

KAMIL MUCHA  
KRZYSZTOF KRAUZE

## Planowanie eksperymentu dla laboratoryjnych badań ścierności skał

*Właściwości fizykomechaniczne urabianej skały, takie jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, urabialność czy zwięzłość, bardzo często są uwzględniane przy doborze sposobu urabiania, rodzaju maszyny urabiającej, jak i samych narzędzi urabiających. Jednakże bardzo rzadko uwzględnia się jedną z głównych przyczyn zużycia ściernego noży kombajnowych, jaką jest ścierność skał, gdyż brak jest jednoznacznej i sprawdzonej metody jej określania.*

*W artykule przedstawiono plan i metodykę badań, stanowisko do badania ścierności skał, przebieg przeprowadzenia badań wstępnych oraz statystyczne opracowanie wyników za pomocą programu Statistica i ustalenie ostatecznych wartości wielkości wejściowych w badaniach zasadniczych. Metoda została opracowana w aspekcie uwzględniania ścierności skał przy doborze i prognozowaniu zużycia narzędzi urabiających.*

Słowa kluczowe: *ścierność skał, plan doświadczenia, badania laboratoryjne, analiza statystyczna, narzędzia urabiające, zużycie ściernie*

### 1. WSTĘP

Znajomość właściwości fizykomechanicznych skał odgrywa ważną rolę przy projektowaniu i wykonywaniu wszelkich przedsięwzięć inżynierskich w górnictwie i w budownictwie podziemnym. Jest ona niezbędna do oceny stateczności górotworu w sąsiedztwie wyrobisk oraz zapewnienia warunków bezpiecznego użytkowania wyrobisk i bezpiecznej pracy [1]. Parametry fizykomechaniczne należy również uznać za podstawę wyboru sposobu mechanicznego urabiania. Ich znajomość pozwala ocenić przydatność skał, a także umożliwia ocenę zachowania materiału skalnego podczas urabiania [2].

Nóż skrawający podczas eksploatacji jest elementem będącym bezpośrednio w kontakcie z urabianą calizną. Podczas urabiania dochodzi do jego zużycia, najczęściej przez ścieranie. Zużycie noży niesie za sobą bardzo poważne konsekwencje, wśród których można wymienić: zmiany geometrii i kształtu noża, ubytek ich masy, utratę zdolności skrawających, częste wymiany noży, skrócenie dyspozycyjnego czasu pracy maszyny urabiającej, zmniejszenie wydajności, wzrost energochłonności i kosztów wydobycia [3, 4].

Przy doborze narzędzi urabiających uwzględnia się różne aspekty, między innymi właściwości geologiczne, właściwości fizykomechaniczne skał, gdzie najczęściej brany pod uwagę parametrami są wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz na jednoosiowe rozciąganie, zwięzłość czy urabialność. Należy również dobrać odpowiedni materiał i konstrukcję noży, tak aby przy danych parametrach i warunkach procesu skrawania ich trwałość była jak największa [3, 4].

Podczas doboru narzędzi urabiających bardzo rzadko bierze się pod uwagę ścierność skał. Jest to spowodowane brakiem jednoznacznie określonej metody jej wyznaczenia. Jedyną powszechnie znaną metodą badania ścierności skał jest wyznaczenie wskaźnika CAI w teście ścierności Cerchar [5, 6]. Metoda ta wykorzystywana jest przez firmę Sandvik, jednakże wyniki badań są tajemnicą firmy. Często metody określania ścierności skał są mylone z metodami badania ścieralności skał, co zostało opisane w publikacji [3].

W związku z powyższym opracowano nową metodę badania ścierności skał, którą opisano w niniejszym artykule.

## 2. STANOWISKO LABORATORYJNE

Ścierność skał jest określana za pomocą wskaźnika ścierności  $W_z$ . Sposób jego wyznaczania oparto na metodzie oceny szybkości zużycia noży skrawających. W warunkach przemysłowych ich trwałość określa się zazwyczaj jako stosunek liczby zużytych noży do masy lub objętości urobionego minerału. Najczęściej jest to liczba noży zużytych na pozyskanie 1000 Mg lub 1000 m<sup>3</sup> urobku. Natomiast w warunkach laboratoryjnych szybkość zużycia noża czy noży (trwałość) najefektywniej można wyznaczyć przez ubytek masy w stosunku do urobionej przez nóż czy noże objętości próbki skalnej [4]. Na tej podstawie wskaźnik ścierności zdefiniowano jako stosunek ubytku masy wzorcowego stalowego próbnika do ubytku masy badanej próbki skalnej (1).

$$W_z = \frac{M_{pa}}{M_{pi}} \quad (1)$$

gdzie:

$W_z$  – wskaźnik ścierności [-],

$M_{pi}$  – ubytek masy próbki [g],

$M_{pa}$  – ubytek masy próbnika [g],

gdzie:

$$M_{pa} = M_{pab} - M_{paa} \quad (2)$$

gdzie:

$M_{pab}$  – masa próbki przed badaniem [g],

$M_{paa}$  – masa próbki po badaniu [g],

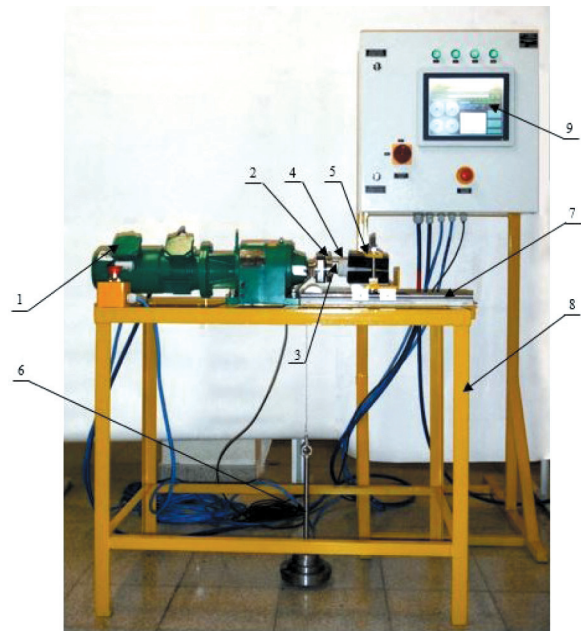
$$M_{pi} = M_{pib} - M_{pia} \quad (3)$$

gdzie:

$M_{pib}$  – masa próbki przed badaniem [g],

$M_{pia}$  – masa próbki po badaniu [g].

Sposób wyznaczania wskaźnika ścierności wymusił zaprojektowanie i wykonanie stanowiska laboratoryjnego (rys. 1). Na stanowisku badawczym znajduje się zespół napędowy realizujący ruch obrotowy próbnika ze stałą prędkością obrotową. Na wale motoreduktora zabudowany jest uchwyt, w którym zamocowany jest nieruchomo stalowy próbnik. Wraz z próbką skalną tworzą parę ścierną (rys. 2). Przedmiotowy próbnik jest stale dociskany do czoła próbki skalnej za pomocą grawitacyjnego układu docisku z obciążnikami. Dokładny opis stanowiska został przedstawiony w publikacji [7].



Rys. 1. Stanowisko do badania ścierności skał: 1 – zespół napędowy, 2 – próbnik, 3 – mocowanie próbnika, 4 – próbka skalna, 5 – uchwyt próbki skalnej, 6 – układ docisku, 7 – układ przesuwu, 8 – konstrukcja nośna, 9 – panel sterujący



Rys. 2. Widok pary ściernej

## 3. CEL I CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Pierwszym ważnym etapem badań jest postawienie problemu badawczego wymagającego rozwiązania na drodze doświadczalnej oraz charakterystyka obiektu badań. Celem każdego rodzaju badań doświadczalnych jest uzyskanie informacji dotyczącej zależności między wielkościami wejściowymi (parametry zadawane) a wielkościami wyjściowymi (wielkości poszukiwane). Tego rodzaju zależność najczęściej przedstawia się w postaci aproksymującej funkcji obiektu badań [8, 9].

Charakterystyka obiektu badań polega na ustaleniu zbioru wielkości wejściowych i wyjściowych. Ten etap badań ma kluczowe znaczenie, gdyż błędy związane z niedokładnym rozpoznaniem obiektu badań mogą skutkować uzyskaniem nieadekwatnego modelu, a przede wszystkim stratą pieniędzy i czasu. Ważne jest zatem odpowiednie rozeznanie tematu, które zostało opisane w opracowaniu [3].

Głównym celem badań wstępnych opisywanych w niniejszym artykule było wyznaczenie postaci funkcji dla trzech różnych próbek skalnych, a następnie wyliczenie wartości wielkości wejściowych, które będą niezmiennie w badaniach zasadniczych. Wartością wyjściową jest wskaźnik ścierności  $W_z$ , natomiast wielkościami wejściowymi są:

- siła docisku próbnika do próbki skalnej  $P_d$  [N],
- prędkość obrotowa próbnika  $n$  [obr/min],
- czas pojedynczej próby  $t$  [min].

Przedmiotem badań były dwa rodzaje skał naturalnych (piaskowiec i porfir) oraz beton, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok próbek przygotowanych do badań:  
1 – piaskowiec, 2 – beton, 3 – porfir

Dobór takiego zestawu próbek był uwarunkowany różnymi właściwościami fizykomechanicznymi i zróżnicowanym składem mineralogicznym i chemicznym. Szczególnie zwrócono uwagę na wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Piaskowiec należy do skał o dużej wytrzymałości i ze względu na dużą zawartość  $\text{SiO}_2$  ma dobre właściwości ścierne. Porfir należy do skał o średniej wytrzymałości i również ma dobre właściwości ścierne ze względu na zawartość  $\text{SiO}_2$ . Natomiast na próbki sztuczne dobrano beton C16/20, aby otrzymać próbki o małej wytrzymałości na ściskanie i dodatkowo dodano kruszywo bazaltowe, w celu sprawdzenia czy wtrącenia będą się wykruszać.

Tabela 1

**Wytrzymałość na ściskanie oraz procentowa zawartość  $\text{SiO}_2$  w badanych próbkach**

Próbka	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $R_c$ [MPa]	Zawartość $\text{SiO}_2$ [%]
Piaskowiec	100–110	27,7
Porfir	32–53	21,9
Beton	20–25	15,2

#### 4. WYBÓR PLANU DOŚWIADCZENIA

Chcąc ograniczyć nakład pracy i czasochłonność, najczęściej zawęża się zakres badań, eliminując wielkości wejściowe lub zmniejszając liczbę wartości wielkości wejściowych [8]. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie odpowiedniego planu doświadczenia. Jedną z największych jego zalet jest możliwość uzyskania wymiernych efektów w postaci zmniejszenia nakładów pracy, potrzebnych na przeprowadzenie danego doświadczenia, jak również zmniejszenie nakładów czasu. Jednakże wybór planu doświadczenia zależy od celu i specyfiki danego rodzaju badań. Korzystając z teorii eksperymentu, należy wybrać plan doświadczenia, który będzie spełniał podstawowe kryteria informatywności, realizowalności oraz efektywności [8–10].

Jak wspomniano wcześniej, w przypadku opisywanych badań są trzy wielkości wejściowe i jedna wielkość wyjściowa. Przyjmując nieliniowe zależności funkcyjne pomiędzy wielkościami wejściowymi a wyjściowymi, przyjęto przeprowadzenie badania dla pięciu wartości pośrednich. Założono, że dla pierwszej zmiennej, jaką jest siła docisku  $P_d$ , zakres zmienności wynosił 150–350 N. Dla drugiej zmiennej, czyli prędkości obrotowej próbnika  $n$  zakres zmienności to 20–55 obr/min, dla trzeciej zmiennej – czasu pojedynczej próby  $t$  zakres wynosił 4–12 min.

Ze względu na szczególną efektywność i możliwość opisywania nieliniowych modeli obiektu badań, a przy tym kompozycyjność, czyli możliwość weryfikacji modelu liniowego, przyjęto plan Hartleya o oznaczeniu PS/DS-P:Ha<sub>3</sub> przy obszarze zmienności na hiperkuli (hK). Należy on do planów statycznych, zdeteminowanych, poliselekcyjnych dla trzech wielkości wejściowych, w którym stosuje się pięć różnych wartości dla każdej wielkości wejściowej [9].

Podstawową zasadą tworzenia planów poliselekcyjnych jest celowy dobór kombinacji wartości wielkości wejściowych (w założonym uprzednio zakresie) w taki sposób, aby istniała możliwość uzyskania wymaganej informacji naukowej przy ograniczonych nakładach pracy, czyli stosunkowo małej liczbie pomiarów [9, 10]. Pomocny na tym etapie badań był program Statistica. Umożliwia on generowanie różnego rodzaju planów badań, dzięki modułowi „planowanie doświadczeń” [11].

Wybór planu poliselekcyjnego znacznie zmniejsza liczbę koniecznych prób w stosunku do planu kompletnego. Jak można zauważyć w tabeli 2, układy planu od numeru 11 do numeru 14 przedstawiają te same kombinacje wartości wielkości wejściowych. Powtórzenie doświadczenia dla tych kombinacji jest niezbędne w celu określenia błędów aproksymacji założonej funkcji obiektu badań.

**Tabela 2**  
**Układy planu Hartleya obrazujące kombinację wartości wielkości wejściowych podczas badań wstępnych**

Układy planu Hartleya	Siła docisku $P_d$	Obroty $n$	Czas $t$
1	192	27	10
2	308	27	6
3	192	48	6
4	308	48	10
5	150	37	8
6	350	37	8
7	250	20	8
8	250	55	8
9	250	37	4
10	250	37	12
11	250	37	8
12	250	37	8
13	250	37	8
14	250	37	8

Niestety po wykonaniu badań dla wyznaczonego planu eksperymentu i przeprowadzeniu analizy statystycznej wyników badań stwierdzono, że wyznaczone funkcje obiektu badań, dla każdej badanej próbki, są nieadekwatne w stosunku do wyników pomiarów.

Przeprowadzono dodatkowe badania dla kilku innych planów eksperymentów, jednakże za każdym razem uzyskiwano zbyt małą liczbę pomiarów, a tym samym niedokładną funkcję opisującą obiekt badań. W związku z powyższym wyniknęła potrzeba zastosowania jednak planu kompletnego.

## 5. REALIZACJA BADAŃ

Wybór planu kompletnego wiązał się z dużym nakładem pracy oraz był bardzo czasochłonny. Z uwagi na poznawczy charakter badań dla planu kompletnego rozszerzono zakres zmienności wielkości wejściowych w stosunku do wcześniej wspomnianych planów eksperymentu. Zdecydowano się na to, aby uzyskać większą ilość danych w celu wyznaczenia dokładniejszej funkcji aproksymującej obiektu badań. Zakresy zmienności oraz badane wartości dla planu kompletnego zestawiono w tabeli 3. Zadawane wartości wielkości wejściowych zostały wybrane symetrycznie dla każdego zakresu zmienności. Taki dobór jest konieczny w celu najdokładniejszego odzwierciedlenia charakteru zmienności wielkości wejściowych na wynik badania [9, 12].

**Tabela 3**  
**Zakresy zmienności oraz wybrane wartości wielkości wejściowych**

Wielkości wejściowe	Siła docisku $P_d$ [N]	Obroty $n$ [obr/min]	Czas $t$ [min]
Zakres zmienności	100–400	10–65	2–15
Badane wartości	100, 200, 300, 400	10, 30, 50, 65	2, 5, 10, 15

Kombinacje wartości wielkości wejściowych przyjęte do poszczególnych prób były określone przez przyjęty kompletny plan doświadczenia. Przy trzech wielkościach wejściowych i czterech wartościach badanych dla każdej z nich łącznie wykonano 64 próby ( $4 \times 4 \times 4$ ). Dla trzech skał łącznie liczba pojedynczych prób wyniosła 192. Ze względu na obszerną ilość danych poszczególnych układów planu kompletnego nie umieszczono w niniejszym artykule.

Badania wykonano na stanowisku laboratoryjnym do określania ścierności skał, które zostało opisane

w rozdziale drugim, zgodnie z następującym planem badań:

- przygotowanie próbek skalnych oraz pomiar ich mas,
- przygotowanie próbników do badań oraz pomiar ich mas,
- zamocowanie próbniaka i próbki skalnej w uchwytach na stanowisku,
- ustawienie czasu badania oraz prędkości obrotowej próbniaka na panelu sterującym,
- zadanie siły docisku próbki skalnej do próbniaka za pomocą grawitacyjnego układu docisku z obciążnikami,
- wykonanie badania,
- zwolnienie siły docisku,
- demontaż próbniaka i pomiar jego masy,
- demontaż próbki skalnej i pomiar jej masy,
- obliczenie ubytku masy próbniaka i próbki skalnej,
- wyznaczenie wskaźnika ścierności  $W_z$ .

Przeprowadzone badania oprócz wartości wskaźnika ścierności  $W_z$  dla każdej kombinacji wartości wejściowych, umożliwiły uzyskać wiele innych cennych następujących wniosków:

- czas próby 2 min jest zbyt krótki, zaś siła docisku próbniaka do próbki skalnej 100 N oraz prędkość obrotowa próbniaka 10 obr/min są zbyt małe, aby uzyskać mierzalne zużycie próbniaka z dokładnością do 0,01 grama;
- prędkość obrotowa próbniaka 65 obr/min oraz siła docisku 400 N, niezależnie od czasu próby powodują jego nagrzewanie się i w konsekwencji prowadzi to do zużycia cieplnego próbniaka, a nawet jego odkształcenia plastycznego.

Na podstawie powyższych obserwacji układy z tymi wartościami wejściowymi, a tym samym wartości wskaźnika ścierności  $W_z$  nie były brane pod uwagę przy przeprowadzaniu analizy wyników.

## 6. ANALIZA WYNIKÓW I WYBÓR FUNKCJI OBIEKTU BADAŃ

Po wyznaczeniu wskaźników ścierności dla wszystkich wyznaczonych układów planu kompletnego, przeprowadzono analizę wyników badań w celu wyznaczenia funkcji obiektu badań dla każdej próbki.

We wszystkich analizach statystycznych przyjęto poziom istotności  $p = 0,05$ . Jest to wartość zwykle przyjmowana w technicznych badaniach doświadczalnych [8–12].

Pierwszym krokiem analizy wyników było sprawdzenie jednorodności wariancji. Jest to warunek konieczny do spełnienia. Brak jednorodności wariancji uniemożliwia poszukiwanie funkcji obiektu badań. Jednorodność wariancji przeprowadzono testem Browna–Forsythe’a z wykorzystaniem programu Statistica za pomocą modułu *Statystyki podstawowe i tabele (Przekroje, prosta ANOVA)*. Jeżeli test daje wyniki statystycznie nieistotne ( $p = 0,05$ ), to należy przyjąć hipotezę o jednorodności wariancji [8]. Jak można zauważyć na rysunku 4, dla wszystkich trzech badanych próbek skalnych poziom istotności  $p$  jest większy od 0,05, stąd jednorodność wariancji jest zachowana.

Przed wyznaczeniem funkcji obiektu badań sprawdzono również, czy wpływ wielkości wejściowej na wielkość wyjściową jest istotny. Weryfikację przeprowadzono za pomocą testu F Snedecora (Fishera). Wykorzystano moduł *Statystyki podstawowe i tabele (Przekroje, prosta ANOVA, Analiza wariancji)*. Uzyskane wartości poziomu istotności  $p$  mniejsze od 0,05 świadczą o istotnym wpływie wielkości wejściowych na wyjściowe.

Przeprowadzona analiza wariancji (rys. 5) z zastosowaniem testu F wykazała istotny wpływ siły docisku, prędkości obrotowej i czasu pojedynczej próby na wartość wskaźnika ścierności dla wszystkich trzech badanych próbek.

Podczas analizy wyników wartość zmiennej  $P_d$  podzielono przez 10 w celu minimalizacji błędów numerycznych. Następnie określono postać funkcji opisującej zależność empiryczną (4) dla każdej z badanych skał.

Zmienna	Test jednorod. wariancji Browna-Forsythe'a (Plan kompletny)								
	Zaznaczone efekty są istotne z $p < .05000$								
	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	
Wz (pias)	1,120500	3	0,56025	3,580000	60	0,210588	2,660405	0,098806	
Wz (bet)	0,114500	3	0,05725	1,097500	60	0,064559	0,886788	0,430196	
Wz (por)	0,009656	3	0,004828	0,033594	60	0,001976	2,443256	0,116766	

Rys. 4. Wyniki testu Browna–Forsythe’a dla trzech badanych skał

Analiza wariancji (Plan kompletny)									
Zaznaczone efekty są istotne z $p < .05000$									
Zmienna	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p	
Wz (pias)	29,06889	3	9,689629	77,74373	60	1,295729	7,478131	0,000247	
Wz (bet)	7,96197	3	2,653991	30,38804	60	0,506467	5,240201	0,002804	
Wz (por)	8,84422	3	2,948073	28,13938	60	0,468990	6,286009	0,000882	

Rys. 5. Wyniki analizy wariancji testem  $F$  dla trzech badanych skał

Wstępne porównanie stopnia adekwatności różnych postaci funkcji aproksymujących opisujących zależność (4), zaowocowały wyborem funkcji w postaci wielomianu drugiego stopnia z podwójnymi interakcjami (5).

$$W_z = f(P_d, n, t) \quad (4)$$

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (5)$$

Liczba niewiadomych  $b_i$  zaproponowanego wielomianu aproksymującego wynosi 10 i jest mniejsza od liczby układów planu, co powoduje spełnienie warunku koniecznego ze względu na kryterium informacyjności planu [7]. Stałe  $b_i$  obliczono metodą estymacji *quasi*-Newtona przy użyciu programu Statistica.

Na podstawie analizy istotności współczynników  $b_i$ , przeprowadzonej przy wykorzystaniu testu  $t$ -Studenta, dokonano odrzucenia współczynników uznanych za nieistotne, przy poziomie istotności 0,05. Wykorzystano moduł *Zaawansowane modele liniowe i nieliniowe (Estymacja nieliniowa, Regresja użytkowania)*. Współczynniki istotne program zaznacza kolorem czerwonym (rys. 6). Następnie z wielomianu usunięto składowe ze współczynnikami nieistotnymi i ponownie wygenerowano współczynniki równania, tak aby wszystkie były zaznaczone kolorem czerwonym (czyli wszystkie uznane za istotne).

Na rysunku 6 przedstawiono przykład wyników dla piaskowca. W ten sam sposób analizę istotności przeprowadzono również dla porfiru i betonu. Funkcje aproksymujące dla trzech badanych skał są następujące:

– piaskowiec:

$$W_{z_1} = -3,67 + 0,66 \cdot t + 0,2 \cdot P_d - 0,03 \cdot t^2 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot P_d^2 \quad (6)$$

– beton:

$$W_{z_2} = -2,45 + 0,3 \cdot t + 0,17 \cdot P_d - 0,014 \cdot t^2 - 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_d^2 \quad (7)$$

– porfir:

$$W_{z_3} = -6,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot P_d^2 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot n + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot P_d + 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot P_d \quad (8)$$

gdzie:

$W_z$  – wskaźnik ścierności [–],

$t$  – czas próby [min],

$n$  – prędkość obrotowa próbника [obr/min],

$P_d$  – siła docisku próbника do próbki skalnej [N].

Model: $v_5 = b_0 + (b_1 \cdot v_2) + (b_2 \cdot v_3) + (b_3 \cdot v_4) + (b_{11} \cdot v_2^2) + (b_{22} \cdot v_3^2) + (b_{33} \cdot v_4^2) + (b_{12} \cdot v_2 \cdot v_3) + (b_{13} \cdot v_2 \cdot v_4) + (b_{23} \cdot v_3 \cdot v_4)$ (Plan kompletny)						
Zmn. zal.: Wz (pias)						
Poziom ufności: 95,0% (alfa = 0,050)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 54	p	Dol. uf Granica	Górn. uf Granica
b0	-3,77469	1,1183	-3,37538	0,001372	-6,01675	-1,53263
b1	0,55707	0,132698	4,19807	0,000101	0,29103	0,82312
b2	0,03936	0,031201	1,26143	0,212577	-0,02320	0,10191
b3	0,16433	0,064326	2,55465	0,013482	0,03536	0,29329
b11	-0,02925	0,006507	-4,49572	0,000037	-0,04230	-0,01621
b22	-0,00052	0,000355	-1,46293	0,149282	-0,00123	0,00019
b33	-0,00310	0,001132	-2,67230	0,009939	-0,00543	-0,00780
b12	-0,00113	0,001132	-1,00215	0,320743	-0,00340	0,00113
b13	0,00206	0,002098	0,98403	0,329489	-0,00214	0,00627
b23	0,00071	0,005010	1,40964	0,164380	-0,00030	0,00171

Model: $v_5 = b_0 + (b_1 \cdot v_2) + (b_3 \cdot v_4) + (b_{11} \cdot v_2^2) + (b_{33} \cdot v_4^2)$ (Plan kompletny)						
Zmn. zal.: Wz (pias)						
Poziom ufności: 95,0% (alfa = 0,050)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 54	p	Dol. uf Granica	Górn. uf Granica
b0	-3,66638	0,766369	-4,78409	0,000012	-5,19988	-2,13288
b1	0,56475	0,117299	4,81459	0,000011	0,33003	0,79946
b3	0,20822	0,060836	3,42258	0,001133	0,08648	0,32995
b11	-0,02925	0,006711	-4,35876	0,000053	-0,04268	-0,01582
b33	-0,00310	0,001196	-2,59089	0,012044	-0,00550	-0,00071

Rys. 6. Eliminacja współczynników nieistotnych w programie Statistica na przykładzie wyników badań piaskowca

Po usunięciu współczynników nieistotnych w każdej wyznaczonej funkcji sprawdzono adekwatność funkcji obiektu badań dla wyników pomiarów. Weryfikację adekwatności przeprowadzono testem  $\chi^2$  (chi-kwadrat). Uzyskany poziom istotności  $p$  wyniósł 0,120 (średnio) i był on większy od 0,05, co świadczy, że otrzymane funkcje są adekwatne w stosunku do wyników pomiarów. Dodatkowo sprawdzono również współczynniki korelacji  $R$  dla wyznaczonych funkcji. Dla piaskowca wyniósł on  $R = 0,92$ , dla porfiru  $R = 0,90$ , a dla betonu  $R = 0,81$  (rys. 7).

Zależna Zm.	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2
Wz (pias)	0,918444	0,843539	0,765309
Wz (bet)	0,907918	0,824316	0,736473
Wz (por)	0,808076	0,652987	0,479480

Rys. 7. Współczynniki korelacji dla wyznaczonych funkcji

Następnie z funkcji (6), (7), (8) ułożono układ równań (9) i rozwiązano go za pomocą programu Matlab w celu otrzymania ostatecznych wartości wielkości wejściowych  $P_d$ ,  $n$  i  $t$ . Każde równanie przyrównano do maksymalnej wartości wskaźnika ścierności  $W_z$ , jaką otrzymano podczas badań, w celu wyznaczenia minimalnych wartości wielkości wejściowych, przy których można uzyskać największe zużycie próbника.

$$\begin{cases} -3,67 + 0,66 \cdot t + 0,2 \cdot P_d - 0,03 \cdot t^2 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot P_d^2 = 3,0 \\ -2,45 + 0,3 \cdot t + 0,17 \cdot P_d - 0,014 \cdot t^2 - 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot P_d^2 = 1,4 \\ -6,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot P_d^2 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot n + \\ + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot P_d + 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot P_d = 1,7 \end{cases} \quad (9)$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań otrzymano następujące wartości wielkości wejściowych, tj. czas próby  $t = 7,88$  min, prędkość obrotowa próbника  $n = 50,37$  obr/min oraz siła docisku próbника do próbki skalnej  $P_d = 30,48$  N.

Jak wcześniej wspomniano, wartości siły  $P_d$  podzielono przez 10 w celu zmniejszenia błędów numerycznych. Stąd kolejnym etapem było przeprowadzenie badań sprawdzających dla trzech badanych skał z następującymi wartościami wielkości wejściowych:  $t = 8$  min,  $n = 50$  obr/min,  $P_d = 300$  N.

Następnie wykonano badania sprawdzające dla wyznaczonych wielkości wejściowych dla trzech badanych skał. W przypadku każdej skały wykonano pięć powtórzeń w celu sprawdzenia powtarzalności wyników. Wyniki zestawiono w tabeli 4. Dodatkowo do każdego z wyznaczonych równań podstawiono wyliczone wartości wejściowe i otrzymano:

– dla piaskowca:

$$W_{z_1} = -3,67 + 0,66 \cdot 8 + 0,2 \cdot 35 - 0,03 \cdot 8^2 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot 35^2 = 3,0 \quad (10)$$

– dla betonu:

$$W_{z_2} = -2,45 + 0,3 \cdot 8 + 0,17 \cdot 35 - 0,014 \cdot 8^2 - 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 35^2 = 1,0 \quad (11)$$

– dla porfiru:

$$W_{z_3} = -6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 8^2 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 50^2 - 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 35^2 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 50 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 35 + 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 35 = 1,4 \quad (12)$$

Analizując wartości wskaźnika ścierności  $W_z$  z tabeli 4, można zauważyć, że wyniki badań są prawie identyczne z tymi otrzymanymi z równań. Oznacza to, że funkcja aproksymująca została dobrze dobrana i dokładnie opisuje obiekt badań.

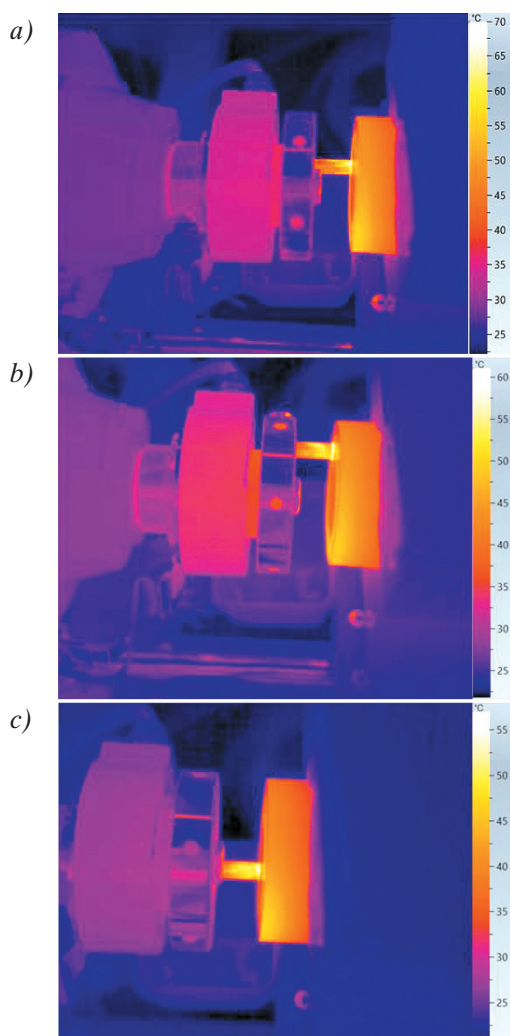
Jak wcześniej wspomniano, w przypadku kilku prób dochodziło do odkształcenia plastycznego stalowego próbника. Zbyt duża temperatura próbника może powodować zmianę właściwości materiałowych stali oraz prowadzić do zużycia cieplnego próbника. Ze względu na to dla wyznaczonych wartości wielkości wejściowych za pomocą kamery termowizyjnej sprawdzono temperaturę próbника dla każdej próby z tabeli 4.

Tabela 4

Zestawienie wyników badań trzech skał dla wyznaczonych wielkości wejściowych

Lp.	$P_d$ [N]	$n$ [obr/min]	$t$ [min]	$W_z$ (piaskowiec)	$W_z$ (beton)	$W_z$ (porfir)
1	350	50	8	3,2	1,0	1,4
2				3,0	1,1	1,3
3				3,0	1,1	1,3
4				3,1	1,0	1,3
5				2,9	1,1	1,4
Średnia wartość z badań				3,1	1,1	1,3
Wartość z równań				3,0	1,0	1,4

Jak widać na rysunku 8, niezależnie od rodzaju próbki, maksymalna temperatura próbki oscyluje w granicach 55–70°C. Taka temperatura nie powoduje zbyt dużego nagrzewania się próbki ani większego wpływu zużycia cieplnego nad zużyciem ściernym [13, 14].



Rys. 8. Obrazy termograficzne rozkładu maksymalnej temperatury podczas badań:  
a) piaskowca; b) porfiru; c) betonu

## 7. PODSUMOWANIE

Przeprowadzenie badań wstępnych oraz statystyczne opracowanie wyników pozwoliło na zweryfikowanie założeń oraz wniesienie poprawek do planu i metodyki badań. Wybór planu kompletnego pozwolił zachować zadowalającą dokładność wyznaczenia funkcji aproksymującej wzajemne zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi i wielkością wyjściową. Osiągnięto najważniejszy cel, jakim było ustalenie ostatecznych wartości wielkości wejściowych: siły docisku próbki do czoła próbki skalnej równej 300 N,

prędkości obrotowej próbki równej 50 obr/min oraz czasu badania wynoszącego 8 min.

Następnym krokiem będzie przeprowadzenie badań zasadniczych dla różnych typów skał. Będą to między innymi wapień, dolomit, granit, marmur, rudy metali, różne rodzaje piaskowców i bazalt.

### Podziękowania

Prace finansowane z grantu dziekańskiego na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w ramach umowy numer 15.11.130.841.

### Literatura

- [1] Piątek P.: *Test punktowy, test brazylijski i test na jednoosiowe ściskanie – badania porównawcze*, „Górnictwo i Geoinżynieria” 2008, 32, 1: 285–292.
- [2] Hobler M.: *Badania fizykomechanicznych własności skał*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
- [3] Krauze K., Mucha K.: *Analiza metod określania ścierności skał*, w: *Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie. Tom 1: Wybrane problemy górnictwa podziemnego. Monografia*, red. K. Krauze, Łędziny – Kraków 2015: 171–180.
- [4] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T., Mucha K.: *Durability testing of tangential – rotary picks made of different materials*, „Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering” 2017, 1: 26–34.
- [5] Käsling H., Thuro K.: *Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory*, w: *Geologically Active. Proceedings of the 11th IAEG Congress*, Auckland, New Zealand, 2010: 1973–1980.
- [6] Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P.: *Abrasivity testing for rock and soil*, „Tunnels and Tunnelling International” 2006, 4: 47–49.
- [7] Krauze K., Mucha K.: *Laboratoryjna metoda badania ścierności skał*, w: *Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie. Tom 1: Wybrane problemy górnictwa podziemnego. Monografia*, red. K. Krauze, Łędziny – Kraków 2016: 118–125.
- [8] Konkol J.: *Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu*, Wydawnictwo StatSoft Polska Sp. z o.o., Kraków 2008: 43–58.
- [9] Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.
- [10] Górecka R.: *Teoria i technika eksperymentu*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996.
- [11] Rabiej M.: *Statystyka z programem Statistica*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2012.
- [12] Strzałkowski A., Śliżyński A.: *Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1973.
- [13] Gierek A.: *Zużycie ściernie metalowych elementów roboczych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
- [14] Hebda M., Wachal A.: *Tribologia*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.

mgr inż. KAMIL MUCHA

prof. dr hab. inż. KRZYSZTOF KRAUZE

Katedra Maszyn Górniczych,

Przerobczych i Transportowych

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

{kmucha, krauze}@agh.edu.pl