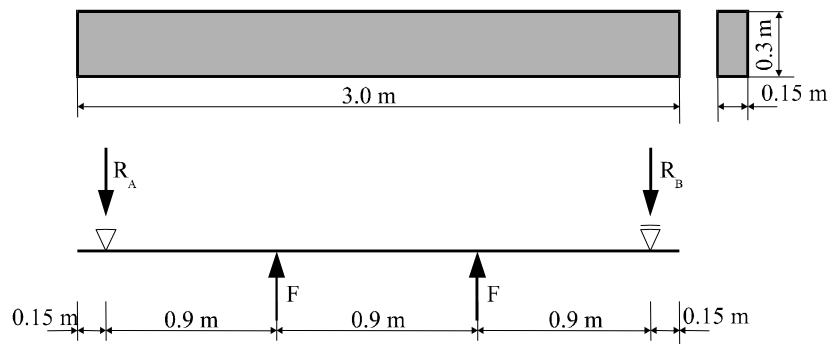
1.3. WYNIKI BADAŃ I OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH

W celu oceny wpływu doboru szerokości pasma mikrorys na wyniki obliczeń numerycznych w przypadku belek betonowych wykonano własne obliczenia za pomocą programu ALGOR, opartego na metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki obliczeń porównano następnie z wynikami badań własnych.

Badania doświadczalne dotyczyły trzech belek betonowych o przekroju prostokątnym, o wymiarach $0,15 \times 0,30$ m i długości 3 m. Belki poddane były testowi czteropunktowego zginania przy rozpiętości 2,7 m i symetrycznym rozstawie sił (rys. 3). Elementy badawcze wykonane były z betonu o następujących cechach:

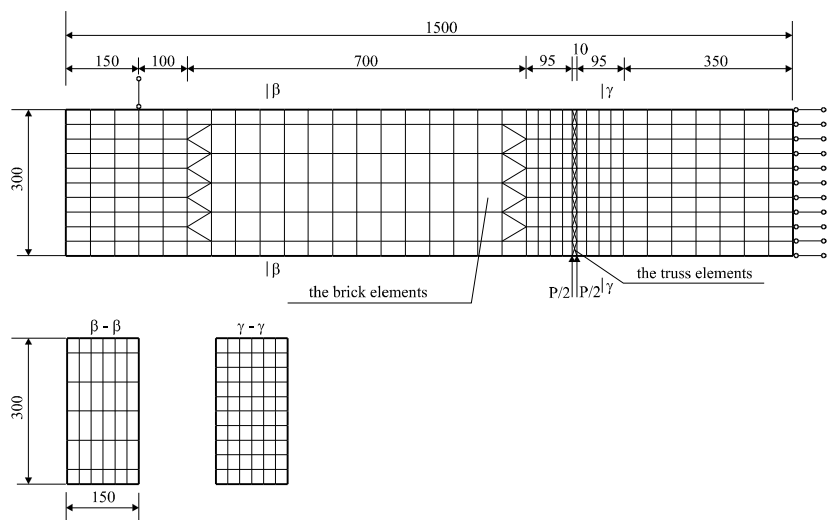
- wytrzymałość na ściskanie $f_{cm}=20,54$ MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie $f_{ctm}=1,48$ MPa,
- moduł sprężystości betonu $E_{cm}=22118$ MPa,
- energia pęknięcia $G_F=82,95$ Nm/m²,
- maksymalny wymiar ziaren kruszywa $D_{max}=32$ mm.

Dokładny opis badań można znaleźć w pracy [15].



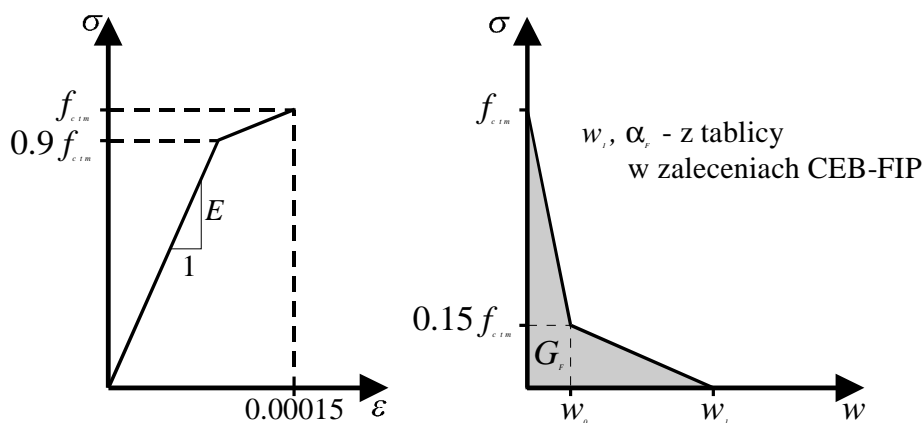
Rys. 3. Element badawczy

W obliczeniach numerycznych przyjęto element, odpowiadający połowie belki badawczej ze strefą zarysowania w przekroju najbardziej wyciężonym. W celu przeprowadzenia analizy wpływu szerokości pasma mikrorys w_c na wyniki obliczeń, przy modelowaniu strefy zarysowania różnicowano jej szerokość: $w_c=5$; 10; 20; 26.5; 50 i 100 mm. Na rysunku 4 przedstawiono siatkę elementów skończonych przyjętą w obliczeniach w przypadku belki, w której zamodelowana strefa zarysowania wynosiła 10 mm.



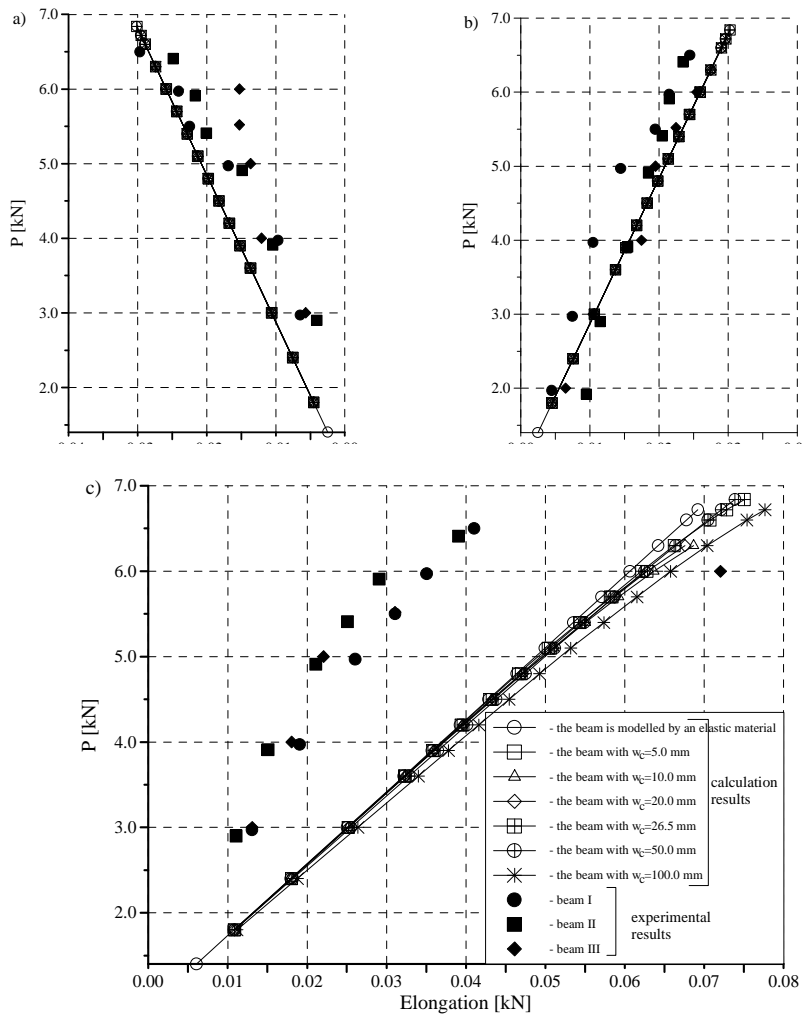
Rys. 4. Siatka elementów skończonych w przypadku belki o $w_c=10$ mm.

Właściwości betonu w obliczeniach MES przyjęto takie same jak w belkach badawczych. Do opisu betonu rozciąganego użyto zależności σ - ε i σ - w wg zaleceń CEB-FIP [10] (rys. 5). W [16] wykazano, że opis betonu według tych zależności dobrze koresponduje z wynikami badań doświadczalnych.



Rys. 5. Model betonu rozciąganego według [10]
a) beton niezarysowany; b) beton zarysowany

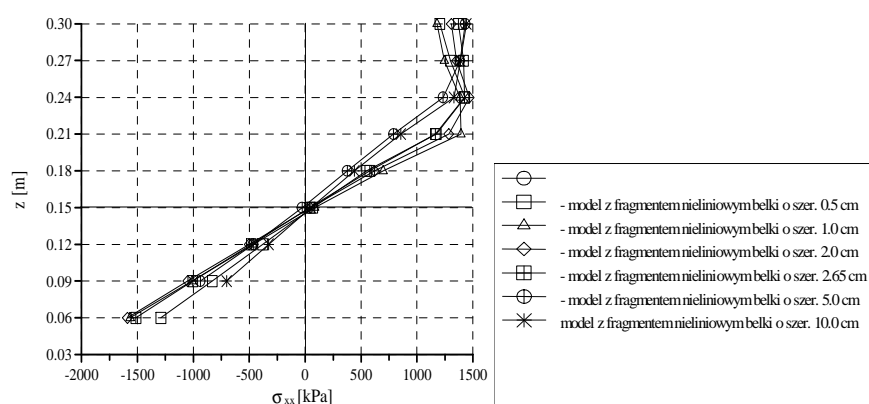
W wyniku obliczeń zostały wyznaczone przemieszczenia węzłów i składowe naprężenia. Na ich podstawie wyznaczono wydłużenia otrzymane na bazach pomiarowych o długości 250 mm znajdujących się w strefie ściskanej - baza nr 1 (rys. 6.a) i w strefie rozciąganej - baza nr 2 nie obejmująca zarysowania (rys. 6.b) oraz baza nr 3, w obrębie której znajdowała się strefa zarysowania (rys. 6.c).



Rys. 6. Porównanie wydłużeń na bazach 1, 2 i 3, obliczonych w belkach o różnym w_c z wynikami badań

W wyniku przedstawionego na rysunku 6 porównania wydłużeń betonu, pomierzonych podczas badań i obliczonych metodą elementów skończonych na wybranych bazach, stwierdzono ich stosunkowo dobrą zgodność. Jedyne większe rozbieżności pomiarów i obliczeń można zauważyć w pierwszych etapach obciążenia, ale można je wytłumaczyć stabilizowaniem elementu badawczego na podporach podczas testu.

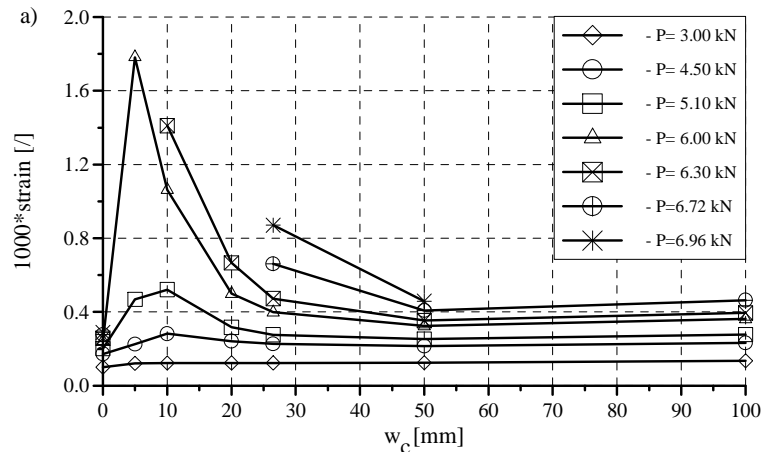
Następnie, na podstawie otrzymanych obliczeń MES, sporządzono wykres naprężeń normalnych na wysokości belki w przekroju zarysowania, w przypadku analizowanych belek. Na rysunku 7 zestawiono otrzymane rozkłady naprężeń normalnych we wszystkich belkach przy sile 6 kN, w celu ich porównania. W obliczeniach, nieliniową charakterystykę betonu przyjmowano w obrębie zamodelowanego pasma mikrorys, podczas gdy poza tą strefą beton był modelowany jak materiał liniowo-sprężysty.



Rys. 7. Porównanie rozkładu naprężeń normalnych w przekroju przez rysę w belkach o różnym w_c przy sile $P=6$ kN

Na podstawie uzyskanych wykresów (rys. 6 i 7) można zauważyć różnice otrzymanych wyników obliczeń w zależności od przyjętej szerokości strefy zarysowania. Większe wydłużenia betonu na bazie pomiarowej nr 3 uzyskano w przypadku zamodelowanych belek o przyjętej szerokości pasma mikrorys powyżej 20 mm. Porównując rozkłady naprężeń przedstawione na rysunku 7 można zauważyć, że wraz ze wzrostem przyjętej szerokości w_c otrzymano mniej widoczne uplastycznienie betonu w strefie zarysowania.

W celu dokładniejszej analizy wpływu przyjętej wielkości w_c na otrzymane wyniki obliczeń, wyznaczono odkształcenia betonu w obrębie zamodelowanego pasma mikrorys (rys. 8).



Rys. 8. Odkształcenia betonu w paśmie mikrorys w zależności od w_c .

Z warunku dążenia do minimalnej energii potencjalnej podczas pracy elementu wynikałoby, iż osiągnięcie najmniejszych wydłużeń w strefie zlokalizowanego zarysowania, w której dochodzi do powstania rysy właściwej, jest warunkiem najbardziej racjonalnym. W analizowanej belce zginanej warunek ten jest osiągnięty przy w_c w zakresie od 5 do 10 mm. Przyjęcie zatem $w_c=3D_{max}$ zgodnie z zaleceniami podanymi w literaturze [9] (w analizowanym przypadku byłoby to $w_c=100$ mm gdyż $D_{max}=32$ mm) nie odpowiada temu kryterium. Również wielkość pasma mikrorys uzyskana w badaniach Wolińskiego [14], tj. $w_c=26,5$ mm nie ma potwierdzenia w otrzymanych obliczeniach.

1.4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule studia literaturowe wskazują, że istnieje wpływ uziarnienia kruszywa na parametry pęknięcia betonu. Zagadnienie to zostało dosyć dobrze rozpoznane, jeśli chodzi o wytrzymałość betonu i energię pęknięcia. Nie ma natomiast jednoznacznej odpowiedzi odnośnie wpływu wymiarów ziaren kruszywa na szerokość pasma mikrorys w_c . Odpowiednie przyjęcie tego parametru warunkuje poprawność uzyskiwanych wyników obliczeń przeprowadzanych za pomocą metody elementów skończonych. Wykonana analiza numeryczna wskazuje, że sposób przyjęcia szerokości w_c ma wpływ na rezultaty obliczeń, ale bezpośrednie uzależnianie tej wielkości od maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa nie znalazło w obliczeniach potwierdzenia. Konieczne jest przeprowadzenie systematycznych badań nad tym zagadnieniem.

1.5. LITERATURA

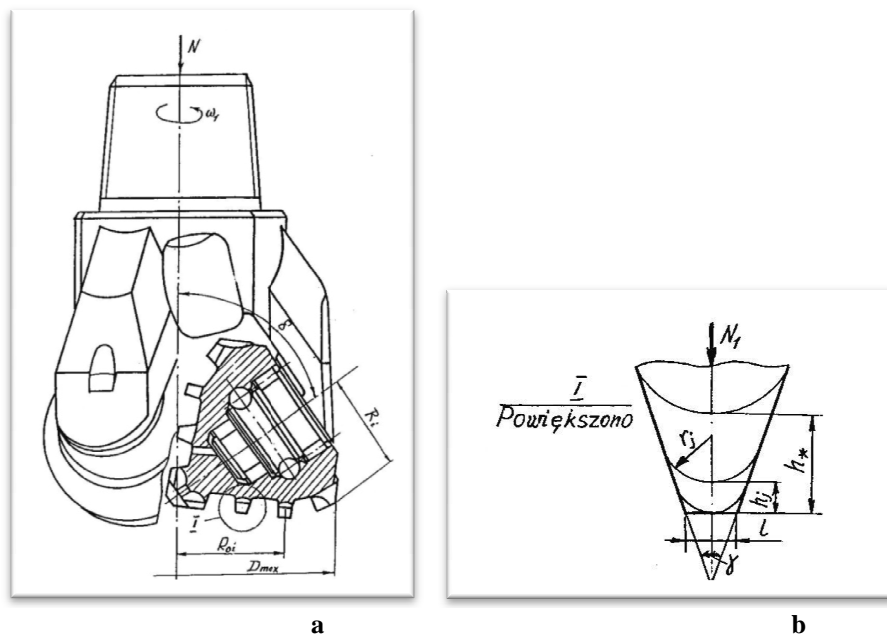
- [1] Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 1976, 773-782,
- [2] Cedolin L., Poli S. D. and Iori I.: Experimental Determination of the Fracture Process Zone in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, 1983, 557-567
- [3] Tang T., Yang S., and Zollinger D. G.: Determination of Fracture Energy and Process Zone Length Using Variable-Notch One-Size Specimens, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No 1, 1999, 3-10,
- [4] Neville A. M.: Właściwości betonu, *Polski Cement*, Kraków, 2000,
- [5] Zhao Z., Kwon S. H. and Shah S. P.: Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, Issue 8-9, 2008, 1049-1060,
- [6] Kwon H., Zhao Z. and Shah S. P.: Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part II. Inverse analysis and softening curve, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, Issue 8-9, 2008, 1061-1069,
- [7] Kleinschrodt H. D. and Winkler H.: The Influence of the Maximum Aggregate Size on the Size of Specimen on Fracture Mechanics Parameters, *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, edited by F. H. Wittmann, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1986, 391-402,
- [8] Rossello C., Elices M. and Guinea G. V.: Fracture of model concrete: 2. Fracture energy and characteristic length, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 7, 2006, 1345-1353,
- [9] Bažant Z. P. and Oh B. H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Matériaux et Constructions*, Vol. 16, 193, 1983, 155-177,
- [10] CEB-FIP Model Code 1990 *Bulletin d'information* No. 196,
- [11] RILEM Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bent tests on notched beams, *Matériaux et Constructions*, Vol. 18, No 106, 1985, 258-290,
- [12] Hu X. and Duan K.: Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 8, 2004, 1321-1330,

- [13] Otsuka K. and Date H.: Fracture process zone in concrete tension specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 65, 2000, 111-131,
- [14] Woliński Sz.: Badania właściwości betonu rozciąganego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”*, nr 10/63, 1990,
- [15] Słowik M.: Analiza nośności elementów z betonu słabo zbrojonego z uwzględnieniem stanów granicznych użytkowania. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2000,
- [16] Słowik M., Błazik-Borowa E.: Weryfikacja doświadczalna wybranych modeli betonu rozciąganego. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999, *Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa*, Tom 4, 59-66.

2. ANALIZA MATEMATYCZNA WPŁYWU PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WIERCENIA NA TRWAŁOŚĆ UZBROJENIA ŚWIDRÓW GRYZOWYCH

Najistotniejszym czynnikiem decydującym o zużyciu uzbrojenia świdra i efektywności wiercenia jest trwałość elementów jego uzbrojenia. Przyczyną ich zużywania się jest zjawisko poślizgu zębów względem urabianej calizny. Powstające przy tym zużycie zębów ma charakter zużycia ściernego w ośrodku smarnym jakim jest płuczka wiertnicza. Modelowanie matematyczne procesu zwiercania skał oraz diagnoza (symulacja) na tej podstawie trwałości na zużycie uzbrojenia świdra, pozwala na zoptymalizowany wybór narzędzia.

Rozpatrzono świder trójgryzowy (rys.1a) z uzbrojeniem w postaci klina (rys.1b), który pod wpływem siły osiowej wgłębia się w calizną, a pod wpływem momentu obrotowego przetacza się względem niej z pewnym poślizgiem. Na skutek tego, wstępnie płaska powierzchnia zęba o szerokości l , zaokrągla się. Założono, że przy zużyciu h_j tworzy się powierzchnia cylindryczna zmiennego promienia r_j (rys.1b).



Rys. 1. Schemat świdra trójgryzowego

W oparciu o opracowany [3-5] ogólny model matematyczny badania kinetyki zużywania się materiału uzbrojenia świdra w warunkach tarcia ślizgowego w kontakcie ze skałą przeprowadzono rozważania według dwóch metod w których przyjęto dwie funkcje opisujące rozkład nacisków kontaktowych. Dla każdej z metod opracowano szczegółowe modele: pierwszego, drugiego i trzeciego stopnia przybliżenia, uwzględniające parametry procesu wiercenia, geometrię świdra trójgryzowego jak również właściwości fizyko – mechaniczne materiałów pary tribologicznej. Opracowane modele umożliwiły przeprowadzenie analizy trwałości zębów świdra T w funkcji ich zużycia liniowego, prędkości obrotowej oraz nacisku osiowego działającego na świder według poniższych zależności [6,7]:

Metoda 1

- model pierwszego stopnia (1.1)

$$T_i = \frac{AR_{oi} \tau_t^m h_{**} \left(e^{\frac{cm \cdot h_*}{h_{**}}} - 1 \right)}{60u^2 n_1 R_i s_i \tau_o^m cm} \quad (1)$$

- model drugiego stopnia (1.2)

$$T_i = \frac{AR_{oi} \tau_t^m h_{**} \left(e^{\frac{cm \cdot h_*}{h_{**}}} - 1 \right)}{60u^2 n_1 (R_i - h_* \cos \delta) s_i \tau_o^m cm} \quad (2)$$

- model drugiego stopnia (1.2')

$$T_i = \frac{AR_{oi} \tau_t^m h_{**} \left(e^{\frac{cm \cdot h_*}{h_{**}}} - 1 \right)}{60u^2 n_1 (R_i - h_*) s_i \tau_o^m cm} \quad (3)$$

- model trzeciego stopnia (1.3)

$$T_i = \frac{AR_{oi} \tau_t^m}{60u^2 n_1 s_i \tau_o^m} \cdot \int_0^{h_*} \frac{e^{\frac{cm \cdot h}{h_{**}}}}{R_i - h \cos \delta} dh \quad (4)$$

- model trzeciego stopnia (1.3')

$$T_i = \frac{AR_{oi}\tau_i^m}{60u^2n_1s_i\tau_o^m} \cdot \int_0^{h_*} \frac{e^{-\frac{cm-h}{h_*}}}{R_i-h} dh \quad (5)$$

gdzie:

$$\tau_o = f \cdot \sqrt{\frac{E \cdot N \cdot [1 - \sin(0.5\gamma)]}{\pi(1-\nu^2) \cdot l_\Sigma \cdot [0.5l \cos(0.5\gamma)]}} \quad (6)$$

Metoda 2

- model pierwszego stopnia (2.1)

$$T_i = \frac{A\tau_i^m R_{oi}}{60R_i s_i f^m u^2 n_1} \left(\frac{\pi(1-\nu^2) l_\Sigma}{EN \left(1 - \sin \frac{\gamma_i}{2}\right)} \right)^{\frac{m}{2}} \frac{\left[\left(h_* \sin \frac{\gamma_i}{2} + \frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} - \left(\frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} \right]}{\left(\frac{m}{2} + 1 \right) \sin \frac{\gamma_i}{2}} \quad (7)$$

- model drugiego stopnia (2.2)

$$T_i = \frac{A\tau_i^m R_{oi}}{60(R_i - h_* \cos \delta) s_i f^m u^2 n_1} \left(\frac{\pi(1-\nu^2) l_\Sigma}{EN \left(1 - \sin \frac{\gamma_i}{2}\right)} \right)^{\frac{m}{2}} \frac{\left[\left(h_* \sin \frac{\gamma_i}{2} + \frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} - \left(\frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} \right]}{\left(\frac{m}{2} + 1 \right) \sin \frac{\gamma_i}{2}} \quad (8)$$

- model drugiego stopnia (2.2')

$$T_i = \frac{A \tau_t^m R_{oi}}{60(R_i - h_*) s_i f^m u^2 n_1} \left(\frac{\pi(1-\nu^2) l_\Sigma}{EN \left(1 - \sin \frac{\gamma_i}{2}\right)} \right)^{\frac{m}{2}} \frac{\left[\left(h_* \sin \frac{\gamma_i}{2} + \frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} - \left(\frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}+1} \right]}{\left(\frac{m}{2} + 1 \right) \sin \frac{\gamma_i}{2}} \quad (9)$$

- model trzeciego stopnia (2.3)

$$T_i = \frac{A \tau_t^m R_{oi}}{60 f^m s_i u^2 n_1} \cdot \left(\frac{\pi(1-\nu^2) l_\Sigma}{EN \left(1 - \sin \frac{\gamma_i}{2}\right)} \right)^{\frac{m}{2}} \cdot \int_0^{h_*} \frac{\left(\frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} + h \sin \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}}}{R_i - h \cos \delta} dh \quad (10)$$

- model trzeciego stopnia (2.3')

$$T_i = \frac{A \tau_t^m R_{oi}}{60 f^m s_i u^2 n_1} \cdot \left(\frac{\pi(1-\nu^2) l_\Sigma}{EN \left(1 - \sin \frac{\gamma_i}{2}\right)} \right)^{\frac{m}{2}} \cdot \int_0^{h_*} \frac{\left(\frac{l}{2} \cos \frac{\gamma_i}{2} + h \sin \frac{\gamma_i}{2} \right)^{\frac{m}{2}}}{R_i - h} dh \quad (11)$$

W powyższych równaniach przyjęto następujące oznaczenia:

A, m - bezwymiarowe wskaźniki wytrzymałości frykcyjnej badanego materiału w skojarzeniu tribologicznym i przyjętych warunkach badania, c - nieznaną stałą wyznaczoną na drodze doświadczalnej, f - współczynnik tarcia ślizgowego, $\tau_o = \tau_{\max}$ dla $h=0$ i $x=0$; $\tau_o = fp(0,0)$, $\tau_i = 0.5\sigma_{0.2}$ - granica plastyczności materiału na ścinanie, $\sigma_{0.2}$ - umowna granica plastyczności materiału na rozciąganie. $h_* = h \rightarrow h_{**}$ - dyskretne wartości zużycia; h_{**} - dopuszczalne zużycie zęba, γ_i - kąt wierzchołka zęba; δ - kąt pochylenia płaszczyzny wieńca względem płaszczyzny przekroju poprzecznego otworu, R_{oi} - promień toczenia się i - tego wieńca gryza względem calizny otworu, R_i - promień i - tego wieńca gryza, s_i - skok między zębami, $u = \omega_2/\omega_1$ - liczba przełożenia świdra, $n_1 = \frac{30\omega_1}{\pi}$ - prędkość obrotowa świdra, ω_1 - prędkość kątowna świdra, ω_2 - prędkość kątowna gryza, E, ν - moduł

Younga i liczba Poissona skały, N - nacisk osiowy na świder, $l_{\Sigma} = \sum_1^{\tilde{n}_i} l_{ni}$ - długość sumarycznej linii styku zębów świdra z calizną, l_{ni} - długość linii styku poszczególnych zębów, l - szerokość wierzchołka zęba, \tilde{n}_i - liczba zębów na każdym wieńcu, jednocześnie stykających się z calizną, L_i - droga tarcia ślizgania zęba na i -tym wieńcu przypadająca na jeden obrót świdra, $n_i = \frac{2\pi R_i}{s_i}$ - ilość zębów na i -tym wieńcu.

Do analizy obliczeniowej przyjęto następujące wartości parametrów wiercenia: nacisk osiowy $N = 0,07; 0,14; 0,21; 0,28 MN$, prędkość obrotowa $n_1 = 70; 100; 130; 160 obr / min$.

Parametry konstrukcyjne świdra zastały podane w tab.1 [2]. Pozostałe dane do obliczeń: $u = 1,57$, $f = 0,3$, $l_{\Sigma} = 0,175m$, $l = 0,002m$, skała - granit, wartości parametrów $\tau_t = 385 MPa$, $E = 2 \cdot 10^4 MPa$, $\nu = 0,25$, przyjęto z [1,2] podobnie jak wartości $A = 1,27 \cdot 10^5$, $c = 1,2$, $m = 1,8$ dla których, w powyższych pracach, przedstawiono metodę ich wyznaczania. Wartości τ_o zostały wyznaczone w funkcji nacisku osiowego N wg zależności (6).

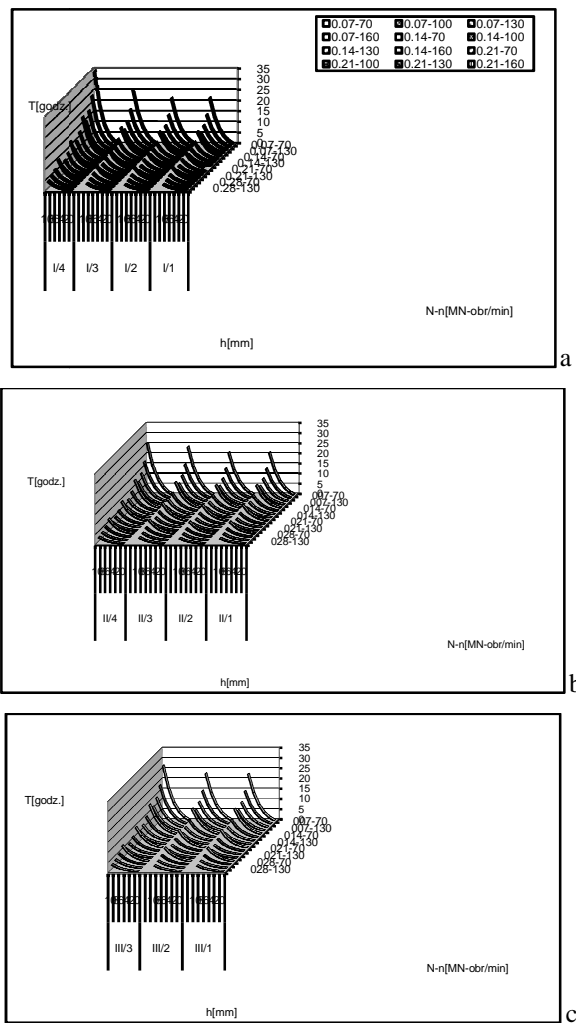
Tabela 1. Parametry świdra trójgryzowego

gryz/wieniec	$R_{oi}[mm]$	$R_i[mm]$	$n_i[szt.]$	$\gamma_i[stopni]$	$s_i[mm]$	$l_{ni}[mm]$	$L_i[mm]$
I/1	143	92	20	42	29.7	18	67.42
I/2	103	73	17	44.9	28.3	10	57.24
I/3	65	45	12	43.6	25.7	10	47.30
I/4	17	13	5	41.4	25.4	27	29.86
II/1	145	92	19	42	31.3	13	68.11
II/2	110	80	19	43.8	27.9	12	58.79
II/3	78	55	14	43.7	26.2	10	50.85
II/4	40	28	7	43.3	27.3	10	39.21
III/1	140	90	21	42	28.3	27	66.80
III/2	90	64	16	44	26.5	10	53.98
III/3	55	38	10	44.3	25	10	44.28

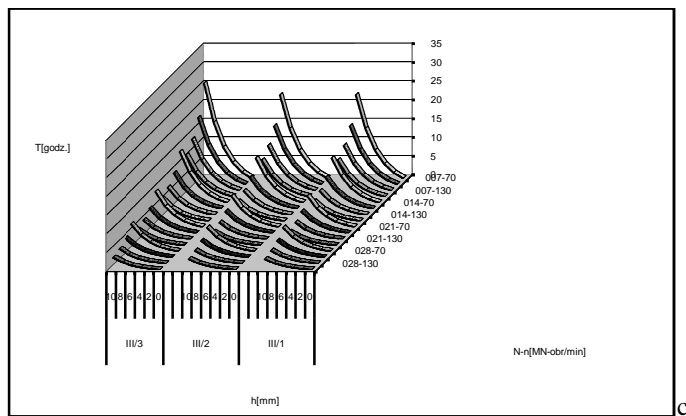
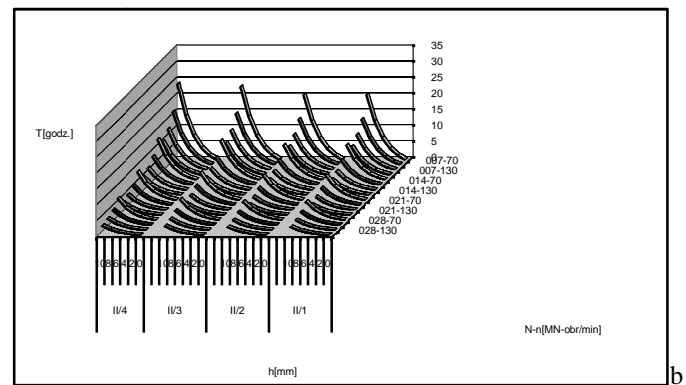
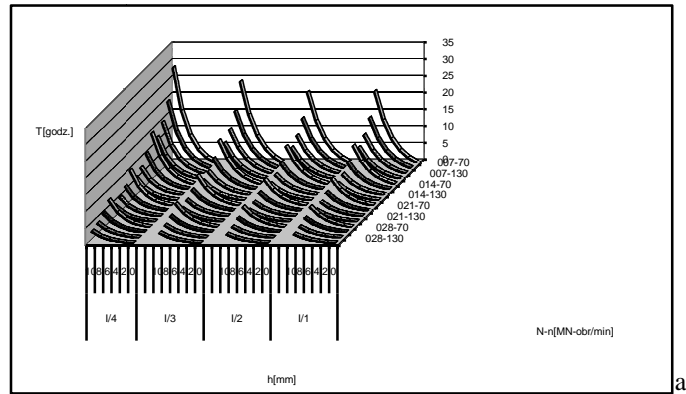
Według metody 1 obliczono na każdym wieńcu średnią trwałość $T_i = f(h_*)$ zębów świdra wg zależności (1-5) dla $h_* = 0,2,4...10mm$. Wyniki rozwiązania

numerycznego dla modelu 1.2 podano na rys. 2 a, b, c, natomiast dla modelu 1.3 na rys. 3 a, b, c

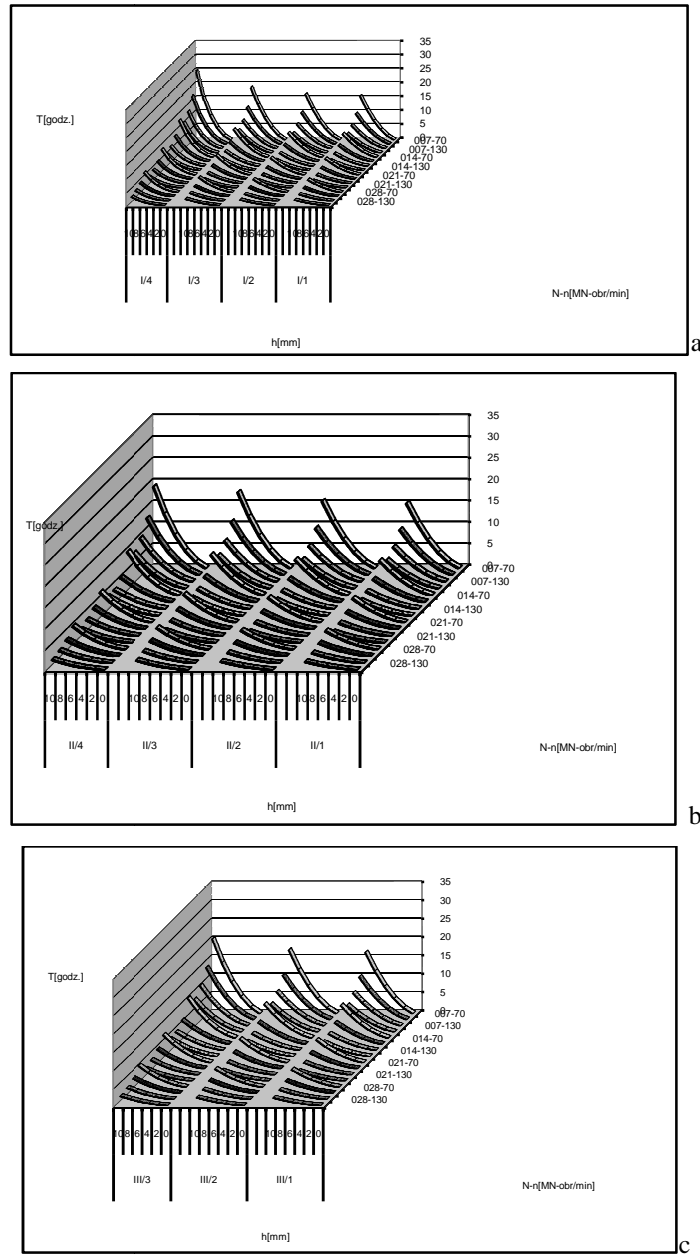
Według metody 2 obliczono na każdym wieńcu średnią trwałość $T_i = f(h_*)$ zębów świdra wg zależności (7-11) również dla $h_* = 0,2,4...10\text{mm}$. Wyniki rozwiązania numerycznego dla modelu 2.2 podano na rys. 4 a, b, c, natomiast dla modelu 2.3 na rys. 5 a, b, c



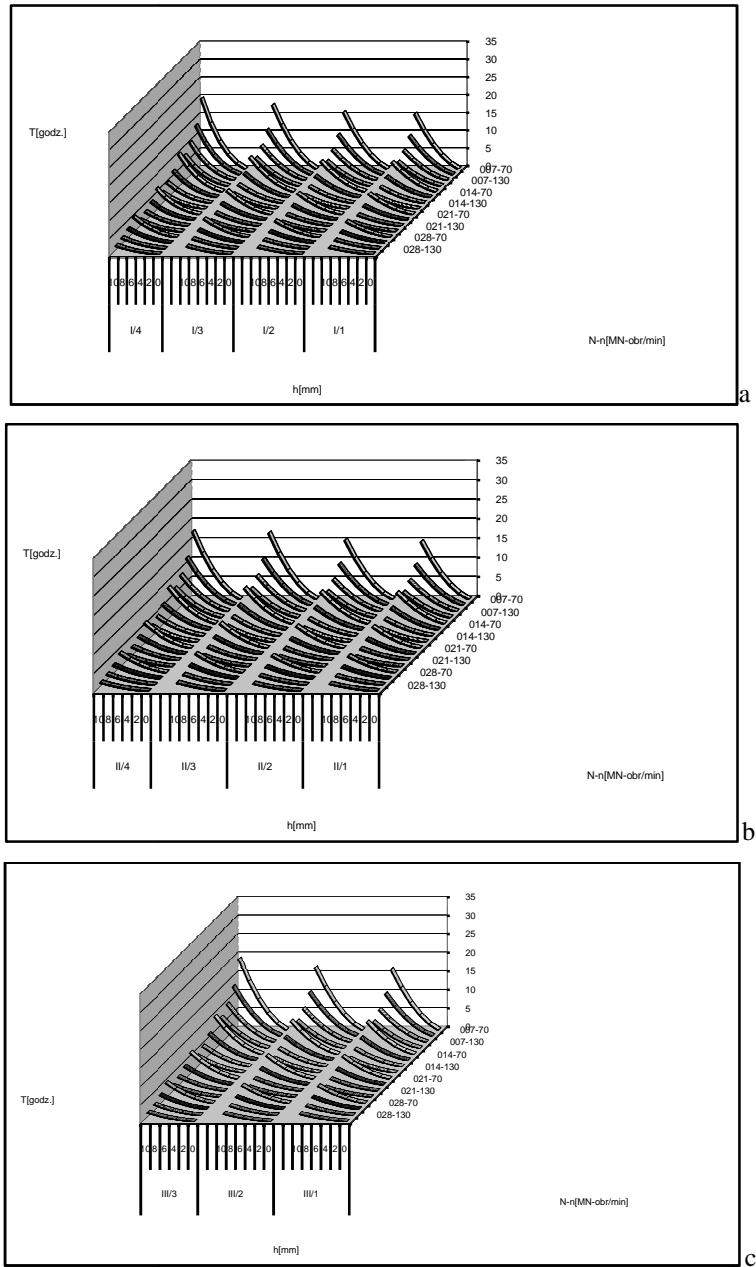
Rys.2 Wpływ parametrów wiercenia na trwałość uzbrojenia świdra trójgryzowego wg modelu 1.2: a) pierwszy gryz, b) drugi gryz, c) trzeci gryz.



Rys.3 Wpływ parametrów wiercenia na trwałość uzbrojenia świda trójgryzowego wg modelu 1.3: a) pierwszy gryz, b) drugi gryz, c) trzeci gryz.



Rys.4 Wpływ parametrów wiercenia na trwałość uzbrojenia świda trójgryzowego wg modelu 2.2: a) pierwszy gryz, b) drugi gryz, c) trzeci gryz.



Rys.5 Wpływ parametrów wiercenia na trwałość uzbrojenia świda trójgryzowego wg modelu 2.3: a) pierwszy gryz, b) drugi gryz, c) trzeci gryz.

Wnioski

Analiza wyników rozwiązania numerycznego, zamieszczonego na rys.2,3,4,5 pozwala wyciągnąć następujące wnioski: Dla wieńców wewnętrznych (I/4, II/4) różnica trwałości obliczona wg przedstawionych modeli zwiększa się wraz ze wzrostem zużycia dopuszczalnego h_* . Trwałości zębów na wszystkich wieńcach obliczone wg metody 1 i 2, zgodnie z modelami drugiego i trzeciego stopnia są zbliżone, co pozwala skutecznie stosować przy analizie trwałości świrdrów gryzowych prostszy model drugiego stopnia. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej trwałość uzbrojenia, obliczona wg metody 1 i 2, maleje na wszystkich analizowanych wieńcach. Opracowane modele pozwalają na jakościowe i ilościowe określenie wpływu prędkości wiercenia na trwałość uzbrojenia świrdra gryzowego.

LITERATURA

- Czerniec M., Jarek P.: Badanie trwałości uzbrojenia świrdrów gryzowych i ich efektywności. Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz, tom 16/1999.
- Czerniec M., Jarek P. „Diagnoza obliczeniowa trwałości i efektywności świrdrów gryzowych”. II Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej „Diagnostyka 2000”. Warszawa 19 – 22.09.2000.
- Andrejkiw A.E., Czerniec M.W. Ocena kontaktowego wzajemnego trzaskania detali maszyn. – Kijew: Nauk. Dumka, 1991. - 160 s.
- Czerniec M., Jarek P. „Do pytania ocinku znoszącego uzbrojenia ta mechanicznej sztywności buriny trzaskowymi dolotami. Część 1- Ocinka znoszącego uzbrojenia”. „Problems of Tribology, No2,2003.
- Czerniec M., Jarek P. „Do pytania ocinku znoszącego uzbrojenia ta mechanicznej sztywności burienia”. „Problems of Tribology, No3,2003
- Czerniec M., Jarek P. „Analiza matematyczna zużycia uzbrojenia świrdrów gryzowych”. V Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Zagadnienia dydaktyczne w środowisku systemów technologicznych”. Kazimierz Dolny n/Wisłą 5 – 6.06.2003.
- Czerniec M., Jarek P. „Analiza wpływu nacisku osiowego na zużycie uzbrojenia świrdrów gryzowych” - Eksploatacja i Niezawodność, Warszawa 2004, nr 4(24), s.73-78

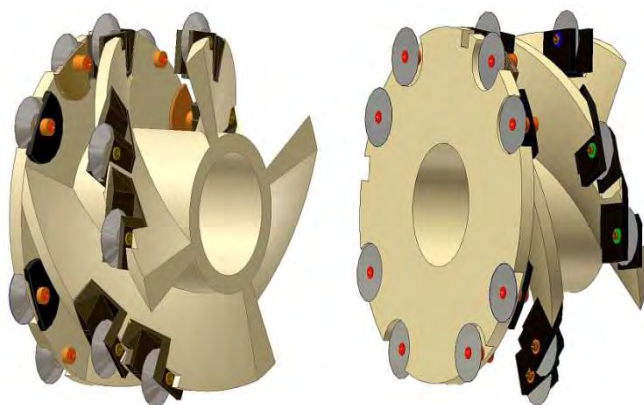
3. BADANIA STANOWISKOWE FREZUJĄCEGO ORGANU ŚLIMAKOWEGO WYPOSAŻONEGO W NARZĘDZIA DYSKOWE

3.1. WPROWADZENIE

Ocena pracy frezującego organu ślimakowego wyposażonego w narzędzia dyskowe była powodem przeprowadzenia badań na stanowisku zaprojektowanym i wykonanym specjalnie do tych celów.

Wykonane w 2004 roku dwa frezujące organy ślimakowe z narzędziami dyskowymi przeznaczone były do urabiania węgla w wyrobisku ścianowym jednej z kopalń węgla kamiennego (rys. 1). Trudne warunki górniczo-geologiczne, a szczególnie pofałdowany spąg i konieczność jego przybierki spowodowały szybkie zużycie dysków, jak również sworzni i uchwytów (rys. 2 i 3).

Dlatego podjęto decyzję o modernizacji układu narzędziowego (dyskowego) w taki sposób, by była możliwość pracy tego organu w czasie przybierki spągu (rys. 4). W tym organie (wersja II) zmieniono konstrukcję uchwytów dla dysków rozmieszczonych na tarczy odcinającej oraz na płytach. Jednocześnie zwiększono ilość narzędzi dyskowych z 18 sztuk (wersja I) na 36 sztuk (wersja II) i zastosowano dyski o średnicy 160 mm z różnymi kątami ostrza.



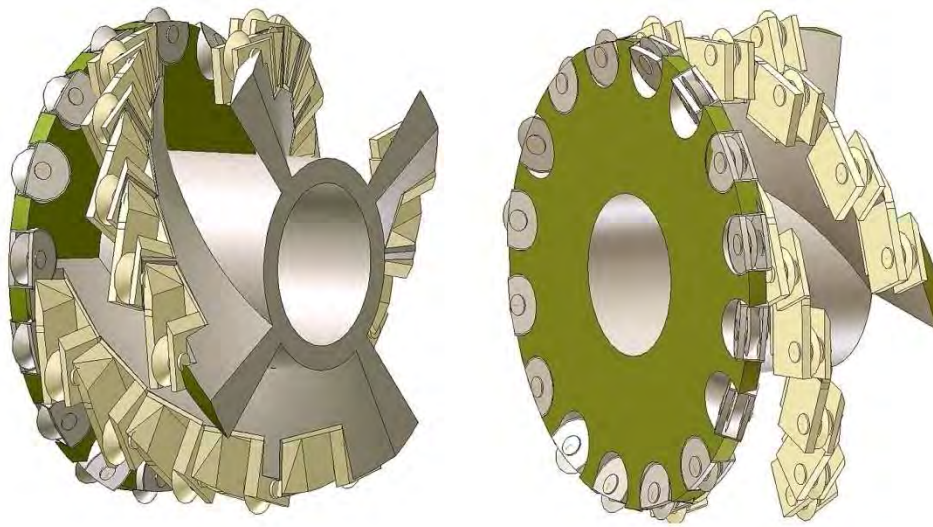
Rys. 1. Frezujący organ ślimakowy wyposażony w dyski (wersja I)



Rys. 2. Zniszczone sworznie dyskowe na tarczy odcinającej



Rys. 3. Wykruszona krawędź skrawająca dysku



Rys. 4. Frezujący organ ślimakowy wyposażony w dyski (wersja II)



Rys. 5. Frezujący organ ślimakowy na stanowisku badawczym

Wykonanie organu w wersji II oraz sugestie przyszłego użytkownika, by przeprowadzić próby ruchowe ale nie w warunkach dołowych, spowodowały podjęcie decyzji o wykonaniu badań stanowiskowych w warunkach laboratoryjnych na stanowisku zlokalizowanym w Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie.

W czasie tych badań starano się ocenić pracę organu w aspekcie zauważonych niedociągnięć konstrukcyjnych i możliwości ich usunięcia w wersji przeznaczonej do prób ruchowych.

Jednak trudności technologiczne i wykonawcze spowodowały konieczność rezygnacji z jednej linii skrawania, by uzyskać dobre połączenie uchwytych dyskowych z płatami. Dlatego organ zaproponowany w wersji II został wyposażony w 32 dyski i oznaczony jako wersja III (rys. 5). Organ ten po jego wykonaniu został przeznaczony do badań stanowiskowych.

Przeprowadzenie badań stanowiskowych organu w wersji III oraz wypływające z tego wnioski spowodowały dalszą modernizację jego konstrukcji. Zmiany, które zaproponowano w tej konstrukcji (wersja IV) dotyczyły zainstalowania na końcach płatów dodatkowych dysków, ułatwiających przybieranie spągu. Po wykonaniu wzmiankowanych czynności organ w tej wersji (wersja IV) ponownie poddano badaniom, po realizacji których stwierdzono możliwość przeprowadzenia prób ruchowych.

3.2. BADANIA FREZUJĄCEGO ORGANU ŚLIMAKOWEGO Z NARZĘDZIAMI DISKOWYMI

Do badań stanowiskowych przeznaczono frezujący organ ślimakowy $\varnothing 1520 \times 800$ mm wyposażony w narzędzia dyskowe, który w tym wykonaniu (wersja III) posiadał łącznie 32 dyski (16 sztuk na tarczy odcinającej i 16 sztuk na płatach). Kształt płatów i kierunek ich nawinięcia pozwalał na pracę organu z obrotami nadsiębiernymi (rys. 5). Wersja III powstała w wyniku usunięcia ostatniego rzędu dysków (trudności technologiczne) zaprojektowanych w wersji II (zmiana podziałek między liniami skrawania).



Rys. 6. Frezujący organ ślimakowy z nożami styczno-obrotowymi (CX-18/30/38/50/165/ZH)

Odniesieniem do oceny pracy organu z dyskami może być jedynie praca organu z nożami styczno-obrotowymi. Dlatego też do tych badań przeznaczono również typowy frezujący organ ślimakowy $\varnothing 1400 \times 750$ mm z 18 nożami na tarczy odcinającej i 21 nożami na płatach (rys. 6).

3.2.1. Plan i metodyka badań

Głównym celem badań stanowiskowych była ocena pracy frezującego organu ślimakowego z narzędziami dyskowymi i porównanie tego procesu do pracy organu z nożami styczno-obrotowymi oraz określenie miejsc wprowadzenia zmian konstrukcyjnych.

Dlatego też ustalono następujące warunki badań na stanowisku laboratoryjnym:

urabianie sztucznej próbki skalnej o w miarę izotropowych właściwościach,
ustalenie jednakowych i możliwych do osiągnięcia parametrów procesu urabiania,
pomiar w czasie urabiania wybranych wielkości fizycznych,
wizualna ocena pracy i konstrukcji organu.

Parametrami umożliwiającymi ocenę tego procesu na tym stanowisku badawczym są:

moment oporu urabiania M_o , kNm,

siła oddziaływania organu w kierunku posuwu P_u , kN,

siła oddziaływania organu w kierunku zawrębiania P_w , kN,

wartość zapylenia respirabilnego i całkowitego, mg/dcm³,

Parametry te muszą być wyznaczone (mierzone) w jednakowych warunkach czyli przy tej samej wartości:

prędkości posuwu v_p , m/min,

obrotach organu n , obr/min,

własnościach urabianej calizny (sztucznej skały) mierzonej wytrzymałością na ściskanie R_c , MPa,

Jednocześnie ocena wizualna elementów organu urabiającego umożliwi określenie stanu jego zużycia.

Pomiar, rejestracja i obróbka sygnałów wielkości mierzonych (M_o , P_u , P_w , zapylenie) w funkcji parametrów zmiennych (v_p , n , R_c) oraz stan organu (zużycie) pozwala na ocenę pracy frezującego organu ślimakowego z narzędziami dyskowymi. Wnioski z tych badań mogą być przydatne dla potrzeb dokonania wymaganych zmian konstrukcyjnych badanego organu.

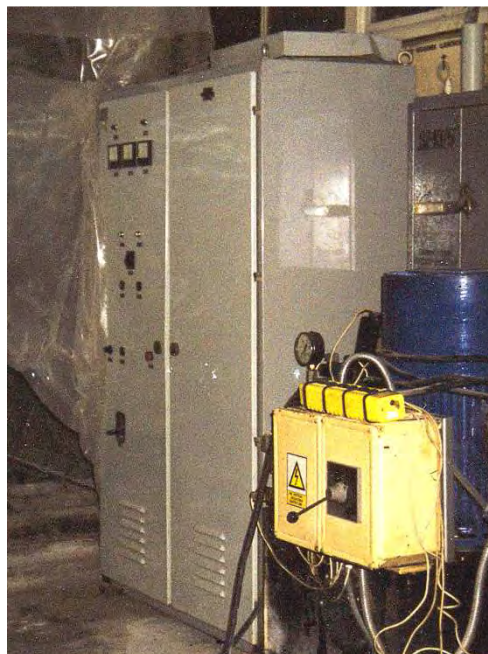
3.2.2. Stanowisko do badania frezujących organów urabiających

Stanowisko do badania frezujących organów urabiających składa się z dwóch podzespołów: napędu organu (silnik elektryczny prądu stałego, przekładnia mechaniczna, łożyskowany wał z końcówką do mocowania organu) i układu posuwu bloku przeznaczonego do urabiania (rurowe prowadnice wzdłużne i poprzeczne, siłowniki posuwu, agregat hydrauliczny, stół do mocowania próbki skalnej).

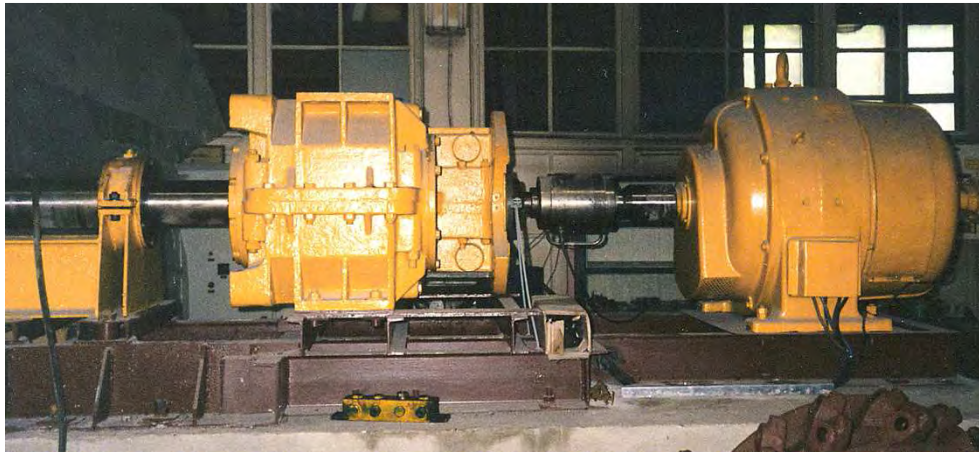
Obroty organu wymuszone jego napędem oraz ruch prostoliniowy próbki skalnej umożliwia realizację procesu urabiania (frezowania) w czasie pracy na pełen zabiór (praca normalna) lub w czasie zawrębiania.

Na stole mechanizmu posuwu może być posadowiona próbka z minerału naturalnego lub sztucznego. W przypadku badania jakości konstrukcji organu celem jest urabianie skały sztucznej, która ma własności izotropowe. W każdym z tych przypadków na stole mechanizmu posuwu można zamocować próbkę skalną o maksymalnych wymiarach: długość 2010 mm, szerokość 1000 mm i wysokość 2000 mm.

Hydrauliczny mechanizm posuwu pozwala na przemieszczanie stołu wraz z blokiem (próbka) z prędkością posuwu w czasie urabiania v_{pu} do 9,23 m/min, a w czasie zawrębiania z prędkością v_{pz} do 4,55 m/min (rys. 7). Natomiast silnik prądu stałego o mocy $N = 140$ kW i obrotach $n = 1340$ obr/min napędzający, poprzez przekładnię mechaniczną o przełożeniu $i = 32$, organ urabiający wymusza obroty tego ostatniego od zera do 42 obr/min (rys. 8).



Rys. 7. Układ (szafa) sterowania i regulacji obrotów organu oraz zasilacz hydrauliczny mechanizmu posuwu bloku skalnego z przetwornikami ciśnień



Rys. 8. Napęd organu: silnik elektryczny prądu stałego, momentomierz, przekładnia mechaniczna, wał do mocowania organu

Układ pomiarowy, stanowiący integralną część stanowiska badawczego, składa się z: momentomierza wbudowanego między silnik elektryczny i przekładnię mechaniczną, przetworników ciśnienia na zasilaniu i spływie siłownika posuwu wzdłużnego (urabianie) i poprzecznego (zawrębianie), pyłomierza CIP-10 (nr 345 – zapylenie respirabilne, nr 78 – zapylenie całkowite, rejestratora.

Parametry konstrukcyjne, kinematyczne i energetyczne stanowiska badawczego oraz układu pomiarowego umożliwiają badanie procesu urabiania organami frezującymi, a szczególnie frezującymi organami ślimakowymi.

3.2.3. Realizacja badań procesu urabiania organami z dyskami i nożami stycznno-obrotowymi

Pierwsze badania przeprowadzono urabiając blok cementowo-piaskowy o wytrzymałości na ściskanie $R_c = 6,8$ MPa organem z dyskami w wersji III.

W czasie urabiania tego bloku (na pełny zabiór) z prędkością posuwu $v_{pu} = 0,56$ m/min i obrotami $n = 20$ i 32 obr/min mierzono moment oporu urabiania, ciśnienie na zasilaniu i spływie siłowników posuwu wzdłużnego i poprzecznego oraz zapylenie. Stosując powyższe kinematyczne parametry urabiania (v_{pu} i n) urobiono około 1,5 m bloku cementowo-piaskowego. Proces urabiania zakończono w momencie pęknięcia próbki skalnej.

Drugą próbkę skalną uformowano z mieszaniny cementu z grysem bazaltowym, co dało jej wytrzymałość na ściskanie po okresie wiązania (30 dni) na

poziomie $R_c = 13,73$ MPa. Próbkę tą urabiano najpierw organem z dyskami stosując $v_{pu} = 0,56$ m/min i $n = 32$ obr/min, mierząc i rejestrując wymienione wyżej wielkości.

Następnie, po założeniu organu z nożami styczno-obrotowymi, procedurę pomiarową stosowaną dla organu z dyskami powtórzono dla tego organu. Jednak w tym przypadku musiano poszukiwać takich parametrów procesu skrawania (v_{pu} , n), by nie następowało zatrzymanie organu. W ostateczności okazało się, że dopiero przy $v_{pu} = 0,103$ m/min i $n = 42$ obr/min możliwe było ciągłe urabianie.

Realizując proces urabiania organem z dyskami lub z nożami styczno-obrotowymi mierzono i rejestrowano wymienione wcześniej wielkości oraz kontrolowano stan techniczny organów.

Zgromadzony materiał badawczy poddano następnie obróbce i analizie.

3.2.4. Opracowanie wyników badań

Zarejestrowane sygnały wielkości mierzonych otrzymane z badań organu z dyskami jak i z nożami styczno-obrotowymi poddano kolejno obróbce w celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących proces urabiania.

Wartość zapylenia respirabilnego i całkowitego wyznaczano na podstawie masy pyłu zgromadzonego w dwóch pyłomierzach typu CIP. Obliczenia wykonano zgodnie z podaną procedurą zawartą w instrukcji tegoż pyłomierza. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1. Wyznaczone wartości zapylenia obliczone zostały dla całego czasu pracy organu w danym dniu przy różnych parametrach v_p i n .

Tabela 1. Zestawienie wartości zapylenia w czasie urabiania dyskami lub nożami styczno-obrotowymi pyłomierzem CIP-10 (nr 345 – respirabilne, nr 78 – całkowite)

Rodzaj narzędzi skrawających	Zapylenie, mg/dcm ³	
	Respirabilne	Całkowite
Dyski, $R_c = 6,8$ MPa	0,0410	0,5113
Dyski, $R_c = 13,73$ MPa	0,0589	0,8015
Noże styczno-obrotowe, $R_c = 13,73$ MPa	0,2330	1,3220
Noże styczno-obrotowe, $R_c = 13,73$ MPa	0,3800	2,7370

W przypadku pozostałych mierzonych wielkości zarejestrowane sygnały poddano obróbce wykorzystując standardowe oprogramowanie ESAM-3000. Dla każdego sygnału wielkości mierzonej wyznaczano wartość średnią, minimalną, maksymalną oraz odchylenie standardowe. Przykładowe zestawienie wyników dla organu z dyskami zamieszczono w tabelach 2, 3 i 4. Natomiast odpowiadające im przebiegi sygnałów dla poszczególnych mierzonych wielkości, otrzymane w czasie pracy tego samego organu ($v_p = 0,56$ m/min, $n = 32$ obr/min, $R_c = 6,8$ MPa), przedstawiono na rys. 9, 10 i 11.

Dokładnie tak samo uczyniono w pozostałych przypadkach. Również dla opisu zmienności procesu urabiania organem z dyskami lub nożami styczo-obrotowymi wyznaczono współczynniki zmienności, definiowane jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej oraz charakterystyki amplitudowościowo-częstotliwościowe. Przykład tych charakterystyk zamieszczono na rys 12, 13 i 14.

Opisany powyżej sposób obróbki sygnałów pomiarowych pozwolił wyznaczyć wymagane parametry potrzebne do opisu procesu urabiania bloku skalnego organem z dyskami i organem z nożami. Wyniki tych zabiegów zestawiono w tabelach 5 i 6. W tabeli 5 zestawiono wartości momentu oporu urabiania M_o , siły posuwu wzdłużnego P_u (urabianie), siły poprzecznej P_z (zawrębianie) oraz współczynniki zmienności tych wielkości. Należy zaznaczyć, że wartości sił P_u i P_z wyznaczono z różnicy sił na powierzchniach tłoków cylindrów siłownika posuwu wzdłużnego i poprzecznego (ciśnienie zasilania \times powierzchnia podtłokowa – ciśnienie splywu \times powierzchnia nadtłokowa). Natomiast w tabeli 6 zestawiono wartości amplitudy momentu oraz ciśnienia zasilania siłownika posuwu wzdłużnego (urabianie) i odpowiadające im wartości częstotliwości.

Tabela 2. Obliczone parametry statystyczne momentu oporu urabiania (organ z dyskami) mierzonym momentomierzem zabudowanym na wale silnika elektrycznego ($v_p = 0,56$ m/min, $R_c = 6,8$ MPa)

1/1 – zero sygnału momentomierza, 5/1 – zero pomiaru I, 5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/1 – zero pomiaru II, 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min, 9/1 – zero pomiaru III, 9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/1 – zero pomiaru IV, 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)

ESAM-3000

PARAMETRY STATYSTYCZNE

Numer proby : 298
 NAZWA PROBY : Badanie organu z dyskami
 Punkt pomiarowy nr : 100
 Nazwa punktu pomiar. : Moment
 Jednostka fizyczna : kNm
 Granica dolna : -10.00
 Granica gorna : 10.00

NR	PRZEDZ.	CZAS(S)	MINIMUM	MAKSIMUM	WART.SRED.	ODCH.STD.	WART.SKUT.	W GRAN.
1	1/1	1.024	-0.01	0.00	-0.00	0.00	0.01	100.00 %
2	5/1	0.960	-0.14	-0.01	-0.07	0.03	0.07	100.00 %
3	5/2	12.608	-2.89	0.45	-1.06	0.40	1.13	100.00 %
4	7/1	0.512	-0.17	0.08	-0.05	0.04	0.06	100.00 %
5	7/2	10.240	-2.98	0.03	-1.21	0.32	1.26	100.00 %
6	9/1	0.384	-0.31	0.04	-0.09	0.08	0.12	100.00 %
7	9/2	7.552	-2.42	-0.22	-1.08	0.37	1.14	100.00 %
8	11/1	0.384	-0.49	0.12	-0.17	0.15	0.23	100.00 %
9	11/2	8.448	-2.27	0.14	-1.16	0.32	1.20	100.00 %

Tabela 3. Obliczone parametry statystyczne ciśnienia zasilania p_{zu} i splywu p_{su} siłownika posuwu wzdłużnego (urabianie) i prędkości $v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa)

1/1 – zero sygnału przetwornika ciśnienia, 5/1 – zero pomiaru I, 5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/1 – zero pomiaru II, 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min, 9/1 – zero pomiaru III, 9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/1 – zero pomiaru IV, 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)

ESAM-3000

PARAMETRY STATYSTYCZNE

Numer proby : 298
 NAZWA PROBY : Badanie organu z dyskami
 Punkt pomiarowy nr : 500
 Nazwa punktu pomiar. : Urabianie
 Jednostka fizyczna : MPa
 Granica dolna : 0.00
 Granica gorna : 50.00

NR	PRZEDZ.	CZAS(S)	MINIMUM	MAKSIMUM	WART.SRED.	ODCH.STD.	WART.SKUT.	W GRAN.
1	1/1	1.024	0.21	0.34	0.28	0.02	0.28	100.00 %
2	5/1	0.960	1.00	1.17	1.05	0.02	1.05	100.00 %
3	5/2	12.608	10.02	19.20	14.55	0.80	14.57	100.00 %
4	7/1	0.512	0.03	0.52	0.30	0.09	0.31	100.00 %
5	7/2	10.240	10.64	18.80	15.15	0.65	15.16	100.00 %
6	9/1	0.384	0.56	0.63	0.60	0.02	0.60	100.00 %
7	9/2	7.552	9.70	16.97	13.20	1.36	13.27	100.00 %
8	11/1	0.384	0.25	0.38	0.32	0.03	0.33	100.00 %
9	11/2	8.448	11.64	18.19	14.63	0.47	14.64	100.00 %

Punkt pomiarowy nr : 600
 Nazwa punktu pomiar. : Powrot urabiania
 Jednostka fizyczna : MPa
 Granica dolna : 0.00
 Granica gorna : 20.00

NR	PRZEDZ.	CZAS(S)	MINIMUM	MAKSIMUM	WART.SRED.	ODCH.STD.	WART.SKUT.	W GRAN.
1	1/1	1.024	-0.06*	0.06	0.00	0.03	0.03	57.03 %
2	5/1	0.960	0.03	0.09	0.06	0.01	0.06	100.00 %
3	5/2	12.608	-3.19*	3.14	0.01	0.27	0.27	70.15 %
4	7/1	0.512	13.36	13.93	13.70	0.11	13.70	100.00 %
5	7/2	10.240	-2.18*	2.19	0.01	0.22	0.22	78.55 %
6	9/1	0.384	0.01	0.13	0.08	0.02	0.08	100.00 %
7	9/2	7.552	-1.54*	1.58	0.04	0.14	0.14	94.31 %
8	11/1	0.384	0.07	0.12	0.09	0.01	0.09	100.00 %
9	11/2	8.448	-1.34*	1.69	0.05	0.10	0.11	96.24 %

Tabela 4. Obliczone parametry statystyczne ciśnienia zasilania p_{zz} i spływu p_{zu} siłownika posuwu poprzecznego (zawrębianie) i prędkości posuwu wzdłużnego

(urabianie) $v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa)

1/1 – zero sygnału przetwornika ciśnienia, 5/1 – zero pomiaru I, 5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/1 – zero pomiaru II, 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min, 9/1 – zero pomiaru III, 9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/1 – zero pomiaru IV, 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)

ESAH-3000

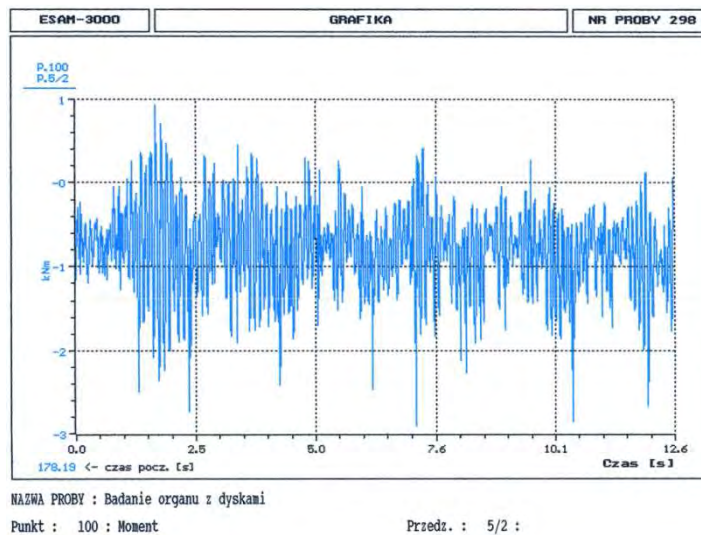
PARAMETRY STATYSTYCZNE

Numer proby : 298
 NAZWA PROBY : Badanie organu z dyskami
 Punkt pomiarowy nr : 300
 Nazwa punktu pomiar. : Zawrębianie
 Jednostka fizyczna : MPa
 Granica dolna : 0.00
 Granica gorna : 50.00

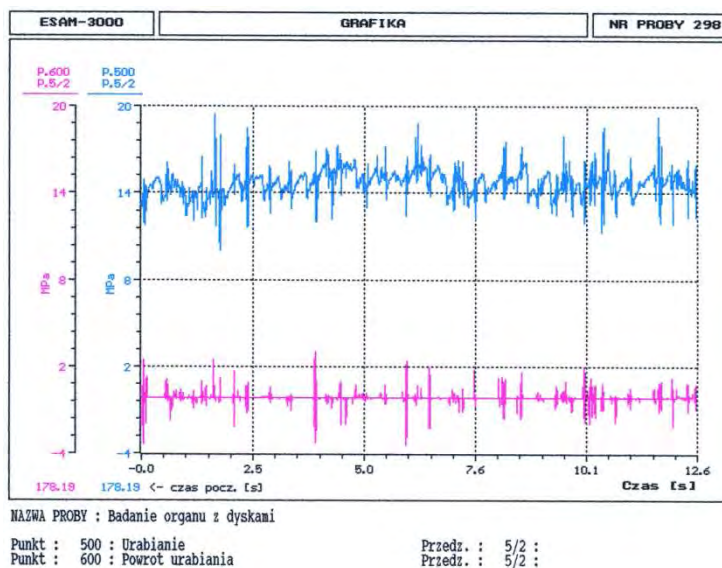
NR	PRZEDZ.	CZAS(S)	MINIMUM	MAKSIMUM	WART.SRED.	ODCH.STD.	WART.SKUT.	W GRAN.
1	1/1	1.024	0.01	0.29	0.14	0.06	0.16	100.00 %
2	5/1	0.960	3.68	3.87	3.77	0.04	3.77	100.00 %
3	5/2	12.608	-4.80*	9.82	2.74	0.62	2.80	99.27 %
4	7/1	0.512	0.42	1.68	1.04	0.22	1.06	100.00 %
5	7/2	10.240	-5.44*	7.57	1.14	0.53	1.26	98.05 %
6	9/1	0.384	-0.13*	0.03	-0.05*	0.03	0.06	9.38 %
7	9/2	7.552	-3.31*	3.05	-0.04*	0.31	0.31	20.74 %
8	11/1	0.384	-0.13*	0.06	-0.04*	0.04	0.06	15.10 %
9	11/2	8.448	-8.09*	7.29	-0.04*	0.65	0.65	22.42 %

Punkt pomiarowy nr : 400
 Nazwa punktu pomiar. : Powrot zawrębiania
 Jednostka fizyczna : MPa
 Granica dolna : 0.00
 Granica gorna : 50.00

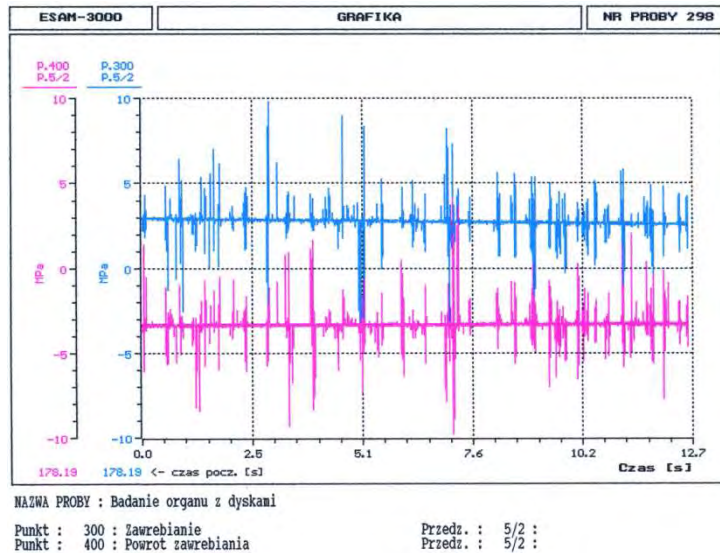
NR	PRZEDZ.	CZAS(S)	MINIMUM	MAKSIMUM	WART.SRED.	ODCH.STD.	WART.SKUT.	W GRAN.
1	1/1	1.024	-3.68*	-3.47	-3.57*	0.05	3.57	0.00 %
2	5/1	0.960	-3.58*	-3.40	-3.50*	0.04	3.50	0.00 %
3	5/2	12.608	-9.81*	4.11	-3.34*	0.60	3.39	0.35 %
4	7/1	0.512	-4.20*	-2.76	-3.41*	0.19	3.41	0.00 %
5	7/2	10.240	-12.52*	4.25	-3.43*	0.69	3.50	0.41 %
6	9/1	0.384	-3.67*	-3.50	-3.59*	0.04	3.59	0.00 %
7	9/2	7.552	-6.67*	0.75	-3.58*	0.30	3.60	0.03 %
8	11/1	0.384	-3.61*	-3.43	-3.52*	0.04	3.52	0.00 %
9	11/2	8.448	-6.60*	2.44	-3.53*	0.26	3.54	0.07 %



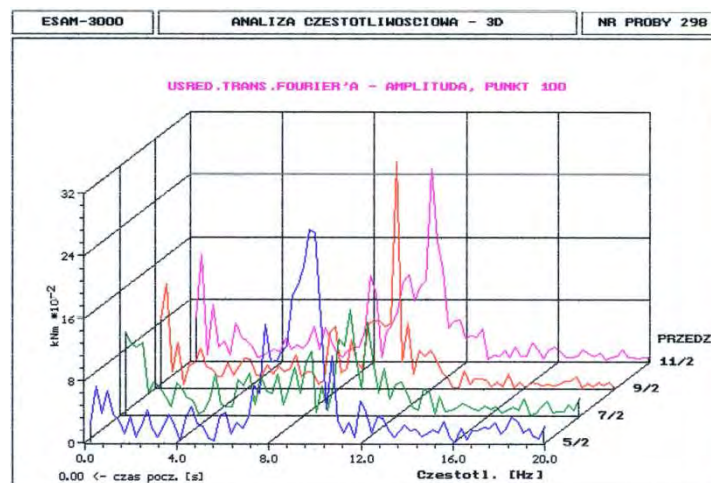
Rys. 9. Przebieg sygnału momentu oporu urabiania (organ z dyskami) dla $v_p = 0,56$ m/min, $n = 32$ obr/min i $R_c = 6,8$ MPa



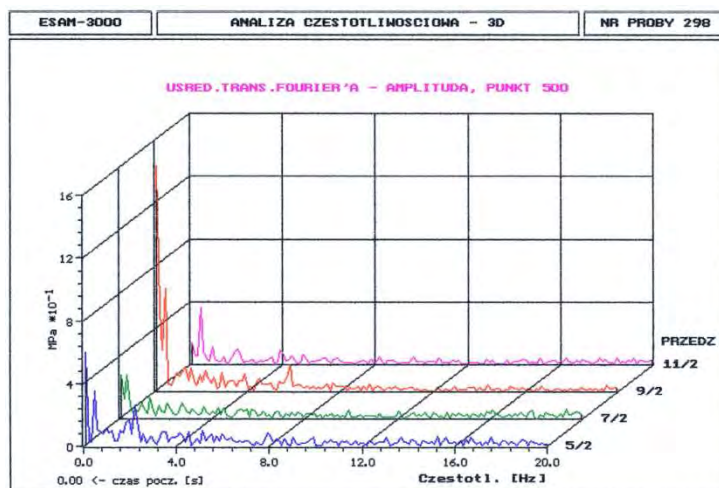
Rys. 10. Przebiegi ciśnienia na zasilaniu p_{zu} (500) i sływie p_{su} (600) siłownika posuwu wzdłużnego (urabianie) i prędkości $v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa) obracającego się z obrotami $n = 32$ obr/min



Rys. 11. Przebiegi ciśnienia na zasilaniu p_{zz} (300) i splywie p_{sz} (400) siłownika posuwu poprzecznego (zawrebianie) i prędkości posuwu wzdłużnego (urabianie) $v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa) obracającego się z obrotami $n = 32$ obr/min



Rys. 12. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe momentów oporu urabiania (organ z dyskami) dla prędkości posuwu $v_p = 0,56$ m/min ($R_c = 6,8$ MPa)
5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min),
9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)



Rys. 13. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe ciśnienia zasilania p_{zu} siłownika posuwu wzdłużnego (urabianie) i prędkości posuwu $v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa)

5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min)
 9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)

Tabela 5. Zestawienie wartości momentu M_o , siły P_u i siły P_z oraz współczynników zmienności tych wielkości

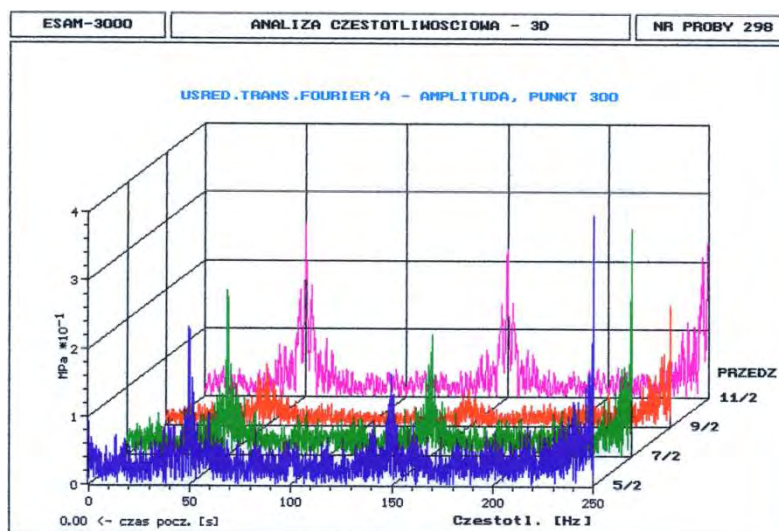
l.p.	Rodzaj narzędzia skrawającego (data pomiaru)	Nr zdarzenia	Obroty organu n , obr/min	Prędkość posuwu v_{sk} , m/min	Moment M_o , kNm	Współczynnik zmienności momentu, $\%_{z.o.}$	Siła posuwu w kierunku urabiania P_u , kN	Współczynnik zmienności posuwu, $\%_{z.o.}$	Siła posuwu w kierunku zawęźbienia P_z , kN	Współczynnik zmienności siły posuwu, $\%_{z.o.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Dyski (16.05.2005) $R_{sc} = 6,8 \text{ MPa}$	5/2	32	0,56	31,68	0,3774	149,4	0,0550	8,910	0,2263
2		7/2	20		37,12	0,2645	164,8	0,0429	-0,352	0,4649
3		9/2	32		31,68	0,3426	139,2	0,1030	1,650	2,0667
4		11/2			31,68	0,2759	158,6	0,0321	1,380	4,6287
5	Dyski (13.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	5/2	32	0,56	32,32	0,5648	171,5	0,0614	-0,930	0,0938
6		7/2			32,00	0,5608	158,4	0,0509	-0,578	0,2727
7		9/2			32,96	0,5636	172,8	0,0236	12,416	0,0610
8	Noże stycznno-obrotowe (23.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	7/2	32	0,56*	28,80	0,6539	43,4	0,3258	6,133	1,5000
9		9/2		49,92	0,3149	57,6	0,2233	-0,905	3,7200	
10		11/1	42	0,26*	48,96	0,3137	50,0	0,2761	-0,540	1,0500
11		13/1		0,103	16,00	1,0200	14,9	0,4034	-6,384	0,2000
12	Noże stycznno-obrotowe (24.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	3/2	32	0,103	16,64	0,9808	20,1	0,5088	2,790	2,0333
13		5/1	42		13,76	1,2791	22,0	0,2460	1,395	0,5789
14		7/1			16,64	1,3654	20,9	0,5932	1,232	0,7222

* - zatrzymanie organu

Tabela 6. Zestawienie wartości częstotliwości i amplitudy dla momentu M_o i siły P_u

l.p.	Rodzaj narzędzia skrawającego (data pomiaru)	Nr zdarzenia	Obroty organu n , obr/min	Prędkość posuwu v_{sk} , m/min	Częstotliwość f , Hz	Amplituda momentu, kNm	Częstotliwość f , Hz	Amplituda ciśnienia zasilania siły P_u , MPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Dyski (16.05.2005) $R_{sc} = 6,8 \text{ MPa}$	5/2	32	0,56	10,010	0,2296	0,122	0,3259
2		7/2	20		10,864	0,1136	0,061	0,1973
3		9/2	32		10,498	0,2711	0,122	1,4390
4		11/2			10,498	0,1707	0,488	0,1806
5	Dyski (13.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	5/2	32	0,56	10,009	0,4329	1,953	0,5614
6		7/2			9,764	0,4262	0,244	0,4762
7		9/2			9,276	0,3864	1,526	0,1177
8	Noże stycznno-obrotowe (23.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	7/2	32	0,56*	6,103	0,1292	0,244	0,3010
9		9/2		17,332	0,1688	0,122	0,2766	
10		11/1	42	0,26*	17,576	0,2641	0,122	0,8970
11		13/1		0,103	17,820	0,2528	17,891	0,2006
12	Noże stycznno-obrotowe (24.06.2005) $R_{sc} = 13,73 \text{ MPa}$	3/2	32	0,103	4,638	0,1440	0,122	0,3137
13		5/1	42		11,229	0,2077	0,122	0,3819
14		7/1			10,985	0,3038	0,122	0,4788

* - zatrzymanie organu



Rys. 14. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe ciśnienia zasilania p_{zz} siłownika posuwu poprzecznego (zawrębianie) i prędkości posuwu wzdłużnego (urabianie)

$v_p = 0,56$ m/min dla organu z dyskami ($R_c = 6,8$ MPa)

5/2 – pomiar I ($n = 32$ obr/min), 7/2 – pomiar II ($n = 20$ obr/min)

9/2 – pomiar III ($n = 32$ obr/min), 11/2 – pomiar IV ($n = 32$ obr/min)

3.2.5. Analiza wyników eksperymentu

Zgromadzony materiał badawczy dotyczący oceny pracy organu z dyskami lub z nożami można podzielić na obserwacje wizualne i wynikające z tego wnioski oraz na wyniki pomiarów otrzymane z opracowania sygnałów wielkości mierzonych.

Obserwując pracę organu z dyskami w czasie urabiania bloku cementowo-piaskowego o wytrzymałości na ściskanie $R_c = 6,8$ MPa zauważono małą ilość pyłu i dużą ilość grubego urobku (tabela 1). Stwierdzono też liczne ślady kontaktu płatów organu z calizną (rys. 15), co świadczy o zbyt dużej podziałce między liniami skrawania. W przypadku tej sztucznej calizny użytej w badaniach należy zmniejszyć podziałkę do takiej wartości, by kontakt płatów z calizną nie występował (rys. 16).

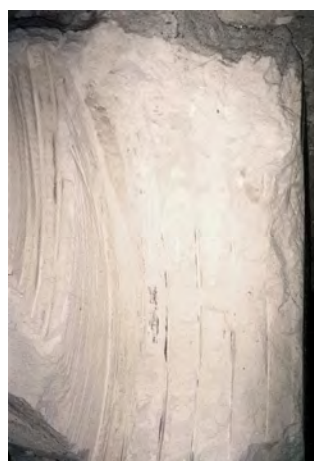
Urabiając tym samym organem blok cementowo-bazaltowy zauważono również ślady kontaktu organu (początki płatów) z calizną lecz tylko na pierwszej linii skrawania. Podziałka między liniami skrawania była za duża tylko w pobliżu tarczy odcinającej, co świadczy o większym kącie bocznego rozkruszania tej

sztucznej calizny, charakteryzującej się wytrzymałością na ściskanie $R_c = 13,73$ MPa. Zapylenie w czasie tych badań było trochę większe niż w przypadku poprzednim, lecz tego samego rzędu.

W czasie urabiania organem z nożami stycznno-obrotowymi bloku cementowo-bazaltowego ($R_c = 13,73$ MPa) wystąpiło bardzo duże zapylenie (tabela 1) utrzymujące się długo jeszcze po przerwaniu badań. Można jednak zauważyć podobną sytuację jak dla dysków, że wartości zapylenia są różne w zależności od stosowanej prędkości posuwu lecz tego samego rzędu. Różnice te są większe, gdyż w czasie pomiarów stosowano większe prędkości posuwu.



Rys. 15. Widok organu z dyskami na stanowisku badawczym ze śladami kontaktu płatów z calizną



Rys. 16. Ślady zostawione na próbce skalnej ($R_c = 6,8$ MPa) przez płaty organu

Mając na uwadze powyższe obserwacje i wartości zapylenia można stwierdzić, że organ z dyskami w czasie swojej pracy powoduje mniejsze zapylenie i wychód urobku o większej granulacji. Jednak koniecznym jest dokonanie korekty układu dyskowego w celu wyeliminowania kontaktu płatów z urabianą calizną, szczególnie przy tarczy odcinającej i początkach płatów.

Wartość momentu oporu urabiania M_o , współczynnika zmienności tego momentu w_{zo} (tabela 5) oraz największa amplituda i częstotliwość, przy której ona występuje (tabela 6) świadczą na korzyść dysków. Łatwo zauważyć, że moment dla organu z dyskami jest mniejszy ($v_p = 0,5$ m/min) od momentu dla organu z

nożami ($v_p = 0,103$ m/min) prawie trzy razy. Zmienność momentu mierzona współczynnikiem w_{zo} również jest mniejsza. Dlatego też w przypadku tych badań i zastosowanych organów można stwierdzić, że organ z dyskami pracował lepiej niż organ z nożami styczno-obrotowymi. Potwierdza to również wartość częstotliwości i amplituda momentu wyznaczona z charakterystyk amplitudowościowo-częstotliwościowych.

Biorąc pod uwagę wartości siły oddziaływania organu w kierunku poprzecznym P_z do ruchu wzdłużnego (urabianie) gdy organ pracuje na pełnym zabiorze, to nie widać tu dużych różnic (tabela 5) zarówno w przypadku wartości średnich jak i współczynników zmienności. Siła P_z ma podobne (porównywalne) wartości średnie i również zmienia kierunek działania zarówno dla organów z dyskami jak i nożami. Dlatego też pracę tych organów można ocenić jednakowo bez wskazania, który z organów jest lepszy.

Natomiast wartości siły oddziaływania organu w kierunku posuwu wzdłużnego P_u (urabianie) są dla organu z dyskami większe, a współczynniki w_{zu} porównywalne (tabela 5). Podobna sytuacja występuje dla częstotliwości i amplitudy ciśnienia zasilania (tabela 6). Dlatego w czasie pracy organu z dyskami należy liczyć się ze znacznym wzrostem siły posuwu P_u choć zmienność tej siły powinna być porównywalna dla organów z nożami styczno-obrotowymi. W czasie urabiania bloku cementowo-bazaltowego siła posuwu P_u dla organu z dyskami była większa prawie 7,5 raza od siły dla organu z nożami styczno-obrotowymi.

3.2.6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania organu wyposażonego w narzędzia dyskowe oraz otrzymane wyniki i ich analiza pozwoliły sformułować następujące wnioski: organ z dyskami wytwarza mniejszą ilość pyłu w czasie urabiania minerału skalnego,

moment oporu urabiania jest również mniejszy, a w tym przypadku (blok cementowo-bazaltowy) prawie trzy razy,

siła oporu posuwu jest dla organu z dyskami większa, a w tej sytuacji prawie 7,5 raza,

współczynniki zmienności momentu oporu urabiania oraz sił P_z i P_u mają porównywalne wartości, co świadczy o podobnej dynamice pracy organów,

należy dokonać zmian konstrukcyjnych, które spowodują brak kontaktu płatów z calizną i zabezpieczą końcówki płatów przy przybierze spągu,

procedurę badawczą zastosowaną dla organu wykonanego w wersji III należy powtórzyć po dokonaniu zmian konstrukcyjnych.

3.3. FREZUJĄCY ORGAN ŚLIMAKOWY PRZEZNACZONY DO BADAŃ RUCHOWYCH

W wyniku przeprowadzonych badań stanowiskowych organu z dyskami (wersja III) dokonano zmian konstrukcyjnych, które uniemożliwiły kontakt płatów z calizną. Powyższe zmiany konstrukcyjne polegały na tym, że zmieniono ułożenie dysków na tarczy odcinającej oraz dodano jedną linię skrawania. Zabiegi te pozwoliły zmniejszyć podziałkę skrawania między ostatnimi dyskami na tarczy odcinającej a pierwszymi na płatach. Na końcówkach płatów zainstalowano dodatkowo cztery uchwyty dyskowe chroniące końcówki płatów przed kontaktem z calizną w czasie przybierki spągu lub stropu.

Dokonanie powyższych zmian pozwoliło na powtórne przeprowadzenie badań stanowiskowych zgodnie z zastosowaną wcześniej procedurą. Widok organu (wersja IV) przygotowanego do badań przedstawiono na rys. 17.

Badania te miały na celu stwierdzenie braku wad konstrukcyjnych zauważonych w czasie pracy organu w wersji poprzedniej (wersja III) oraz ocenę pracy badanego organu (wersja IV). Po przeprowadzeniu badań stwierdzono brak kontaktu zarówno tarczy jak i płatów z calizną (rys. 18).

Pomiary zapylenia mierzone w czasie całego cyklu badań (pięć odcinków) choć wyższe niż w poprzednich badaniach (respirabilne $0,091 \text{ mg/m}^3$, całkowite $1,149 \text{ mg/m}^3$) są i tak niższe niż dla organu z nożami. Wzrost zapylenia należy tłumaczyć tym, że dla tych samych obrotów organu ($n = 32 \text{ obr/min}$) stosowano dwie prędkości posuwu. Najpierw dla dwóch odcinków pomiarowych prędkość była większa ($v_p = 0,469 \text{ m/min}$), a dla trzech kolejnych mniejsza, porównywalna z prędkością posuwu dla organu z nożami ($v_p = 0,167 \text{ m/min}$). Zastosowanie dwóch prędkości posuwu wynikało z konieczności zapewnienia prawie tych samych warunków pracy organu z dyskami jak i z nożami.



Rys. 17. Frezujący organ ślimakowy (wersja IV) na stanowisku badawczym



Rys. 18. Próbką skalną ($R_c = 13,73$ MPa) ze śladami skrawów i brakiem śladów kontaktu organu z calizną

Średnia wartość momentu M_o z dwóch pomiarów, gdzie prędkość posuwu miała wartość $v_p = 0,469$ m/min wynosiła 38,08 kNm ($w_{zo} = 0,5572$). Natomiast siła posuwu P_u w kierunku urabiania osiągnęła wartość 165,3 kN ($w_{zu} = 0,045$), a siła P_z w kierunku zawrębiania wartość 0,9165 kN ($w_{zw} = 0,4028$).

Dla mniejszej prędkości posuwu ($v_p = 0,167$ m/min) wartości zmierzonych wielkości miały następujące wartości:

$$M_o = 29,3 \text{ kNm} (w_{zo} = 0,9479)$$

$$P_u = 126,8 \text{ kN} (w_{zu} = 0,1689)$$

$$P_z = 4,71 \text{ kN} (w_{zw} = 1,7562)$$

Porównując te wyniki z danymi zawartymi w tabeli 5 łatwo zauważyć, że wprowadzenie dodatkowej linii skrawania zwiększyło, choć niewiele, wartość momentu oraz siły P_u . Obciążenie dynamiczne (w_z) pozostało na tym samym poziomie.

3.4. ZAKOŃCZENIE

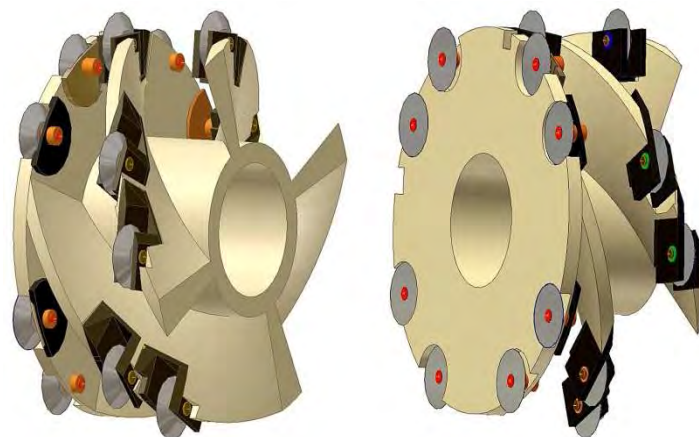
Przeprowadzone badania stanowiskowe organu z dyskami (wersja IV) oraz otrzymane wyniki pozwalają na realizację prób ruchowych w warunkach wyrobiska ścianowego kopalni węgla kamiennego. Oczywiście organ ten należy traktować jako egzemplarz prototypowy i wnikliwie obserwować jego pracę. Wnioski wynikające z prób ruchowych pozwolą na doskonalenie konstrukcji zarówno organów jak i uchwytów czy dysków.

4. BADANIA NUMERYCZNE ODDZIAŁYWANIA DYSKOWEGO NARZĘDZIA URABIAJĄCEGO NA SKAŁĘ

4.1. WPROWADZENIE

Poszukiwania odpowiednio trwałych narzędzi urabiających, zapewniających równocześnie uzyskiwanie odpowiednio wysokich wydajności urabiania, zwłaszcza w przypadku skał o dużej ścierności i wytrzymałości na ściskanie, jest od lat przedmiotem szeregu badań, tak w kraju jak i na świecie. Jedną z konstrukcji spełniających te wymagania, mogą być narzędzia dyskowe, jednak stan badań nad ich wykorzystaniem w kombajnach ścianowych i chodnikowych do urabiania selektywnego, jest ciągle niewystarczający. Znaczące sukcesy w tym zakresie, odnotowuje się natomiast w przypadku tzw. dysków symetrycznych, stosowanych w kombajnach pełno-przekrojowych, które wykorzystuje się do drażenia tuneli.

Z danych literaturowych wynika, że dla przebiegu procesu urabiania skały dyskiem, istotne znaczenie mają czynniki związane z: właściwościami skały (np. wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie), geometrią dysku (kąt zarysu dysku β , promień zaokrąglenia „krawędzi skrawającej”), parametrami technologicznymi procesu urabiania (głębokość skrawania lub inaczej głębokość penetracji dysku w skałę - g , odległość od wcześniejszego przejścia dysku zwana podziałką skrawania - t).

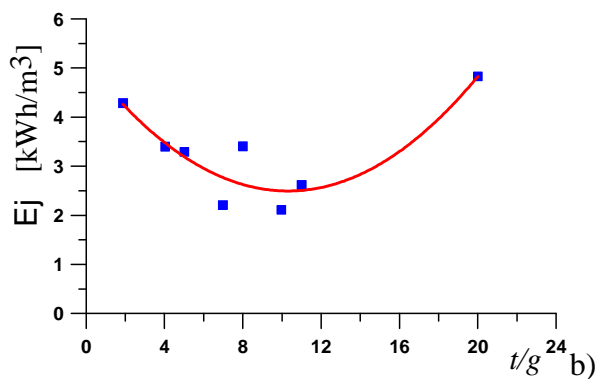
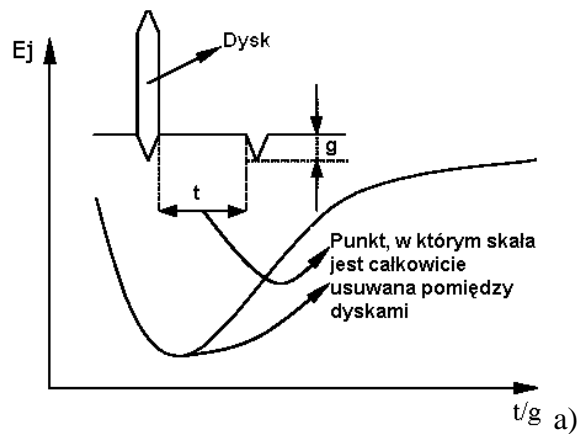


Rys. 1. Głowica frezująca z zamontowanymi, asymetrycznymi dyskami urabiającymi [1]

W przypadku tzw. dysków asymetrycznych, czynnikiem, który może mieć istotne znaczenie dla przebiegu urabiania, a który stosunkowo jest najmniej poznany, może być również orientacja dysku, tj. jego ustawienie, względem wcześniej wykonanego wyłomu w skale (przez poprzedzający dysk, ulokowany na spirali głowicy urabiającej).

4.2. Wpływ proporcji parametrów skrawania: podziałki i głębokości

Z szeregu badań wynika, że dla procesu urabiania dyskami, podobnie jak i innymi narzędziami, istotne znaczenie ma zwłaszcza proporcja parametrów t oraz g (t/g), której optymalna wartość zmienia się w dość szerokich granicach (od 4÷12 i więcej), zależnie od parametrów mechanicznych skały, co dla dysków symetrycznych, ilustruje rys. 2b.



Rys. 2. Wpływ proporcji t/g na kształtowanie się jednostkowej energii urabiania E_j

Według np. Snowdona [2], w zależności od wartości wytrzymałości na ściskanie skał R_C , dla dysków symetrycznych, optymalna wartość rozpatrywanej proporcji wynosi:

skały umiarkowanie zwięzłe (wytrzymałe), gdzie $R_C < 25$ MPa, $t/g = 3$

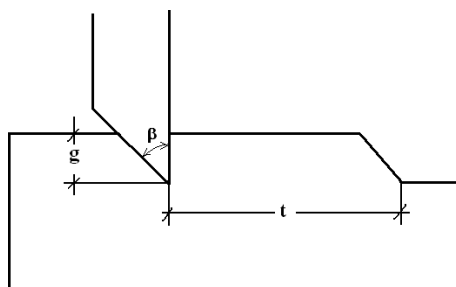
skały zwięzłe, gdzie $25 < R_C < 100$ MPa, $t/g = 5 \div 10$

skały o dużej wytrzymałości, $R_C > 100$ MPa, $t/g = 10 \div 15$.

Mając powyższe na uwadze, przeprowadzono badania numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych, mające w pierwszej kolejności dać odpowiedź na temat wpływu proporcji t/g na kształtowanie się trajektorii odpajania skały dyskiem jak i siły na dysku w trakcie propagacji szczeliny towarzyszącej odpajaniu elementu wióra.

4.3. Założenia analizy MES

W analizie uwzględniono oddziaływanie dysku asymetrycznego o kącie zbieżności $\beta = 30^\circ$, skierowanego podstawą w stronę wcześniejszych przejść (powierzchni obrabianej), co ilustruje rys. 3. Dysk ten oznaczano jako „lewy” lub inaczej $30^\circ/0^\circ$. Zagadnienie było analizowane w płaszczyźnie przekroju osiowego dysku, prostopadłe do kierunku jego obtaczania i równocześnie prostopadłej do dna wrębu wycinanego dyskiem.



Rys. 3. Model oddziaływania dysku asymetrycznego na skałę

Parametry wytrzymałościowe skały (model D):

moduł Younga $E = 2,31 \times 10^4 \text{ MPa}$,

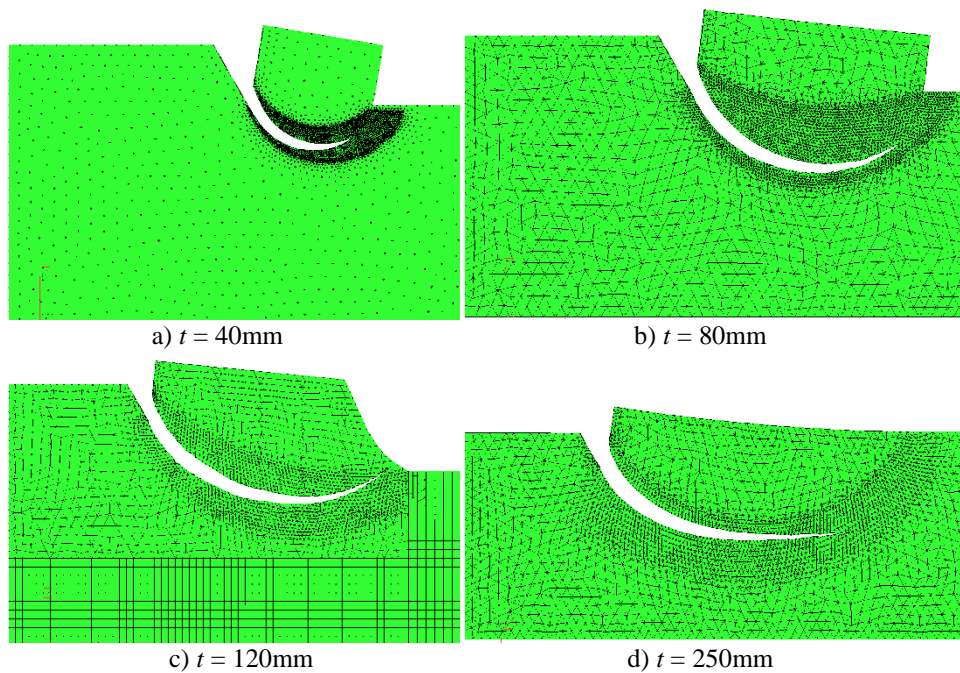
liczba Poissona $\nu = 0,2$,

wytrzymałość na ściskanie $R_c = 15 \text{ MPa}$,

wytrzymałość na rozrywanie $R_t = 1,5 \text{ MPa}$.

Analizowano zagadnienie dla $g = 20 \text{ mm}$ oraz podziałki t równej odpowiednio $t = 40, 80, 120$ oraz 250 mm , co odpowiada wartościom proporcji $t/g = 2, 4, 6, 12,5$.

Analizę numeryczną przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES) wykorzystując autorski program *CrackPath*[3] oraz wybrane moduły pakietu ALGOR. Jako kryterium inicjacji szczeliny użyte zostało kryterium zaproponowane przez J. Podgórskiego [4,5]. Wyniki obliczeń wizualizowane za pomocą modułu *Sview* ALGORA pokazane zostały na rysunkach (4a,b,c,d).

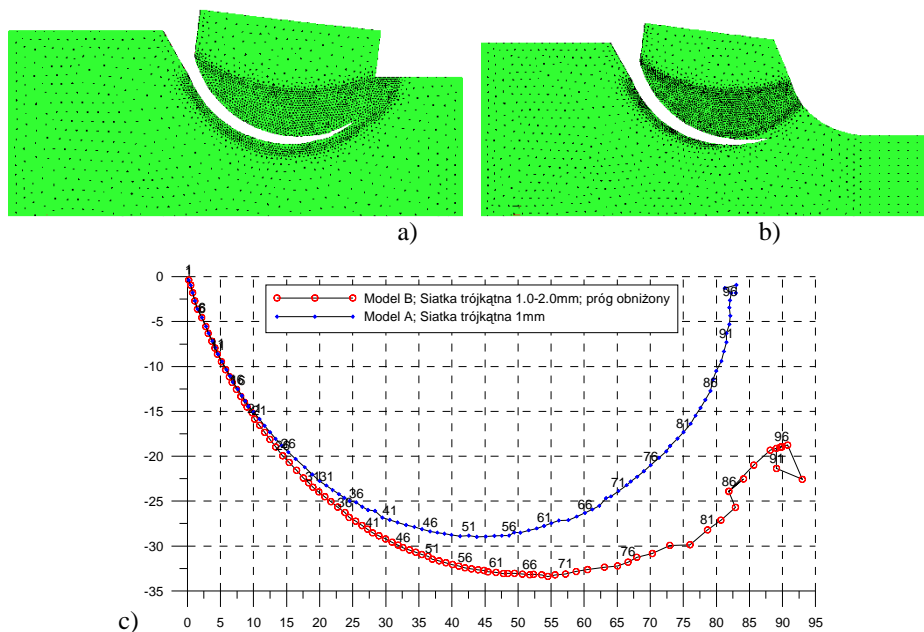


Rys. 4. Wpływ podziałki na zasięg trajektorii odspajania

Po analizie obrazów symulacji można zauważyć, że niezależnie od odległości dysku od poprzedniej bruzdy, pęknięcie odbywa się po tej samej trajektorii, zbliżonej do wynikającej z teorii skrawania Evansa. Jedynie dla bardzo dużej podziałki, układ równowagi sił sprzyja penetracji szczeliny niemal równoległe do powierzchni, z nieznaczną tendencją do wychodzenia szczeliny na powierzchnię.

Z rysunku 4c wynika, że dla zadanych parametrów wytrzymałościowych skały, parametrów dysku oraz głębokości skrawania, graniczna odległość od progu, dla której szczelina przetnie podstawę wióra na wysokości powierzchni obrobionej, wynosi około 120mm (optymalna proporcja t/g wynosi wtedy około 6).

W wariacie pokazanym na rysunku 4c i d, zmieniono formę powierzchni bocznej próbki ukształtowaną w poprzednim przejściu (po prawej stronie modelu), na formę bardziej zbliżoną do rzeczywistego odłupania skały (założono pochylenie powierzchni pod kątem 45°). Celem tego zabiegu było zbadanie wpływu stopnia uproszczenia procesu, poprzez zmianę geometrii modelu, na wynik symulacji. Rysunek 5, ilustruje zaobserwowane zmiany dla podziałki $t=80\text{mm}$. Głębokość bruzdy we wszystkich analizach jest stała.



Rys. 5. Wpływ zmiany ukształtowania bruzdy we wcześniejszym przejściu dysku, na zasięg trajektorii pęknięcia.

Jak wynika z rys. 5a, ostre zakończenie progu skalnego skutkuje mniejszym zasięgiem trajektorii odspajania. Przy czym kształt trajektorii jest regularny, zbliżony do okręgu. W drugim przypadku, zasięg odspojenia nieco wzrasta, kształt trajektorii ulega pewnemu spłaszczeniu. Na podstawie analizy rys. 4 i 5 można wyciągnąć wniosek, że szczelina penetruje głębiej niż wynika to z założonej penetracji dysku g (założonej głębokości skrawania). Zmiana zasięgu trajektorii szczeliny, nie jest więc tutaj wiele znacząca.

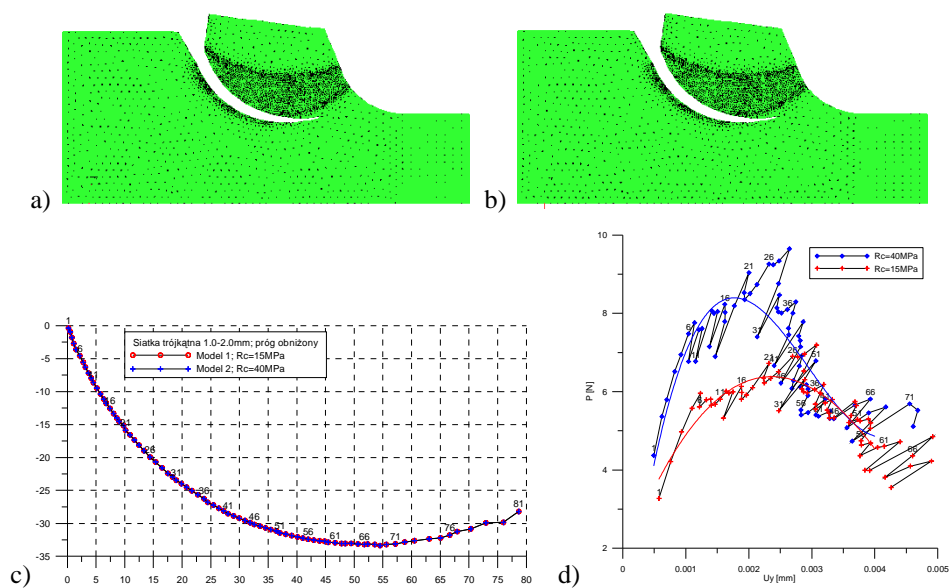
4.4. Wpływ parametrów wytrzymałościowych skały

Celem zbadania wpływu zmiany wytrzymałości skały, na zasięg szczeliny i obciążenie dysku, przeprowadzono symulację dla dwóch różnych zestawów parametrów wytrzymałościowych skał. Wykorzystano model I oraz zastosowano model II, o kombinacji parametrów :

moduł Younga $E=3,6 \times 10^4 \text{MPa}$,

liczba Poissona $\nu=0,2$,

wytrzymałość na ściskanie $R_c=40\text{MPa}$,
 wytrzymałość na rozrywanie $R_t= 2\text{MPa}$.
 parametry technologiczne $g=20\text{mm}$, $t=40\text{mm}$.
 parametry dysku $30^\circ/0^\circ$ (lewy).



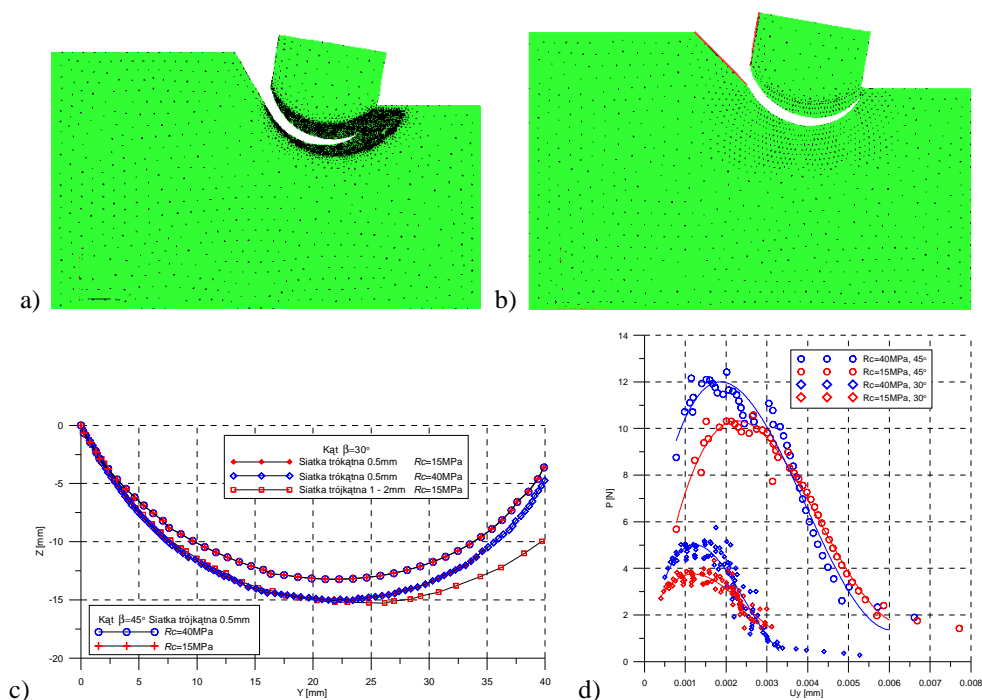
Rys. 6. Wpływ zmiany parametrów mechanicznych skały, na: kształt elementu wióra
 a) $R_c=15\text{MPa}$, b) $R_c=40\text{MPa}$; c) zasięg trajektorii odpajania; d) siłę odporową skały na dysk

Wyniki ilustruje Rys. 6, z analizy którego wynika, że wzrost wytrzymałości skały nie ma istotnego wpływu na zasięg odpajania. Trajektorie szczelin (rys. 6c) są identyczne, dla obu skał. Z kolei jak wynika z rys. 6d, zmiana tego parametru skały, powoduje gwałtowny wzrost siły odporowej skały na dysk. W tym przypadku z około 6,2N do około 8,5N.

4.5. Wpływ kąta dysku

Aby przeanalizować wpływ wartości kąta dysku, w kolejnym etapie analizy wykorzystano dodatkowo model dysku o kącie $\beta=45^\circ$. Pozostałe warunki symulacji były jak poprzednio, tj. pierwszy model materiałowy, podziałka $t=40\text{mm}$, głębokość $g=20\text{mm}$.

Wyniki analizy wykazują, że przy dostatecznej dokładności obliczeń (zagęszczona siatka elementów) różnice w kształcie i zasięgu propagującej szczeliny są niewielkie. Natomiast wyraźnie widoczny jest wpływ wartości kąta dysku β na wartość siły odporowej. Jak wynika z rys. 7d, zmiana kąta tworzącej dysku z 30° na 45° , skutkuje prawie 2,5 krotnym wzrostem siły odporowej.



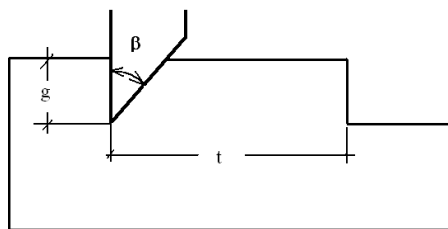
Rys. 7. Wpływ wytrzymałości na ściskanie R_c oraz kąta dysku β , na: wymiar wióra a) $\beta = 30^\circ$, b) $\beta = 45^\circ$; trajektorię szczeliny c); wartość siły odporowej na dysku d)

4.6. Wpływ orientacji dysku

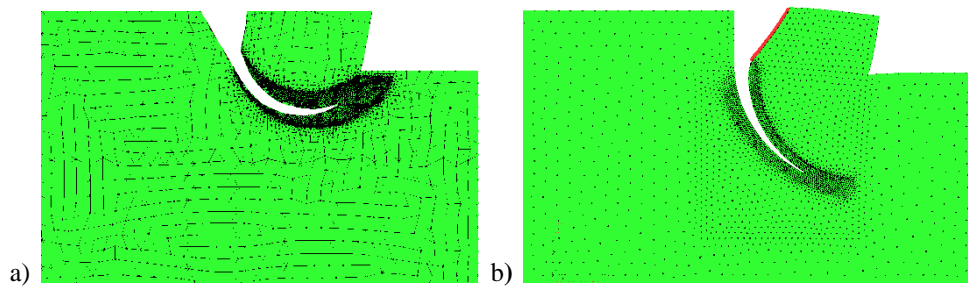
Ponieważ w literaturze brak jest satysfakcjonujących informacji, która pozycja dysku względem poprzednio wykonanej bruzdy jest bardziej korzystna, rozpatrzono dodatkowo przypadek dysku zorientowanego podstawą w stronę przeciwną niż dotychczas (rys. 8).

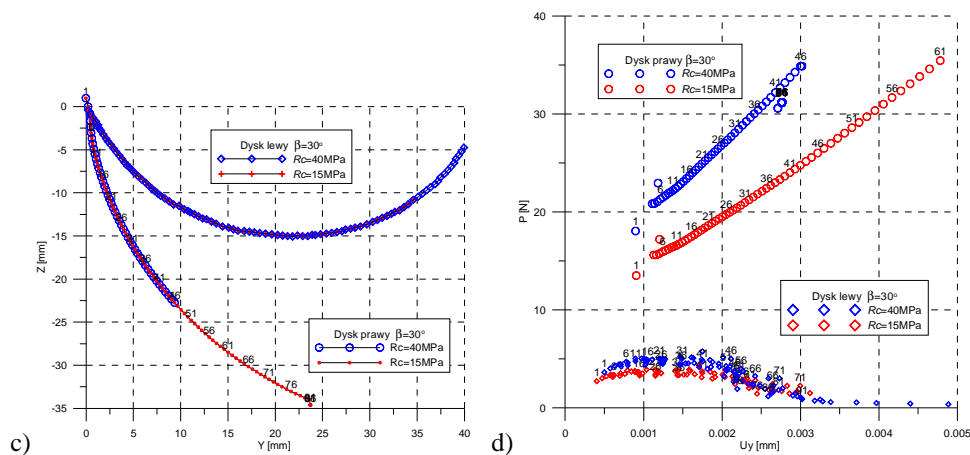
Wyniki uzyskane dla I modelu materiału, oraz dla dysku w wariacie lewym ($30^\circ/0^\circ$) i prawym ($0^\circ/30^\circ$), ilustruje rys. 9. Z analizy rys. 9a, b oraz c, wynika, że zmiana orientacji dysku (na dysk „prawy”) względem poprzednio wykonanych

przejsć dysku, powoduje bardziej wglębna penetrację szczeliny. Z kolei rys. 9d ilustruje jak gwałtowny jest wzrost siły odporowej dla dysku „prawego”, tj. $0^\circ/30^\circ$. Nie udało się w symulacji uzyskać całego przebiegu penetracji szczeliny dla tego dysku, z uwagi na jej zatrzymywanie się w „martwym punkcie” (w pokazanym przykładzie już po 46 iteracji). Nie udało się również osiągnąć lokalnego maksimum siły, która cały czas rosla w miarę penetracji dysku (rys. 9d). Materiał jest zaciskany pod dyskiem i nie daje się prowadzić w sposób sensowny dalszej analizy pęknięcia.



Rys. 8. Model oddziaływania dysku asymetrycznego, tzw. „prawego” ($0^\circ/30^\circ$)





Rys. 9. Wpływ orientacji dysku względem poprzednich przejść, na kształtowanie się elementu wióra a) $\beta=30^\circ/0^\circ$, b) $\beta=0^\circ/30^\circ$; trajektorii odpajania c); kształtowanie się siły odporowej na dysku d)

4.7. Podsumowanie

Przyjęty sposób symulacji pracy dysku asymetrycznego jest dużym uproszczeniem rzeczywistego procesu. Dla szeregu symulacji uzyskano zbieżność uzyskiwanych wyników, co sugeruje o poprawności obliczeń prowadzonych wg przyjętego modelu oraz procedury obliczeniowej. Należy mieć jednak na uwadze, że w rzeczywistości oddziaływanie dysku na skałę jest o wiele bardziej złożone. Celowym by było zatem, aby w dalszych etapach analizy, symulacje prowadzić w przestrzeni 3D. Jest to jednak w chwili obecnej, z wielu względów bardzo trudne do realizacji. Wydaje się również, że celem rozszerzenia stanu wiedzy nad urabianiem dyskami, można przeprowadzić analizy w płaszczyźnie prostopadłej do rozpatrywanej dotychczas.

4.8. Literatura

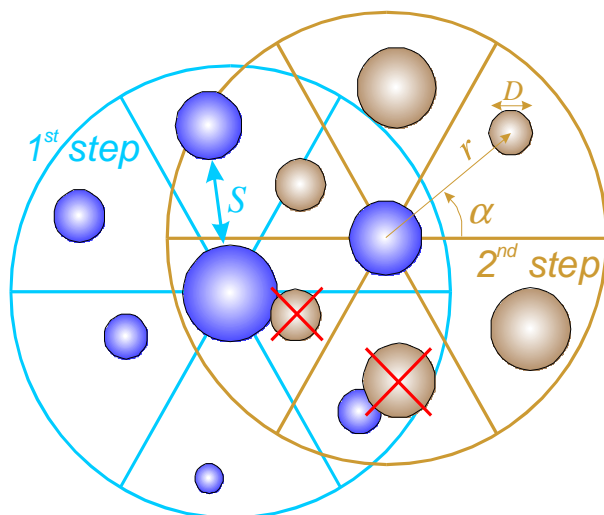
- [1] Krauze K.: Organy z narzędziami dyskowymi dla kombajnów ścianowych. Mat. II Międzynarodowe Sympozjum „Nowe rozwiązania w budowie i bezpiecznej eksploatacji polskich wysokowydajnych kombajnów ścianowych”, Wisła 7-8 października 2004r, s. 31-39.
- [2] Snowden RA, Ryley MD, Temporal J. A study of disc cutting in selected British rocks. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1982;19:107–21.
- [3] J. Podgórski, T. Nowicki, J. Jonak, Fracture analysis of the composites with random structure, *IWCMM 16*, Sep 25-25,2006, Lublin, Poland
- [4] Podgórski J.(1985), General Failure Criterion for Isotropic Media. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 111 2, 188-201.
- [5] Podgórski J. (2002), Influence Exerted by Strength Criterion on Direction of Crack Propagation in the Elastic- Brittle Material. *Journal of Mining Science* 38 (4); 374-380, July- August, Kluwer Academic/Plenum Publishers.

5. ANALIZA PROPAGACJI RYSY W MATERIAŁACH O LOSOWEJ STRUKTURZE

5.1. Generowanie losowej struktury modelu

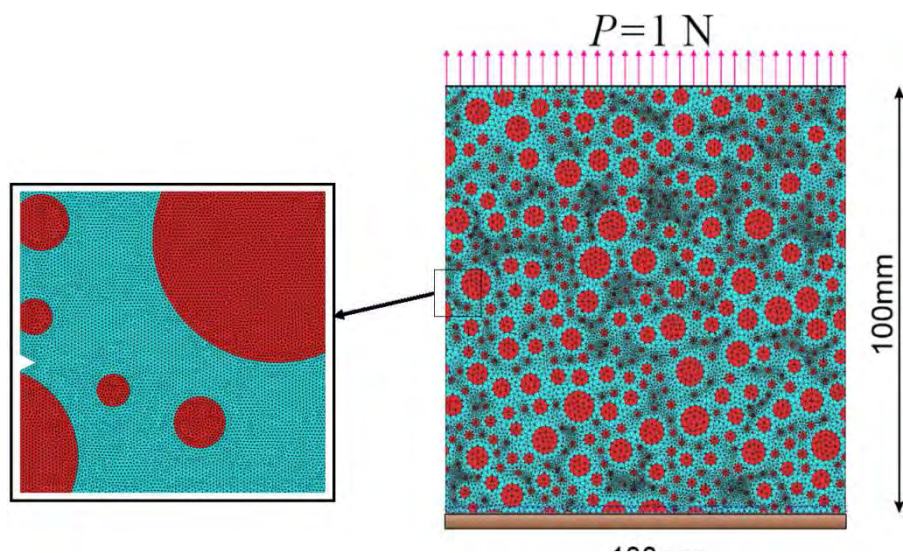
W celu wygenerowania geometrii modelu zawierającego losowo rozłożone inkluzje otoczone materiałem matrycy, autorzy proponują algorytm nazwany Grains Neighbourhood Areas (GNA), który tworzy modele ośrodka w sposób zbliżony do proponowanego przez Van Miera i Van Vlieta [1] algorytm „larger first”, działa jednak zdecydowanie szybciej. W proponowanej metodzie używane są trzy generatory liczb losowych oparte na rozkładach prawdopodobieństwa: równomiernego, normalnego (Gaussa) oraz Fullera. Generator rozkładu Fullera otrzymany został z dystrybuanty rozkładu którą przyjęto w postaci krzywej przesiewu Fullera. Średnice ziaren, które są rozmieszczane w przestrzeni modelu wyznaczone są za pomocą generatora Fullera. Generator rozkładu równomiernego jest używany do otrzymania kąta w biegunowym układzie współrzędnych, który określa kierunek położenia lokowanego ziarna. Generator rozkładu równomiernego używany jest też do określenia odległości kolejnych ziaren w przypadku próbek A a generator Gaussa w przypadku próbek B. Każde nowe ziarno jest lokowane w sąsiedztwie ziarna poprzedniego. Obszar sąsiedztwa definiowany jest jako koło o zadanym promieniu, podzielone na 6 sektorów. W każdym niezajętym jeszcze sektorze próbowane są rozmieszczenia kolejnych losowych ziaren. Proces rozmieszczania ziarna zakłada, że współrzędne biegunowe w każdym sektorze zmieniają się w przedziale (α, r) : $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$, $R_{min} \leq r \leq R_{max}$. Jeżeli generowane ziarno i jego położenie nie koliduje z istniejącym już w modelu ziarnem próbę uznaje się za udaną w przeciwnym przypadku podejmowana jest kolejna próba. Liczba prób N jest jednym z parametrów algorytmu i decyduje o stopniu upakowania materiału. Otrzymana w ten sposób struktura jest następnie dyskretyzowana w celu otrzymania siatki elementów skończonych. W prezentowanej pracy następujące parametry generatorów losowych zostały przyjęte: średnice ziaren $D_{min}=1\text{mm}$, $D_{max}=8\text{mm}$; odległość między ziarnami $S_{min}=D_{min}$, $S_{max}=D_{max}$. Liczba prób $N=10$ powoduje otrzymanie „numerycznych próbek o stopniu upakowania na poziomie 40%. Działanie algorytmu pokazuje schematyczny rysunek (rys. 1), gdzie ziarna umieszczone w kroku nr 1 zaznaczone są kolorem niebieskim a ziarna rozmieszczane w kroku następnym kolorem brązowym. Jak widać granice przedziału, w którym

wyznaczana jest wartość współrzędnej biegunowej r , należy ustalić następująco:
 $R_{min} = (D_i + D_{i+1})/2$, $R_{max} = R_{min} + S_{max}$.

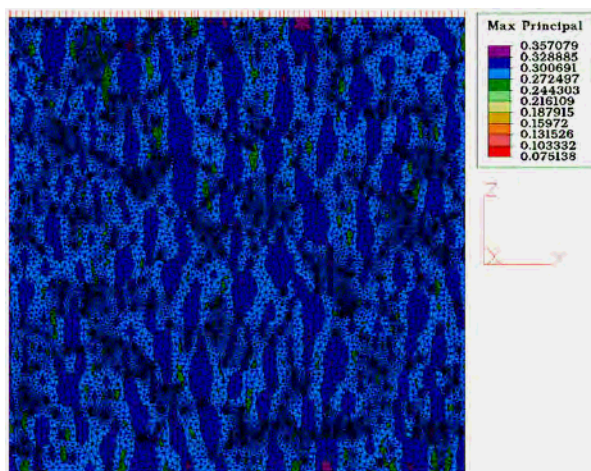


Rys. 1. Schemat ilustrujący algorytm generowania losowej geometrii

Geometrię modelu MES otrzymanego za pomocą opisanego generatora pokazuje rys. 2. Wygenerowano kilkanaście „*numerycznych próbek*” o wymiarach 100mm×100mm zarówno typu A (z rozkładem równomiernym promienia) jak i typu B (z rozkładem Gaussowskim). Próbki zostały poddane jednoosiowemu stanowi naprężenia. W celu dalszej analizy pęknięcia wytworzono niewielki trójkątny karb 0.5mm×0.5mm na boku próbki (rys. 2). Rozkład naprężeń głównych w jednej z takich próbek pokazuje rys. 3. Analiza rozkładów naprężeń dla obu typu próbek opisana została we wcześniejszej pracy autorów [2].



Rys. 2. Warunki brzegowe i losowy rozkład ziaren w przykładowej próbce

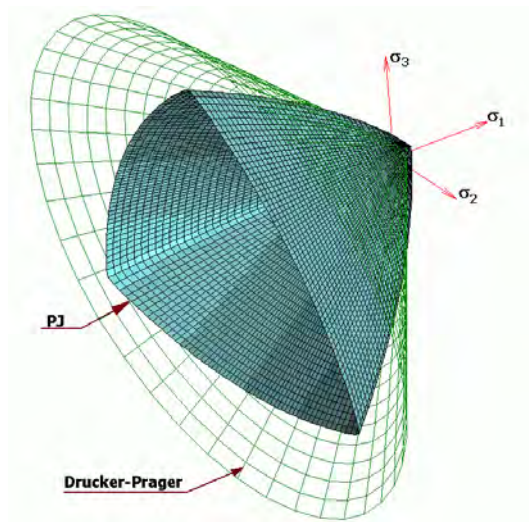


Rys. 3. Rozkład naprężeń głównych w przykładowej próbce

5.2. Analiza pęknięcia

Analiza pęknięcia przeprowadzona została za pomocą autorskiego programu *CrackPath*, w którym wykorzystano technikę przesuwanych okien o dużej gęstości siatki MES. Technika ta zakłada dużą gęstość siatki elementów w okolicach wierzchołka szczeliny oraz rzadką siatkę w obszarze oddalonym od szczeliny. Wewnątrz okna z gęstą siatką materiał kompozytu modeluje się tak dokładnie jak jest to możliwe a poza tym oknem materiał modelowany jest jako ośrodek jednorodny (zhomogenizowany), o charakterystykach sprężystych określonych w procedurach homogenizacyjnych. Okno z zagęszczoną siatką przesuwane jest wraz z wierzchołkiem szczeliny w każdym kroku obliczeniowym lub (co przyspiesza nieco obliczenia) co kilka kroków, w których obliczane jest położenie wierzchołka szczeliny (rys. 5). Punkt w którym inicjowana jest szczelina wyznaczany jest w każdym kroku za pomocą sprawdzania warunku zniszczenia *PJ* opisanego we wcześniejszych pracach jednego z autorów [3,4]. Kształt powierzchni zniszczenia związanej z tym warunkiem pokazany został na rys. 4.

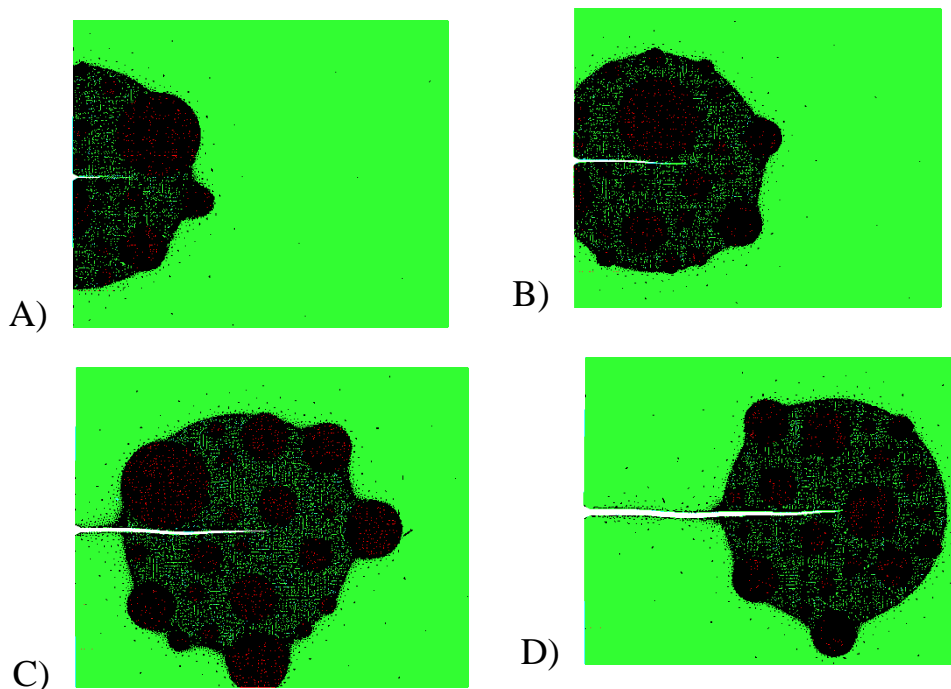
Technika przesuwanego okna o dużej gęstości prezentowana była we wcześniejszych pracach autorów [5,6]



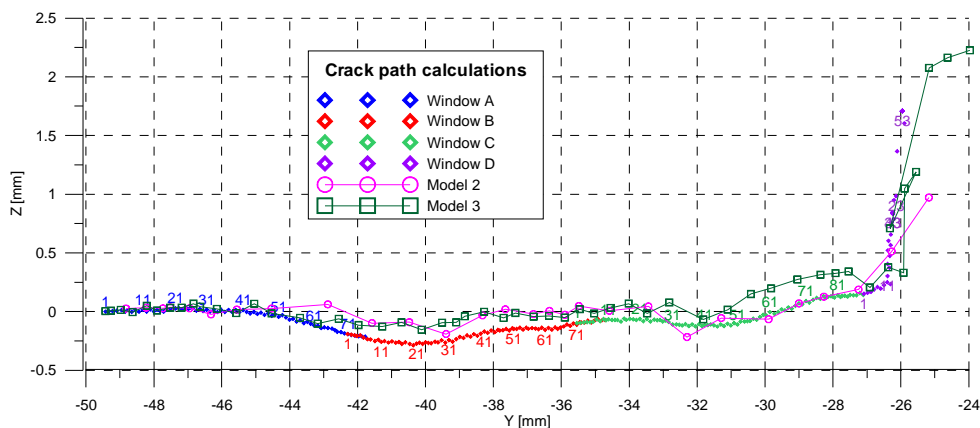
Rys. 4. Warunek inicjowania szczeliny *PJ* [4,5]

Ta prosta procedura zmiany siatki modelu w trakcie obliczeń (re-meshing) znacząco zmniejsza ($3\div 4$ razy) rozmiary zadania numerycznego, które należy rozwiązać co związane jest ze zmniejszeniem liczby węzłów modelu MES.

Rysunki 5 i 6, pokazują wyniki obliczeń ścieżki propagującej szczeliny z zastosowaniem 4 okien (oznaczonych literami A, B, C, D) zagęszczonej siatki. Siatka wygenerowana dla modelu C (rys. 5C), zawiera 42326 węzłów. Siatka o tej gęstości pozwala na wykonanie ok. 80 kroków obliczeń szczeliny bez zmiany okna (rys. 5).



Rys. 5. Widok propagującej szczeliny w przypadku 4 okien z zagęszczoną siatką



Rys. 6. Ścieżka propagacji szczeliny wyznaczona dla 4 okien oraz innych modeli

Analiza propagacji szczeliny w opisanej „próbce numerycznej” wykonana została przez autorski program *CrackPath* oraz dzięki technice poruszającego się okna o zagęszczonej siatce. Program oblicza pole naprężeń używając metody elementów skończonych a następnie poszukuje punktu inicjacji szczeliny na podstawie kryterium *JP* [4,5]. W punkcie o najwyższym wyężeniu zakłada się kontynuację szczeliny o kierunku zgodnym z kierunkiem maksymalnego naprężenia głównego. Modyfikowana jest wtedy siatka w okolicach wierzchołka szczeliny tak aby dodać kolejny fragment o długości równej rozmiarowi elementu przeciętego szczeliną. Procedura jest kontynuowana tak długo aż zostanie osiągnięta zadana liczba kroków lub szczelina przestanie propagować [5,6].

Inne sposoby analizy propagującej szczeliny w materiałach niejednorodnych opisali np. Bażant [7], Carpinteri i inn. [8], Mishnaevsky [9].

Okna o zagęszczonej siatce prezentowane w tej pracy zostały wygenerowane jako kołowe obszary o promieniu $r \approx 10\text{mm}$ utworzonego wokół wierzchołka szczeliny. Ziarna leżące na brzegu obszaru włączone zostały do niego w całości aby wykluczyć powstawanie sztucznych efektów koncentracji naprężeń przy przejściu w materiał zhomogenizowany. Model pokazany na rys. 5 (Model 1 z oknami A,B,C,D) został utworzony przy założeniu stałych materiałowych podanych w Tabelicy I, gdzie oznaczono:

E – moduł Younga, ν – współczynnik Poissona,
 R_c – wytrzymałość na ściskanie, R_r – wytrzymałość na rozciąganie.

Tablica I Stałe materiałowe

Materiał	E [GPa]	ν	Rc [MPa]	Rr [MPa]
Inkluzje	36	0.2	44	4
Matryca	27	0.2	22	2
Homogen	29	0.2	22	2

5.3. Wnioski

Analiza zniszczenia bazująca na MES i technice o zmiennej siatce elementów, wymaga gęstej siatki w okolicach wierzchołka szczeliny dla otrzymania rezultatów o satysfakcjonującej dokładności. Jest to szczególnie widoczne w przypadku materiałów o skomplikowanej strukturze (skały, beton). Ograniczenia związane z czasem obliczeń i możliwościami systemów komputerowych nie pozwalają dowolnie zagęszczać siatek modeli obliczeniowych. Prezentowana w pracy metoda pozwala na pokonanie niektórych z tych przeszkód. Może ona zostać użyta w celu skrócenia czasu obliczeń przy zadanej precyzji lub zwiększenia precyzji przy zadanym czasie obliczeń.

Tablica II Parametry modelu MES

Model	Liczba węzłów	Liczba elementów	Czas 10 kroków [min]
1A	20498	40741	10
1B	33367	66409	27
1C	42326	84308	51
1D	37713	74918	36
2	16032	31760	8
3	31311	61900	23
Hyp 4	$\sim 10^5$	$\sim 2 \times 10^5$	740

Analiza propagacji szczeliny została wykonana na siatce MES zawierającej od 20498 (okno A) do 42326 (okno C) węzłów (Tablica II). Konwencjonalna metoda, która nie używa okien o zwiększonej gęstości siatki, wymagała by modelu zawierającego ok. 10^5 węzłów, co skutkuje czasem o rząd wielkości większym niż wymagany dla techniki używającej okien.

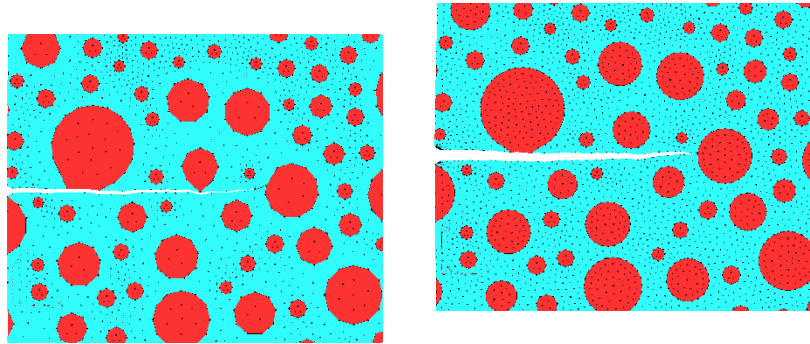


Figure 7 Crack path calculated for model 2, 3

Dla porównania wykonano obliczenia dla modeli zdyskretyzowanych siatką o mniejszej gęstości, bez okna i materiału zhomogenizowanego: Model 2 – 16032 i Model 3 – 31311 węzłów. Wyniki symulacji i kształt szczeliny pokazane są na rysunkach nr 6, 7. W obu przykładach ścieżka propagacji szczeliny jest mniej stabilna a czas obliczeń jest porównywalny z czasem niezbędnym w obliczeniach modelu 1. Hipotetyczny model 4, którego siatka byłaby porównywalna z siatką modelu 1 w okolicach szczeliny, wymagałby czasu o ok. 20 razy dłuższego niż model 1 – por. Tablica II.

Podsumowując, metoda przesuwających się okien o zagęszczonej siatce wydaje się być obiecującym rozwiązaniem problemów wymagających wysokiej gęstości dyskretyzacji w skali lokalnej. Problemy analizy pęknięcia i propagacji szczelin w skałach, betonie i innych geomateriałach należą naturalnie do tej grupy zagadnień.

5.4. Literatura

- [1] J.G.M. Van Mier, M.R.A. Van Vliet, Influence of microstructure of concrete on size /scale effects in tensile fracture, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (2003) 2281–2306.
- [2] J. Podgórski, T. Nowicki, J. Jonak, Fracture analysis of the composites with random structure, *IWCMM 16*, Sep 25-25,2006, Lublin, Poland
- [3] J. Podgórski (1985), General Failure Criterion for Isotropic Media. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 111 2, 188-201.
- [4] J. Podgórski (2002), Influence Exerted by Strength Criterion on Direction of Crack Propagation in the Elastic-Brittle Material. *Journal of Mining Science* 38 (4); 374-380, July- August, Kluwer Academic/Plenum Publishers.

- [5] J. Podgórski, T. Nowicki, Fine mesh window technique used in fracture analysis of the composites with random structure, CMM-2007 - Computer Methods in Mechanics, June 19-22, 2007, Łódź-Spała, Poland
- [6] J. Podgórski, T. Sadowski, T. Nowicki, Crack propagation analysis in the media with random structure by fine mesh window technique, WCCM8, ECCOMAS 2008, June 30 - July 5, 2008, Venice, Italy
- [7] Z. Bažant, Concrete fracture models: testing and practice, Engineering Fracture Mechanics 69 (2002) 165–205
- [8] A. Carpinteri, B. Chiaia, P. Cornetti, On the mechanics of quasi-brittle materials with a fractal microstructure, Engineering Fracture Mechanics 70 (2003) 2321–2349
- [9] L. Mishnaevsky Jr, Computational Mesomechanics of Composites, John Wiley & Sons, Ltd, 2007

6. KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW URABIANIA Z WYKORZYSTANIEM SSN

6.1. Wprowadzenie

Celem prowadzonych badań było opracowanie metody oceny rodzaju i stanu ostrzy noży urabiających, zamontowanych na głowicy wielonarzędziowej, z wykorzystaniem klasycznych oraz rozmytych sieci neuronowych. Proces urabiania, jako szybkozmienny i losowy, napotyka na szereg trudności w matematycznym opisie. Stan ostrzy noży zamontowanych na głowicy wielonarzędziowej, jak również rozpoznanie ich geometrii, ma istotne znaczenie dla energochłonności procesu urabiania.

Istotą prowadzonych badań było opracowanie nowej metody oceny stanu oraz klasyfikacji geometrii ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej. Obecnie w górnictwie nie stosuje się jasnych kryteriów wymiany narzędzi pracujących zespołowo na głowicy. Ocena ich stanu jest bardzo subiektywna. Z uwagi na energochłonność procesu urabiania oraz koszty ewentualnych przestojów związanych ze sprawdzeniem stanu i ewentualną wymianą narzędzi, wykorzystanie skutecznej metody pozwalającej na określenie w trakcie urabiania stanu ostrzy narzędzi będzie przydatne w praktyce.

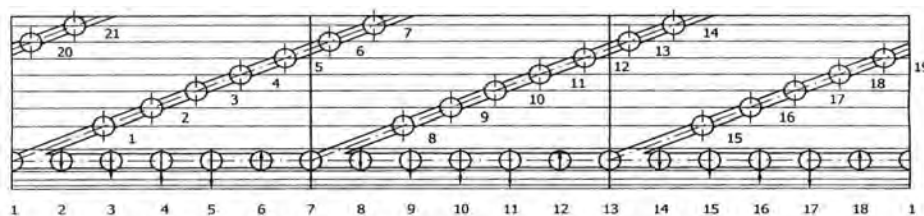
Narzędziem służącym do realizacji celu rozprawy były sztuczne sieci neuronowe. Aby potwierdzić uniwersalność metody, jako obiekt badań wykorzystano dwa różne typy narzędzi górniczych montowanych na eksperymentalnych głowicach wielonarzędziowych. W celu ograniczenia ilości czynników wpływających na wartości mocy oraz momentu zdecydowano się posłużyć blokiem skały modelowej. W odróżnieniu od skał spotykanych często w warunkach rzeczywistych, bryła modelowa jest jednorodna, co umożliwia zarejestrowanie parametrów urabiania zmienionych jedynie na skutek stępienia się ostrzy narzędzi.

W badaniach numerycznych, biorąc pod uwagę klasyfikacyjny charakter eksperymentu, wykorzystano klasyczne sieci neuronowe o strukturze perceptronu wielowarstwowego oraz o radialnych funkcjach bazowych. Posłużono się również sieciami neuronowymi rozmytymi. Wejściami do sieci były charakterystyczne parametry statystyczne, zmienną wyjściową był natomiast stan ostrzy narzędzi.

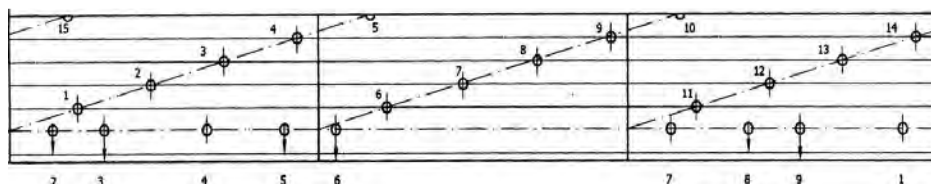
6.2. Badania laboratoryjne procesu urabiania

Badania przeprowadzono dla dwóch typów narzędzi montowanych zespołowo na głowicy wielonarzędziowej. Przeprowadzono pomiary dla noży ostrych oraz częściowo stępionych narzędzi obu typów (promieniowe oraz styczno- obrotowe), rejestrując jednocześnie sygnały mocy i momentu urabiania.

Do badań noży styczno- obrotowych wykorzystano głowicę wielonarzędziową, o średnicy 1400mm. Na głowicy zamontowano 39 noży, w tym 18 na tarczy obcinającej, a pozostałe na trzech płatach. W przypadku noży promieniowych zamontowano 24 narzędzia, z czego 9 na tarczy obcinającej. Schematy rozmieszczenia obu typów narzędzi na głowicach zostały zamieszczone na rysunkach 1 i 2.

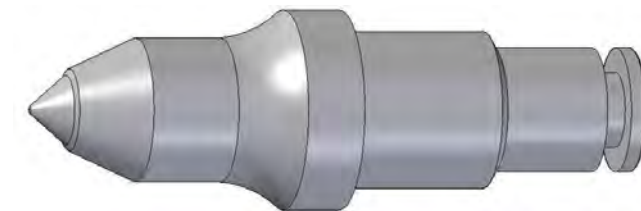


Rys. 1. Schemat rozmieszczenia noży na głowicy I



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia noży na głowicy II

Na rysunku 3 zaprezentowano widok narzędzia stycznego, zastosowanego w badaniach laboratoryjnych. Na rysunku 4 zamieszczono widok nowych noży promieniowych, które były przedmiotem eksperymentu.



Rys.3. Nóż styczno- obrotowy zastosowany w badaniach



Rys.4. Noże promieniowe będące obiektem badań

Rysunek 5 przedstawia fragment głowicy wielonarzędziowej do urabiania z zamontowanym zespołem narzędzi promieniowych. Zdjęcie uwidaczniające część noży na płatach organu oraz na tarczy odcinającej zostało wykonane przed urabianiem na stanowisku badawczym.



Rys.5. Głowica wielonarzędziowa zamontowanymi nożami promieniowymi

Prędkość realizowanego hydraulicznie posuwu wynosiła $v_p = 0,183$ m/min. Prędkość obrotowa głowicy wynosiła $n = 32$ obr/min. W czasie badań mierzono i rejestrowano w sposób ciągły sygnały mocy i momentu urabiania. Tak uzyskane przebiegi czasowe były następnie poddane analizie.

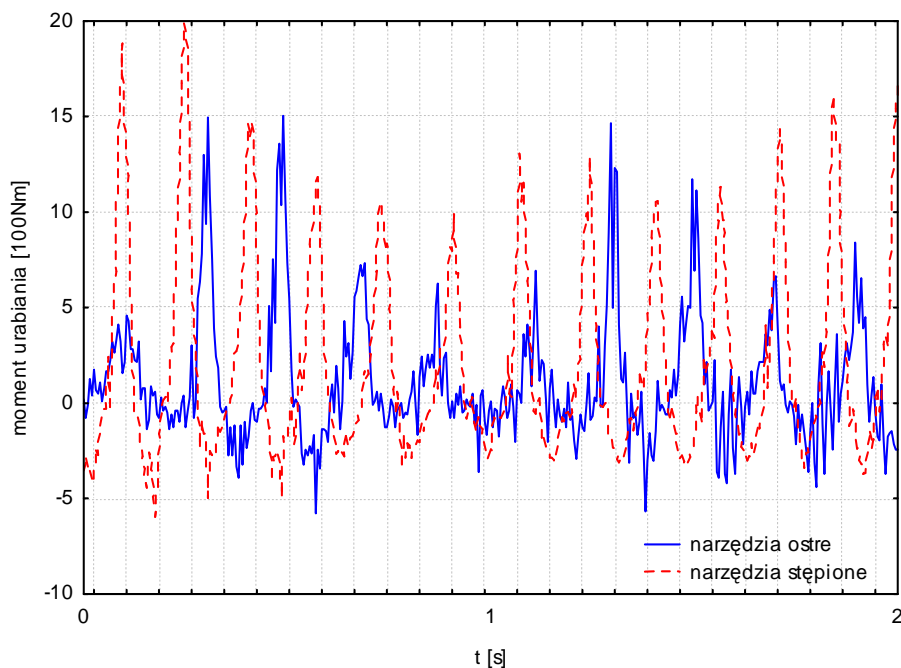
Na rysunku 6 przedstawiono stanowisko badawcze po procesie urabiania.



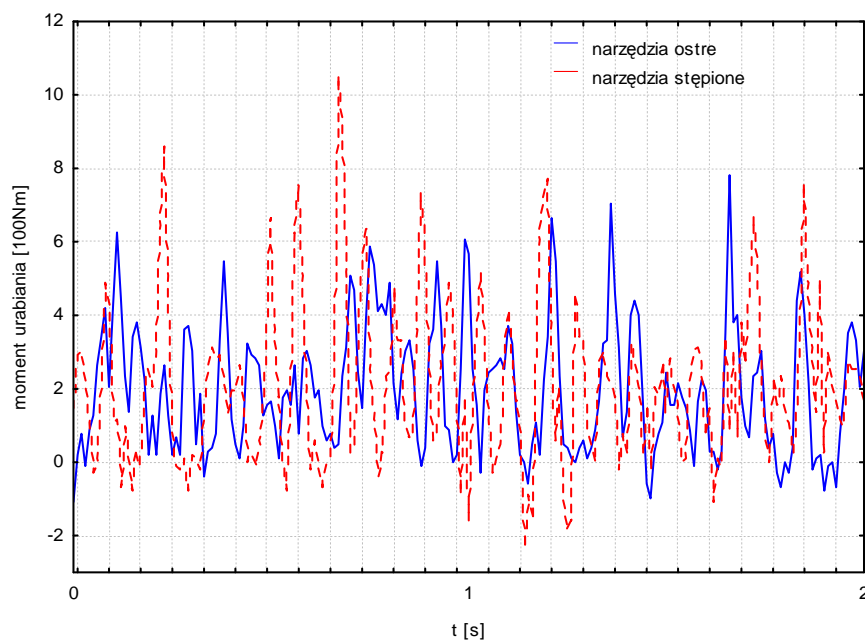
Rys. 6. Stanowisko badawcze, blok skalny po urabianiu

W wyniku badań stanowiskowych pozyskano przebiegi czasowe mocy oraz momentu urabiania głowicą wielonarzędziową uzbrojoną w narzędzia ostre oraz częściowo stępione. Przebieg czasowy mocy urabiania narzędziami częściowo zużytymi uwiadcza wzrost maksymalnej mocy urabiania, jednak w pewnych przedziałach jego wartość średnia może być mniejsza niż dla narzędzi ostrych.

Z wykresów na rysunkach 7 oraz 8 wynika, że w przebiegach czasowych momentu urabiania głowicą urabiającą, występują ujemne wartości na osi rzędnych. Są one wynikiem silnych drgań skrętnych wału głowicy i momentomierza, powstałych na skutek uderzenia podczas urabiania narzędzi o blok skalny. Z uwagi na możliwość dwukierunkowego (zależnie od kierunku obrotów wału) pomiaru momentu na wale skrętnym, w momencie pojawienia się drgań skrętnych wału, mogą występować wartości ujemne momentu, odpowiadające chwilowej zmianie kierunku skrętu wału po odbiciu się głowicy od skały.



Rys. 7. Przebiegi czasowe momentu urabiania głowicą wielonarzędziową z nożami promieniowymi



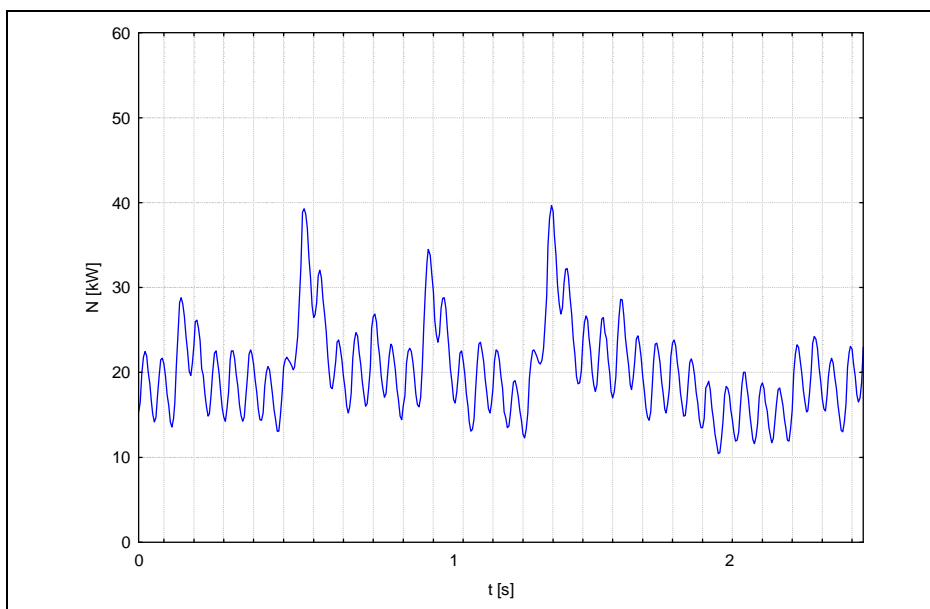
Rys. 8. Przebiegi czasowe momentu urabiania głowicą uzbrojoną w styczne noże obrotowe

Na podstawie uzyskanych wyników badań, można stwierdzić dużą zmienność czasową mierzonych sygnałów, co jest charakterystyczne dla procesu urabiania głowicą wielonarzędziową.

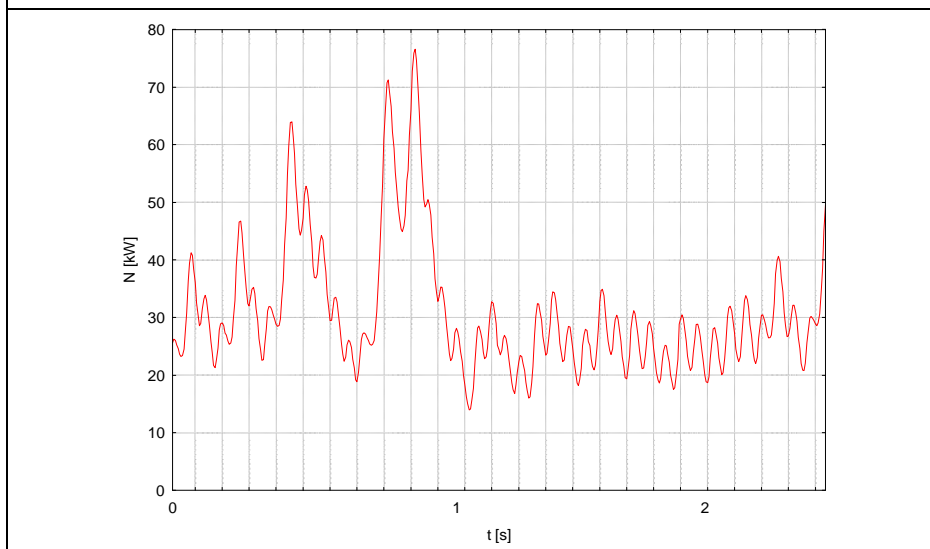
Sygnały zarejestrowane podczas badań laboratoryjnych zostały następnie poddane obróbce, obejmującej, przede wszystkim, podział przebiegów ze względu na pełny obrót głowicy urabiającej.

6.3. Analiza wyników badań

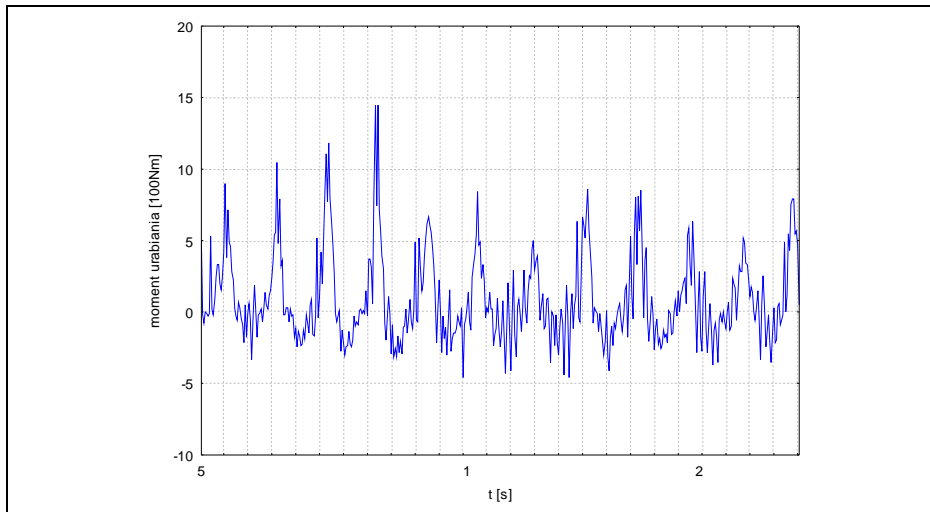
Na rysunkach 9-12 przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów urabiania głowicą wielonarzędziową, odpowiadające jej jednemu, pełnemu obrotowi. Zamieszczono sygnały mocy i momentu urabiania głowicą uzbrojoną w narzędzia promieniowe.



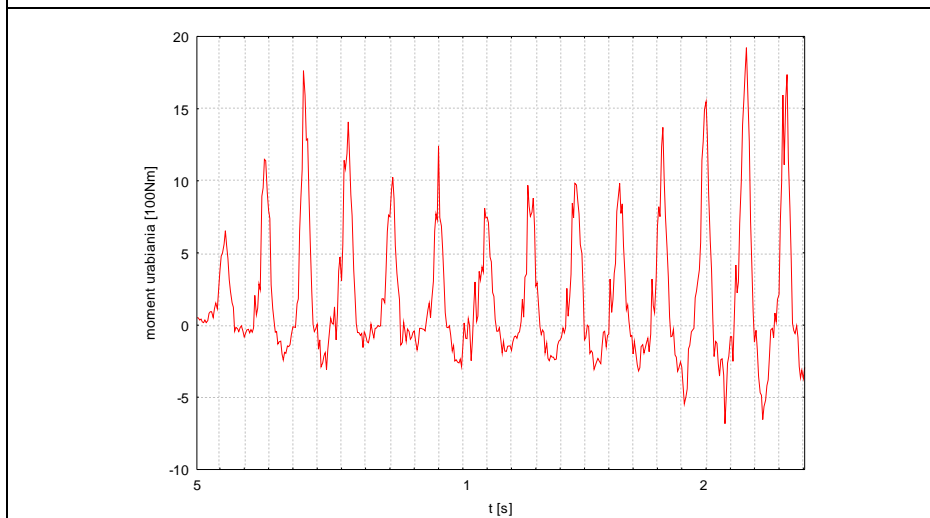
Rys. 9. Przebieg czasowy mocy urabiania, narzędzia ostre



Rys. 10. Przebieg czasowy mocy urabiania, narzędzia stępione



Rys. 11. Przebieg czasowy momentu urabiania, noże ostre



Rys. 12. Przebieg czasowy momentu urabiania, noże stępione

Przyjęto hipotezę, że zaprezentowane powyżej przebiegi czasowe mogą wykazywać istotne różnice w zmienności, asymetrii oraz spłaszczeniu rozkładu. Stąd też wyznaczono dla poszczególnych przedziałów, wybrane parametry

statystyczne, wykorzystane następnie jako zmienne wejściowe do sztucznej sieci neuronowej.

Jako dane wejściowe do SSN posłużyły wspomniane parametry statystyczne przebiegów czasowych mocy i momentu urabiania głowicą wielonarzędziową. W badaniach numerycznych posługiwano się oprogramowaniem STATISTICA 8 oraz MATLAB [8, 9]. Sygnały zostały podzielone na części, odpowiadające pełnemu obrotowi głowicy urabiającej.

Dla każdego z analizowanych sygnałów wyznaczono następujące parametry statystyczne: wartość średnią, wariancję, skośność oraz kurtozę.

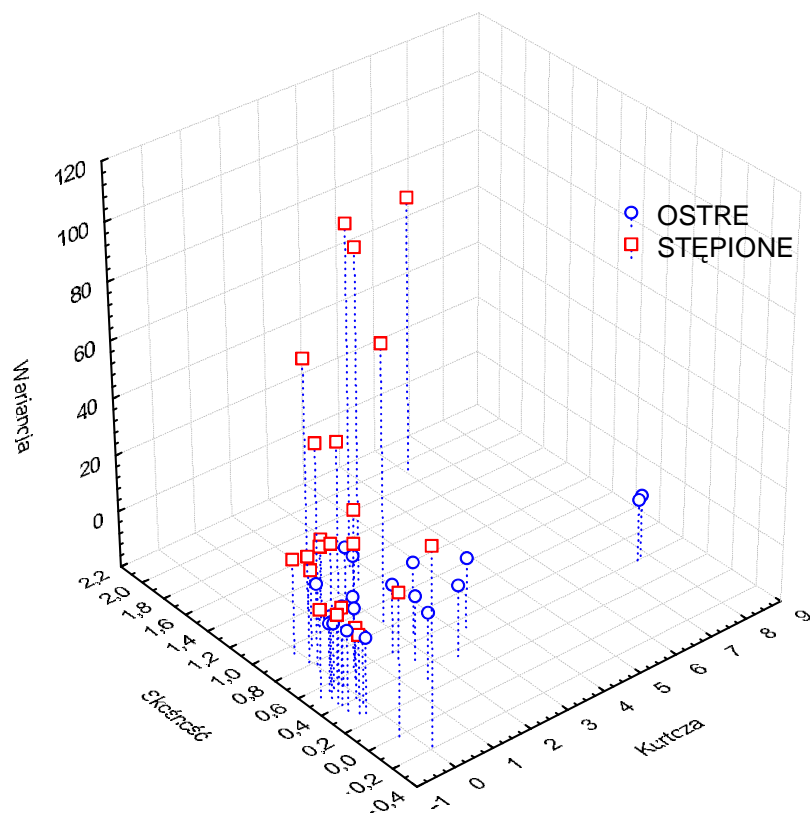
Skośność sygnału informuje o symetryczności rozkładu wyników. Dla rozkładu normalnego wartość $\gamma = 0$. W rozkładzie asymetrycznym (skośnym) rozkład wyników wokół wartości średniej jest nierównomierny. Dla rozkładu asymetrycznego lewostronnie wartość wskaźnika jest mniejsza od zera ($\gamma < 0$), a dla rozkładu asymetrycznego skośność jest większa od zera ($\gamma > 0$).

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{s^3}} \quad (1)$$

Kurtoza to miara koncentracji która wykorzystywana jest do określenia stopnia koncentracji wokół średniej. Kurtozę wyznacza się ze wzoru:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s^4} \quad (2)$$

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład wartości wariancji, skośności oraz kurtozy dla kolejnych przedziałów momentu urabiania badanymi narzędziami stycznymi.



Rys. 13. Rozkład parametrów sygnału momentu dla narzędzi stycznych

6.4. Metody klasyfikacji przebiegów czasowych

Poniżej zaprezentowano zastosowaną w badaniach, metodę klasyfikacji sygnałów, reprezentujących rodzaje i stan narzędzi montowanych na głowicy wielonarzędziowej. W badaniach wykorzystano sztuczne sieci neuronowe. Istnieje wiele rodzajów sieci neuronowych, różniących się strukturą i zasadami działania. Najpopularniejszą ze stosowanych obecnie architektur SSN, jest perceptron

wielowarstwowy (MLP). Sieć ta złożona jest z wielu neuronów, ułożonych w warstwy. Neurony obliczają ważoną sumę swoich wejść. Wyznaczony tak poziom pobudzenia jest argumentem funkcji aktywacji, która oblicza wartość wyjściową neuronu. Neurony tworzą strukturę jednokierunkową, przesyłanie sygnałów ma miejsce w kierunku od wejścia do wyjścia, tj. nie ma sprzężeń zwrotnych. Taką sieć można interpretować jako model: wejście-wyjście. Parametrami są tu wagi oraz wartości progowe. MLP może, przy odpowiedniej liczbie warstw i neuronów, modelować funkcję o niemal dowolnej złożoności.

Sieć o strukturze MLP została uruchomiona dla wartości parametrów statystycznych przebiegów czasowych ze zbioru uczącego, a następnie porównała otrzymane wyniki z prawidłowymi odpowiedziami co do stanu ostrzy narzędzi urabiających. W ten sposób ustalono błąd sieci o danych, optymalizowanych parametrach (wagach i progach). Funkcja błędu sieci została wyznaczona jako suma kwadratów, przy której wyznaczone dla poszczególnych przykładów różnice, pomiędzy wartościami wyliczonymi przez sieć i wartościami założonymi (prawidłowymi odpowiedziami), są podnoszone do kwadratu, a następnie sumowane.

Kolejnym rodzajem sieci, który został wykorzystany w badaniach była sieć o radialnych funkcjach bazowych (RBF) zawierają pojedynczą warstwę ukrytą z neuronami radialnymi i liniową warstwę wyjściową. Warstwa ukryta zawiera neurony radialne, które modelują gaussowską powierzchnię odpowiedzi. Z uwagi na nieliniowy charakter funkcji, zazwyczaj wystarcza jedna warstwa ukryta do zamodelowania funkcji o dowolnym kształcie. Warunkiem stworzenia przez sieć skutecznego modelu danej funkcji, jest zapewnienie w strukturze sieci dostatecznej liczby neuronów radialnych. Jeśli jest ich wystarczająco wiele, można do każdego ważnego szczegółu modelowanej funkcji przypisać odpowiedni neuron radialny, co zapewnia uzyskanie rozwiązania odwzorowującego zadaną funkcję z satysfakcjonującą wiernością.

Uczenie sieci RBF przebiega w dwóch etapach. Najpierw wyznacza się centra i ich promienie (standardowe odchylenia), a następnie optymalizuje liniową warstwę wyjściową. Liniowa optymalizacja jest znacznie szybsza od uczenia perceptronu wielowarstwowego. Do uczenia ostatniej warstwy używa się metody gradientów sprzężonych.

Kolejnym etapem badań numerycznych było wykorzystanie rozmytej sieci neuronowej. Analizy oparto na modelu rozmytym Sugeno z biblioteki Fuzzy Logic Toolbox pakietu MATLAB- Simulink. Do głównych zalet modelu Sugeno należy zaliczyć, obok dobrej współpracy z metodami adaptacyjnymi i metodami optymalizacji, przede wszystkim wysoką skuteczność obliczeniową oraz wydajność.

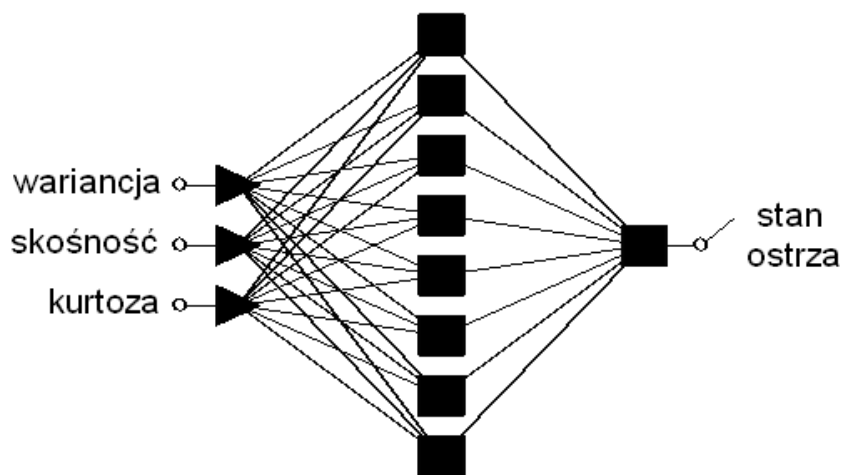
Wyznaczenie struktury oraz parametrów rozmytego modelu typu Sugeno realizowano na podstawie wyznaczonych parametrów statystycznych sygnałów urabiania, które pełniły rolę danych uczących. Opracowany za pomocą interfejsu ANFIS model sieci posiada pewną ilość reguł, funkcje przynależności (MF) oraz reguły z odpowiednio dobranymi wartościami współczynników wielomianu.

Uczenie rozmytej sieci przebiega podobnie jak w przypadku klasycznej sztucznej sieci, model sieci jest bowiem przekształcany w równoważny perceptron wielowarstwowy. Polega to na stopniowej zmianie wag sieci, doprowadzając do minimum średni kwadratowy błąd wyjścia w stosunku do danych uczących.

Ze względu na ograniczoną objętość rozdziału, zamieszczono wyniki badań numerycznych jedynie dla stanu ostrzy narzędzi promieniowych.

6.4.1. Sygnał momentu urabiania

W trakcie badań numerycznych, nad wykorzystaniem statystyk sygnału momentu urabiania głowicą wielonarzędziową jako zmiennej wejściowej do SSN, opracowano sztuczną sieć neuronową, o strukturze perceptronu wielowarstwowego, z trzema zmiennymi wejściowymi oraz ośmioma neuronami w warstwie ukrytej, co ilustruje schemat na rysunku 14.



Rys.14. Schemat SSN o strukturze MLP 3-8-1

W tym przypadku zrezygnowano z wykorzystania wartości średniej sygnału jako danej uczącej sieć neuronową. Przyczyną tej decyzji, to przede wszystkim fakt dużej różnicy momentu urabiania narzędziami ostrymi i stępionymi, a co za tym idzie, znacznie odbiegających wartości średnich sygnałów. Powodowało to silne przywiązanie sieci do tej właśnie wartości, a więc marginalizowanie pozostałych zmiennych.

Tabela.1 Analiza wrażliwości

	Wariancja	Skośność	Kurtoza
Iloraz	1,774757	1,055249	1,056652
Ranga	1	3	2

W tabeli 1 została zamieszczona analiza wrażliwości sieci MLP 3-8-1. Przy odrzuceniu w analizie wartości średniej, SN uznała za najbardziej istotną wariancję sygnału, a w dalszej kolejności, o czym świadczą rangi zmiennych, kurtozę i skośność. Iloraz określa przydatność zmiennej w aktualnej analizie. W przypadku gdy jest większy od 1, sieć uznaje daną wejściową za przydatną.

Tabela.2 Wartości błędów modelu

Typ	Błąd ucz.	Błąd walid.	Błąd test.
MLP 3-8-1	0,416	0,338	0,150

Tabele 2 oraz 3 prezentują z kolei odpowiednio wartości błędów oraz statystyki klasyfikacyjne perceptronu, które uzyskano porównując odpowiedź sieci dla danych testujących. Należy zauważyć, że wartości błędów dla poszczególnych zbiorów są dosyć wysokie, co skutkuje błędami klasyfikacji narzędzi do właściwych grup. Dodatkowo, wysokie (w porównaniu do zbioru testującego) wartości błędów zbiorów uczącego i walidacyjnego, mogą świadczyć o wspomnianym uprzednio problemie przeuczenia sieci, co może skutkować niewłaściwą interpretacją nowych danych wejściowych.

Tabela 3 Statystyki klasyfikacyjne

	Narzędzia ostre	Narzędzia stępione
Wszystkie	25	25
Poprawnie	23	22
Niepoprawnie	2	3
Nieznane	0	0
Poprawnie (%)	92	88

Analogicznie do powyższych analiz, rozpatrywano przebiegi czasowe momentu urabiania, korzystając z sieci neuronowej o radialnych funkcjach bazowych. Jak wynika z badań literaturowych oraz własnych analiz [1-7], ta struktura sieci, obok perceptronu wielowarstwowego, najlepiej sprawdza się w problemach klasyfikacyjnych.

Do badań numerycznych wykorzystano cztery zmienne wejściowe. Oprócz wspomnianych w poprzednich rozdziałach wariancji, skośności oraz kurtozy, niezbędne okazało się wprowadzenie do sieci RBF wartości średniej przebiegu czasowego. Zmienna ta, jak można zauważyć w tabeli 4 przedstawiającej analizę wrażliwości, jest najbardziej istotna w analizowanym przypadku.

Tabela.4 Analiza wrażliwości

	Średnia	Wariancja	Skośność	Kurtoza
Iloraz	2,753835	1,221049	1,108723	1,138006
Ranga	1	2	4	3

Pomimo zastosowania czterech zmiennych wejściowych, w tym wydawałoby się najprostszej w interpretacji wartości średniej (wartość średnia momentu urabiania narzędziami stępienymi powinna być większa niż w przypadku noży ostrych), zastosowanie SN dało wynik przeciętny.

Tabela.5 Wartości błędów modelu

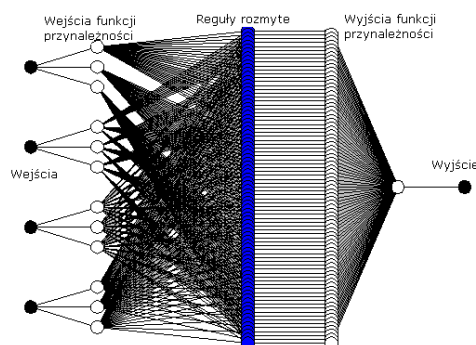
Typ	Błąd ucz.	Błąd walid.	Błąd test.
RBF 4-6-1	0,125	0,140	0,173

Tabela 6 przedstawia wprawdzie poprawne statystyki klasyfikacyjne, jednak w tabeli 5, można odczytać wartości błędów powyżej 0,1. Może to sugerować, iż takie wartości błędów, nie dyskwalifikują jednak modelu sieci, jako przydatnego narzędzia klasyfikacji.

Tabela.6. Statystyki klasyfikacyjne

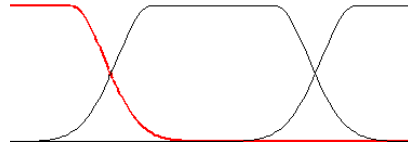
	Narzędzia ostre	Narzędzia stępione
Wszystkie	25	25
Poprawnie	25	25

Analizy z wykorzystaniem sygnału urabiania głowicą wielonarzędziową z zamontowanymi narzędziami promieniowymi prowadzono w kilku wariantach. Testowano modele sieci rozmytej, z różną liczbą wejść funkcji przynależności, co wpływa na liczbę reguł rozmytych sieci. Zmiennymi wejściowymi, podobnie jak dla klasycznych sieci neuronowych, były parametry statystyczne odpowiedniego sygnału urabiania: wartość średnia, wariancja, skośność oraz kurtoza, na wyjściu natomiast sieć generuje odpowiedź, klasyfikując z zadaniem prawdopodobieństwem, stan narzędzi jako ostre lub stępione. Na rysunku 15 zaprezentowano model sieci neuronowej rozmytej z trzema wejściami funkcji przynależności.



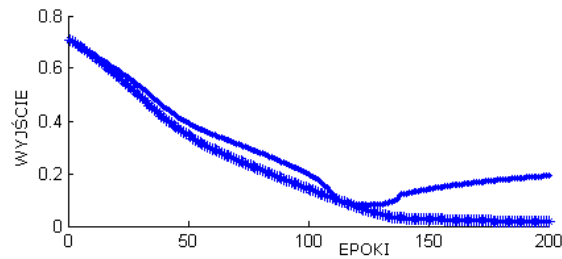
Rys. 15. Schemat rozmytej sieci neuronowej z trzema wejściami funkcji przynależności.

Rysunek 16 ilustruje funkcję przynależności na wejściu sieci, tj. przed jej uczeniem. Funkcja ta jest modyfikowana w kolejnych epokach uczenia sieci. Każdemu wejściu przyporządkowana jest osobna funkcja przynależności, która po etapie uczenia jest zdefiniowana dla poszczególnych zmiennych. Wykresy funkcji przynależności po 200 epokach uczenia prezentuje rysunek 18.

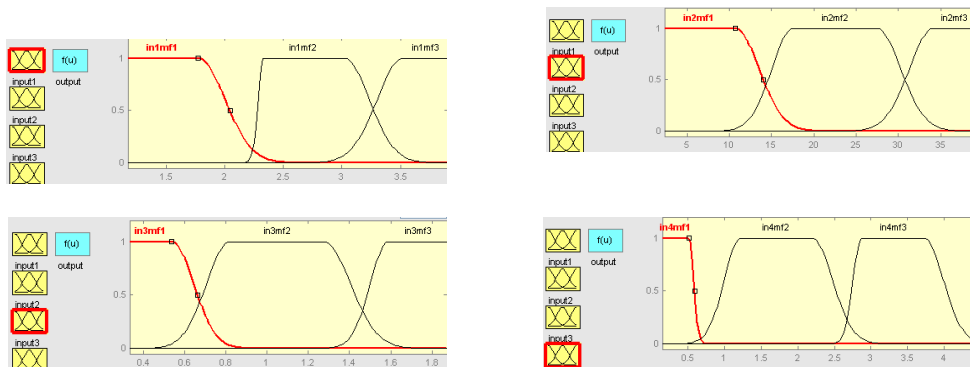


Rys. 16. Wykres funkcji przynależności na wejściu, przed uczeniem.

Na rysunku 17 przedstawiono przebieg uczenia rozmytej sieci neuronowej. Dolna krzywa przedstawia wartość błędu dla zbioru uczącego, natomiast górna reprezentuje dane walidacyjne. Po około 120 epokach uczenia, następuje znaczący przyrost wartości błędu walidacyjnego, wraz z kolejnymi epokami uczenia. Po 200 epokach, błąd dla danych uczących wynosił 0,015, jednak wartość błędu walidacyjnego dyskwalifikuje przydatność tego modelu.

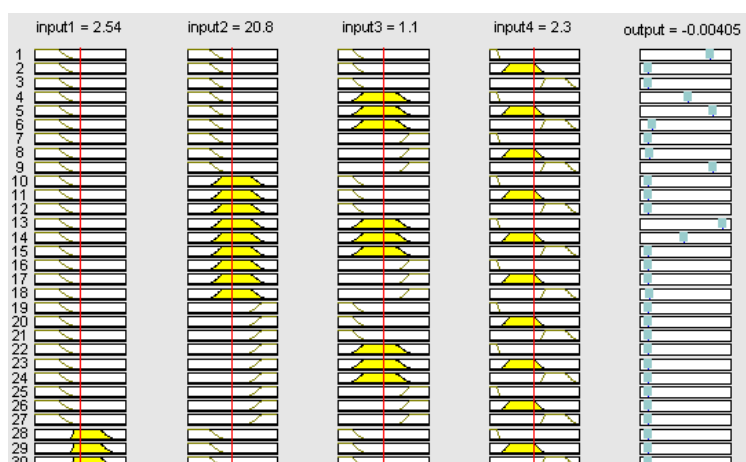


Rys. 17. Kształtowanie się błędów dla zbioru uczącego (dolny wykres) oraz walidacyjnego (górny wykres).



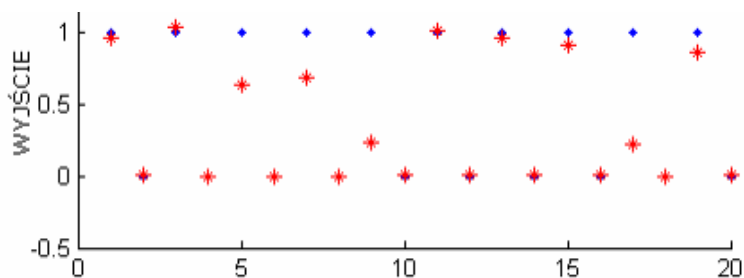
Rys. 18. Przebiegi funkcji przynależności dla kolejnych wejść.

Na rysunku 19 zaprezentowano w sposób graficzny, reguły wnioskowania badanej, rozmytej sieci neuronowej, typu Sugeno.



Rys. 6.11. Graficzna prezentacja reguł wnioskowania sieci neuronowej

Po zakończeniu etapu uczenia sieci, z wykorzystaniem zarówno danych uczących oraz walidacyjnych, przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem danych testujących. Zaznaczone na rysunku 20, kolorem niebieskim, dane testujące, odpowiadają w kolejnych przypadkach, parametrom z grupy narzędzi ostrych lub stępionych. Celem skrócenia zapisu lingwistycznego, narzędzia ostre przyporządkowano do klasy „1”, stępione zaś do klasy „0”. Kolorem czerwonym, zaznaczono odpowiedź rozmytej sieci neuronowej, po wprowadzeniu odpowiednich statystyk. Błąd popełniony przez sieć na zbiorze danych testujących wyniósł 0,27.



Rys. 20. Wyniki badań testujących sieci rozmytej z trzema wejściami funkcji przynależności

6.4.2. Sygnał mocy urabiania

W kolejnym kroku badań analizowano przydatność sygnału mocy urabiania w analizowanym zagadnieniu. Zaletą tego rozwiązania jest prostota pomiaru i monitorowania poboru mocy w warunkach kopalnianych. Sieć neuronowa o strukturze perceptronu wielowarstwowego posłużyła zatem jako narzędzie klasyfikacji stanu ostrzy noży urabiających, przy wykorzystaniu statystyk przebiegu czasowego mocy urabiania jako zmiennych wejściowej.

Dla sieci neuronowej posiadającej osiem neuronów w warstwie ukrytej najistotniejszą zmienną była wariancja sygnału mocy urabiania. W dalszej kolejności do zagadnienia klasyfikacji stanu ostrzy skrawających istotne były skośność przebiegu oraz kurtoza (Tabela 7).

Tabela.7 Analiza wrażliwości

	Wariancja	Skośność	Kurtoza
Iloraz	18,52867	1,453550	1,181146
Ranga	1	2	3

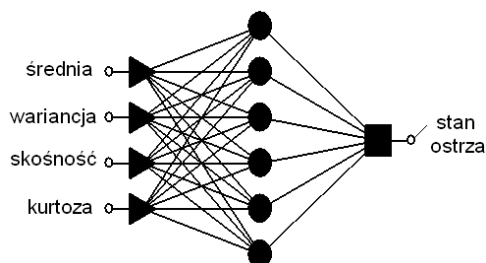
W odróżnieniu od wyników odnoszących się do analiz z wykorzystaniem parametrów momentu urabiania, statystyki klasyfikacyjne wygenerowane w module Neural Networks pakietu STATISTICA dla parametrów mocy jako wejść do MLP, są jednoznaczne.

Jak wynika z tabeli 8, sieć neuronowa bardzo dobrze sprawdziła się jako narzędzie klasyfikacji w rozpatrywanym zagadnieniu. Sieć bezbłędnie zaklasyfikowała wszystkie rozpatrywane przypadki. Ponadto, błędy walidacyjny oraz testujący kształtowały się, co uwidocznione zostało w tabeli 8, na poziomie kliku setnych.

Tabela.8 Wartości błędów modelu

Typ	Błąd ucz.	Błąd walid.	Błąd test.
MLP 3-8-1	0,108	0,021	0,037

Na rysunku 21 przedstawiono schemat sieci neuronowej typu RBF, o strukturze z sześcioma neuronami w warstwie ukrytej. Model sieci został wygenerowany jako najkorzystniejszy z sieci o radialnych funkcjach bazowych, do klasyfikacji stanu narzędzi urabiających z wykorzystaniem sygnału mocy urabiania.



Rys.21 Schemat SSN o strukturze RBF 4-6-1

W przypadku wykorzystania sieci RBF jako narzędzia klasyfikacji stanu ostrza wykorzystano cztery zmienne wejściowe, z których zdecydowanie najistotniejszą, jak wynika z analiz wrażliwości zamieszczonych w tabeli 9, okazała się wartość średnia.

Tabela.9 Analiza wrażliwości

	Średnia	Wariancja	Skośność	Kurtoza
Iloraz	2,567565	1,893058	1,045651	1,674206
Ranga	1	2	4	3

Wartości ilorazów wskazują, iż pomocne w klasyfikacji stanu ostrzy noży są również wariancja oraz kurtoza sygnału, natomiast wartość skośności przebiegu jest już blisko jedności. Podejmowane próby wstępnych analiz z wyłączeniem tej zmiennej dawały jednak mniej wiarygodne rezultaty.

Tabela.10 Statystyki klasyfikacyjne modelu

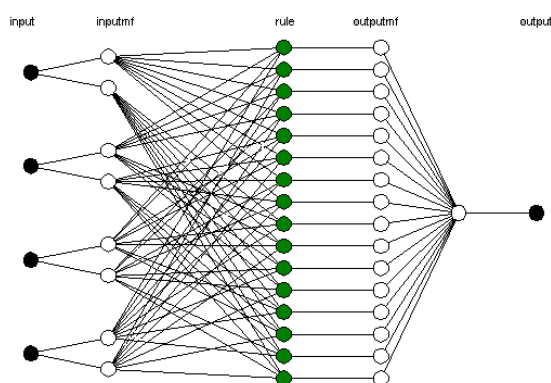
	Narzędzia ostre	Narzędzia stępione
Wszystkie	25	25
Poprawnie	25	24

W tabeli 11 przedstawiono wartości błędów dla zbiorów uczącego, walidacyjnego oraz testującego.

Tabela.11 Wartości błędów modelu

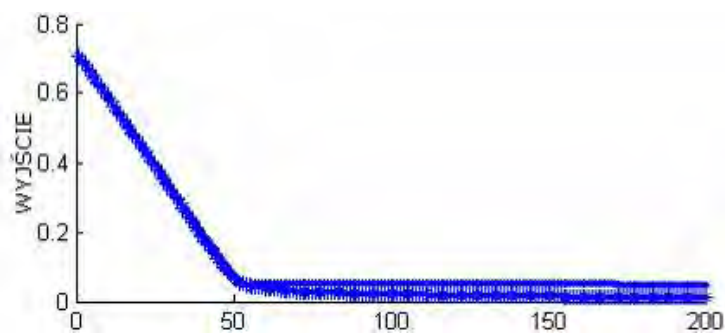
Typ	Błąd ucz.	Błąd walid.	Błąd test.
RBF 4-6-1	0,114	0,193	0,08

W przypadku wykorzystania jako zmiennych wyjściowych, statystyk sygnału mocy urabiania, w analizach zastosowano sieć rozmytą z dwoma wejściami funkcji przynależności. Dane przyporządkowano do dwóch grup narzędzi jako ostre i stępione, a następnie podzielono na trzy grupy danych: uczące, walidacyjne i testujące.



Rys. 22. Schemat sieci neuronowej z czterema zmiennymi wejściowymi oraz dwoma wejściami funkcji przynależności

W wyniku uczenia sieci, po 180 epokach osiągnięto wartość błędu 0,015. Jak wynika z rysunku 23, już po 50 epokach testowany model charakteryzowały zadawalające wartości błędów. Dalsze uczenie powodowało wprawdzie niewielki spadek błędów uczącego i walidacyjnego, ale odbywało się to kosztem czasu uczenia.



Rys. 23. Kształtowanie się błędów uczenia sieci neuronowej, dla danych uczących (dolny wykres) oraz danych ze zbioru walidacyjnego (wykres górny)

```

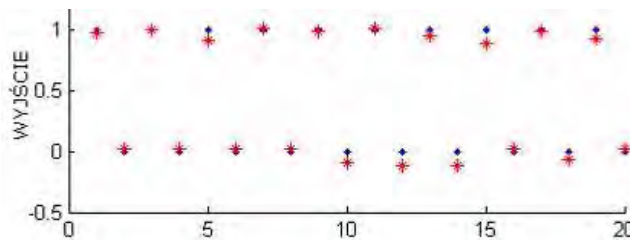
1. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf1) (1)
2. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf2) (1)
3. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf3) (1)
4. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf4) (1)
5. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf5) (1)
6. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf6) (1)
7. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf7) (1)
8. If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf8) (1)
9. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf9) (1)
10. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf10) (1)
11. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf11) (1)
12. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf12) (1)
13. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf13) (1)
14. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf1) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf14) (1)
15. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf1) then (output is out1mf15) (1)
16. If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) and (input3 is in3mf2) and (input4 is in4mf2) then (output is out1mf16) (1)

```

Rys. 24. Opis reguł rozmytych wykorzystanych w tworzonym modelu sieci

Opis reguł rozmytych rozpatrywanego modelu sieci, zaprezentowanych na rysunku 22, przedstawia rysunek 24. Każda reguła połączona jest z jednym wejściem funkcji przynależności każdej zmiennej wejściowej.

Wyniki procesu testowania tej sieci prezentuje rysunek 25. Dla kilku przypadków wartość wyjściowa modelu (większe znaczniki) nieznacznie odbiegała od zadanego „zera” lub „jedyńki” dla danych testujących. Wartość błędu testującego wynosiła 0,06.



Rys. 25. Kształtowanie się odpowiedzi sieci neuronowej rozmytej dla zbioru danych testujących

Podsumowując otrzymane dla noży promieniowych, wyniki badań, należy wspomnieć o szczególnej przydatności sieci o strukturze perceptronu wielowarstwowego do oceny stanu ostrzy tych narzędzi, z wykorzystaniem jako zmiennych wejściowych parametrów sygnału mocy urabiania. Mniejsze wartości błędów niż dla sieci RBF oraz FNN, pomimo odrzucenia wartości średniej sygnału, wskazują na ten model, jako najlepszy w analizowanym zagadnieniu. W analizach z wykorzystaniem sygnału momentu urabiania, najlepsze rezultaty otrzymano stosując model rozmyty sztucznej sieci neuronowej. Niska wartość błędu, szybkość uczenia oraz prostota modelu z dwoma wejściami funkcji przynależności, pozwala pozytywnie ocenić ten model.

6.5. Podsumowanie

Z uwagi na objętość rozdziału, zaprezentowano wyniki badań numerycznych jedynie dla stanu ostrzy narzędzi promieniowych. Reprezentują one jednak w sposób wystarczający założenia prezentowanej metody.

Przeprowadzone badania potwierdziły, iż zaproponowana metoda klasyfikacji stanu i rodzaju narzędzi na podstawie rejestrowanych sygnałów mocy i momentu urabiania jest skuteczna. Do oceny stanu ostrzy noży urabiających mogą zostać wykorzystane wartości parametrów statystycznych przebiegów czasowych, w tym w szczególności wartości wariancji, skośności oraz kurt ozy.

Zaproponowana metoda oceny stanu ostrzy jest perspektywiczną metodą zwłaszcza w kontekście podniesienia bezpieczeństwa załóg, ograniczenia zapylenia oraz ograniczenia energochłonności urabiania. W świetle przeprowadzonych badań, bardzo skuteczne i wydajne (z uwagi na czas procesu uczenia, wartość błędu klasyfikacji, strukturę sieci) okazały się tradycyjne sieci neuronowe.

6.6. Literatura

- [1] Gajewski, J. Jonak: Klasyfikacja sygnałów siły skrawania za pomocą sieci neuronowej, *Eksploatacja i Niezawodność* nr 2/2004, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa 2004, str. 24-27
- [2] Gajewski J., Jonak J.: Utilisation of neural networks to identify the status of the cutting tool point, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, volume 21, issue 2, pp. 180-184, March 2006
- [3] Jonak J., Gajewski J.: Identifying the cutting tool type used in excavations using neural networks, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, volume 21, issue 2, pp. 185-189, March 2006
- [4] J. Jonak, J. Gajewski: Identification of ripping tool types with the use of characteristic statistical parameters of time graphs, *Tunnelling and Underground Space Technology*, volume 23, issue 1, pp. 18-24, January 2008
- [5] G. Litak, J. Gajewski, A. Syta, J. Jonak: Quantitative estimation of the tool wear

effects in a ripping head by recurrence plots, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Volume 46, Issue 3, Warsaw 2008, Pages 521-530

- [6] Gajewski J.: Ocena stanu ostrzy noży głowicy wielonarzędziowej do urabiania węgla, Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin 2008
- [7] Projekt badawczy promotorski MNiSW nr N 501 035 31/2504. Projekt badawczy MNiSW nr 4 T12A 054 28. Raporty końcowe.
- [8] StatSoft, Inc. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- [9] www.mathworks.com
- [10] J. Jonak, J. Gajewski: Metody sztucznej inteligencji w badaniach noży i głowic urabiających, Monografia, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa 2008