

Fotogrametryczna ocena profilu uziarnienia materiału skalnego na przykładzie systemu blokowego z wypuszczaniem urobku

Photogrammetry Evaluation of Mock Pile Fragmentation obtained by block caving method



*Dr inż. Andrzej Biessikirski**



*Mgr inż. Dušan Terpák**



*Dr inż. Vadim Mustafin**)*



*Mgr inż. Vladimir Romanov**)*



*Mgr inż. Dmitrij Suchov**)*

Treść: W artykule przedstawiono zastosowanie techniki fotogrametrycznej w ruchu rosyjskiego zakładu górniczego prowadzącego podziemną eksploatację diamentów. Analizy z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego Split Desktop 2.0. przeprowadzono dla dwóch różnych usypów urobku otrzymanych z ostatniej fazy wypuszczanej warstwy kompensacyjnej. W wyniku przeprowadzonych analiz zauważono, że stopniowemu odebraniu urobku towarzyszy zwiększony wychód brył nadgabarytowych oraz frakcji najdrobniejszej.

Abstract: This paper presents the indirect method of mock pile fragmentation evaluation. The photographic documentation was taken in one of the Russian diamond underground mines. The evaluation of fragmentation of two different mock piles obtained from the last phase of sublevel caving was performed in the Split Desktop 2.0 software. According to the analysis, it can be observed that the amount of oversize block and fines increases with a taken ore.

Słowa kluczowe:

fragmentacja, krzywa składu ziarnowego, Split Desktop 2.0, system blokowy z wypuszczaniem urobku

Keywords:

fragmentation, cumulative size distribution, Split Desktop 2.0, block caving mining method

*) AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**) Państwowy Uniwersytet Techniczny w Moskwie (MISIS)

1. Wstęp

Podstawowym problemem wynikającym z prowadzenia eksploatacji w kopalniach odkrywkowych, jak również górnictwie podziemnym, są straty eksploatacyjne mogące sięgać ponad 20%. Problem ten dotyczy przede wszystkim kopalń podziemnych wykorzystujących technikę strzelniczą do urobienia dużej ilości rudy (Zhang 2016). Ograniczenie strat może być uzyskane między innymi poprzez poprawę fragmentacji urobku. W tym celu koniecznym staje się prowadzenie dokładnej oceny rozdrobnienia urobionej kopaliny. Jedną z podstawowych technik umożliwiających prowadzenie analizy fragmentacji jest metoda fotogrametryczna. Należy jednak zaznaczyć, że fotogrametria polega głównie na ocenie urobku, znajdującego się na powierzchni usypu (Biessikirski, Biessikirski 2012, Biessikirski i in. 2016a). Celem przeprowadzenia bardziej miarodajnej analizy efektów wykonywanych robót strzałowych, konieczne staje się dokładne zbadanie materiału skalnego znajdującego się wewnątrz usypu. W przypadku górnictwa odkrywkowego jedną z możliwości jest stosowanie różnych systemów optycznych zlokalizowanych m.in. na przenośnikach taśmowych transportujących urobek (Bouajila i in. 2000, Dance 2001, Maerz 2001, 2007). Zaletą takiego systemu jest sposobność dostosowania odpowiedniego natężenia światła, co ma znaczenie przy wykonywaniu dokumentacji fotograficznej. Jednak jak zauważono w pracy (Maerz 2007), transportowany urobek najczęściej zostaje wcześniej poddany procesom przerobczym (wstępne kruszenie). Należy również zauważyć, iż przenośnik taśmowy może transportować urobek pochodzący z różnych usypów. Powoduje to, że powyższa metoda uniemożliwia ocenę stopnia rozdrobnienia po pojedynczym odstrzale.

Kolejny sposób analizy przewiduje montaż systemów optycznych na wozidłach technologicznych oraz w osprzęcie koparek. Ouchterlony opisuje trójstopniowy sposób oceny, którego celem jest poprawa fragmentacji urobku w perspektywie zwiększenia efektywności pracy młynów (Ouchterlony i in. 2007). Należy jednak zauważyć, że wykonanie zdjęcia materiału znajdującego się w skrzyni ładunkowej wozidła technologicznego polega ponownie na analizie urobku zlokalizowanego na powierzchni pryzmy. Dlatego coraz częstsze staje się sporządzanie dokumentacji fotograficznej w trakcie wyładunku urobku (Maerz 2007).

Ponownie należy zaznaczyć, że wspomniane powyżej systemy umożliwiają prowadzenie analiz tylko i wyłącznie na powierzchni usypu urobku. Lepsze poznanie struktury usypu możliwe jest poprzez częściowe jego odebranie, co było pokazane w artykule (Biessikirski i in. 2016b).

Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie możliwości zastosowania metody fotogrametrycznej w warunkach ruchu rosyjskiego podziemnego zakładu górniczego prowadzącego eksploatację diamentów.

2. Charakterystyka systemu eksploatacji w przedmiotowej kopalni A

Badanie fragmentacji urobku przeprowadzono na podstawie zebranej dokumentacji fotograficznej w Kopalni A, prowadzącej eksploatację złoża diamentów zalegających w formie dwóch sąsiadujących ze sobą kominów kimberlitytowych. Kominy znajdują się pomiędzy warstwami wapieni dolnego ordowiku. Diamenty zalegają w złożu eklogitowym, które znajduje się na kontakcie ze skałami perydytowo-dunitowymi. Złoże eksploatowane było w systemie odkrywkowym. W 2016 roku osiągnięto projektową głębokość odkrywki.

Od 2010 roku złożo eksploatuje się systemem blokowym z czołowym wypuszczaniem urobku, rys. 1a,b. Złoże dzieli się na bloki eksploatacyjne o wymiarach 40 x 45 m. W bloku wykonuje się długie otwory urabiające w układzie wachlarzowym o długości 35÷38 m pod kątem 60 – 90 °. W kolejnym etapie odstrzelony urobek wypuszcza się czołowo do chodnika eksploatacyjnego, rys. 1b. Nachylenie czoła bloku wynosi od 85÷90°. Pomiędzy blokami pozostawia się filary o szerokości podstawy 40 m. Po wybraniu sąsiedniego bloku zestrzeliwuje się filar nad chodnikiem eksploatacyjnym, w wyniku czego powstaje warstwa magazynująca urobek. Kolejność wybierania i wypuszczania warstw kompensacyjnych przedstawiono na rys. 1a.

2.1. Metodyka badawcza

Ocena rozdrobnienia urobku została wykonana z wykorzystaniem programu komputerowego *SPLIT Desktop 2.0*, znajdującego się na wyposażeniu Pracowni Technik Strzelniczej i Oddziaływań na Środowisko AGH w Krakowie. Pierwszym etapem prac było sporządzenie niezbędnej dokumentacji fotograficznej zgodnie z zaleceniami opisanymi w pracach (Batko, Sołtys 2007, Biessikirski, Biessikirski 2012, Esen, Bilgin 2001, Ouchterlony i in. 2007).

Analizę przeprowadzono dla dwóch różnych usypów urobku (urobek nr 1 i urobek nr 2) uzyskanych z ostatniej fazy wypuszczania warstwy kompensacyjnej, co wymusił stosowany system eksploatacji.

Przykładowe zdjęcie przedstawiające oceniane usypy urobku w Kopalni A (rys. 2).

Dla każdego analizowanego usypu wykonano po 20 fotografii, z których wybrano po 3, celem poddania późniejszej obróbce, aby spełniały wymagania oprogramowania komputerowego. Program *SPLIT Desktop 2.0* samodzielnie dostosowuje wprowadzone zdjęcia do dalszej analizy poprzez przetworzenie kolorów do skali szarości. W programie wykonano skalowanie materiału fotograficznego oraz dokonano manualną delinearację. Przykładowe okonturowanie urobku dla wybranych sektorów przedstawiono na rysunku 3a i 3b. Na rysunkach 3c oraz 3d zaprezentowano przetworzone graficznie przez program *Split Desktop 2.0*. fotografie sektorów badawczych.

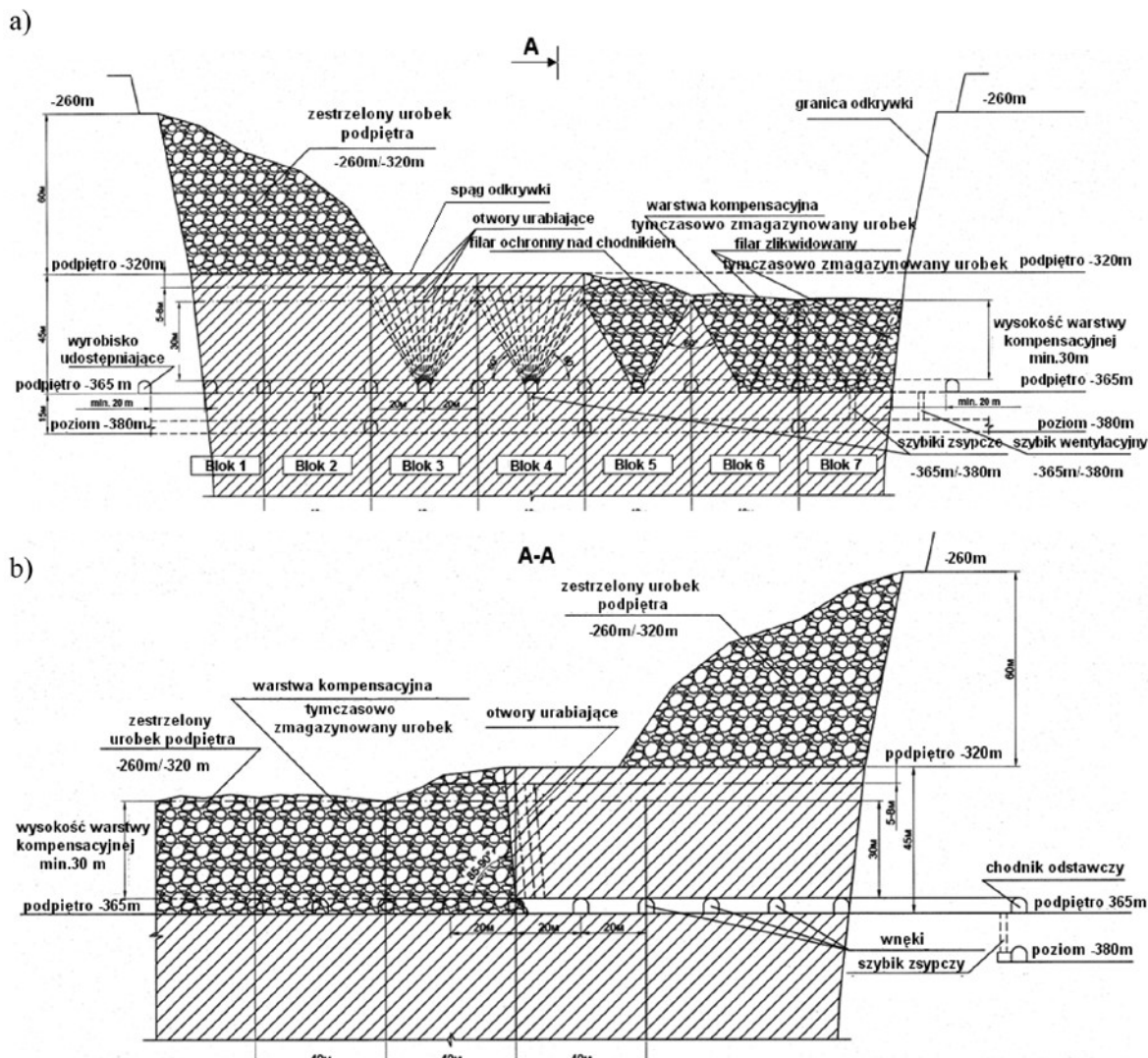
Porównując okonturowanie urobku na rysunku 3a z 3c, oraz 3e z 3g, zauważono wyraźną różnicę we fragmentacji analizowanego urobku, m.in. w ilości frakcji najdrobniejszej (0 ÷ 4,75 mm) oraz nadgabarytowej (powyżej 700 mm) (PN-B-02480 1986).

Po wykonaniu okonturowania, użytkownik inicjuje w programie funkcję oceny fragmentacji na przykładzie rozkładu Schumanna. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskuje się logarytmiczno-liniowy wykres, przedstawiający krzywą składu ziarnowego badanego obszaru usypu. Przykładową krzywą składu ziarnowego otrzymanego dla urobku nr 1 - usyp nr 1 przedstawiono na rys 4.

Na podstawie rys. 4 zauważa się, że ilość brył nadgabarytowych (frakcji powyżej 700 mm) w usypie wynosi ok. 4,94%. Średnica największego ziarna (Top size - rys. 4) jest równa ok. 823,83 mm. Dodatkowo, ilość występującej frakcji najdrobniejszej poniżej 4,75 mm, wynosi około 4,33%.

2.2. Wyniki analizy rozdrobnienia

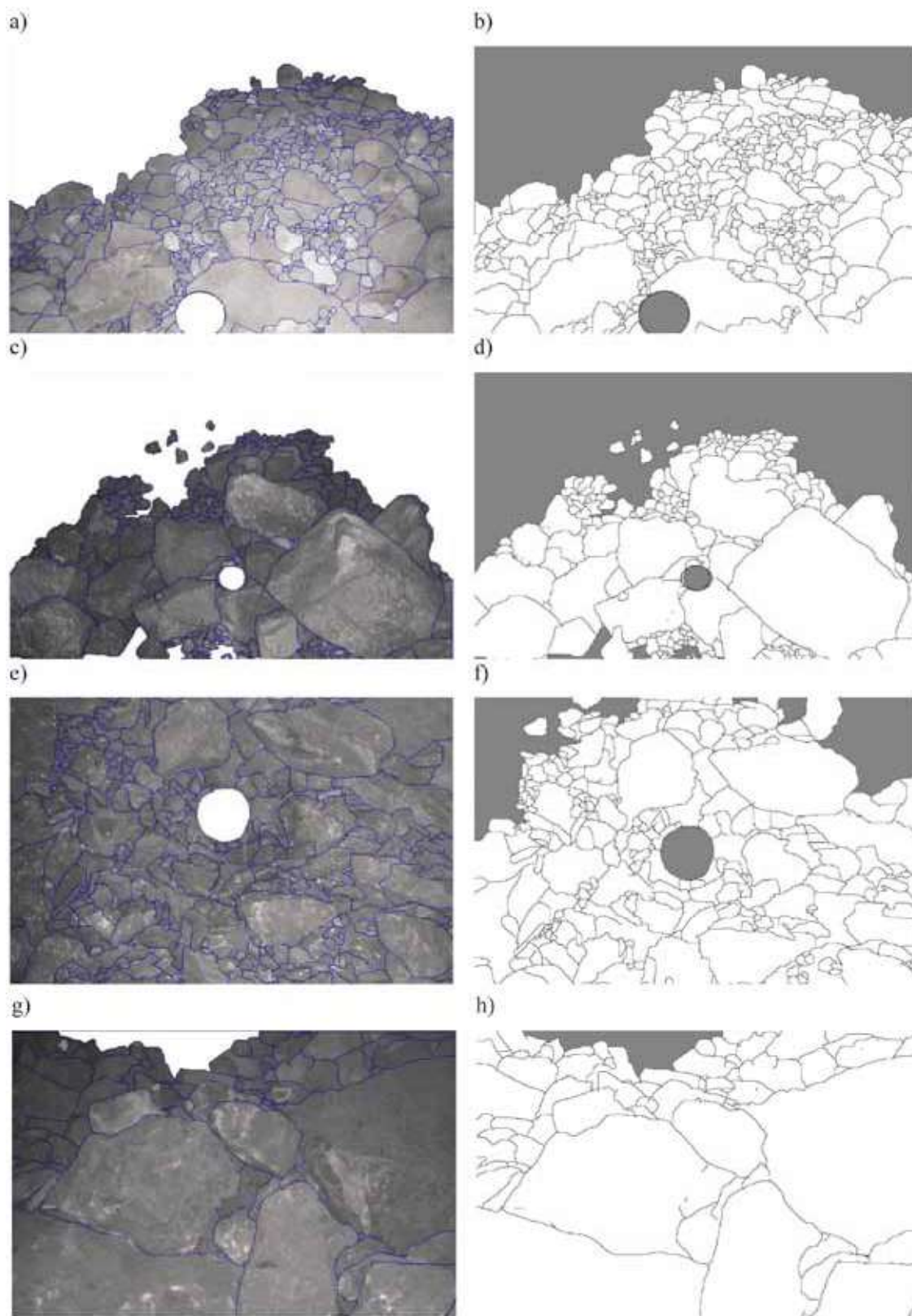
Jak zauważono w publikacji (Biessikirski i in. 2016a, 2017), analiza fragmentacji urobku jest metodą dającą wyniki przybliżone ze względu na analizę urobku znajdującego się tylko i wyłącznie na powierzchni usypu. W celu zbadania fragmentacji urobek nr 1 i urobek nr 2 został częściowo ode-



Rys. 1. Schemat systemu z blokowym wypuszczaniem urobku: a) kolejność wybierania i wypuszczania warstw kompensacyjnych, b) wypuszczanie urobku
 Fig. 1. Schematic diagram with block caving: a) order and direction of sublevel caving in underground mine A, b) loading of the caved hanging wall

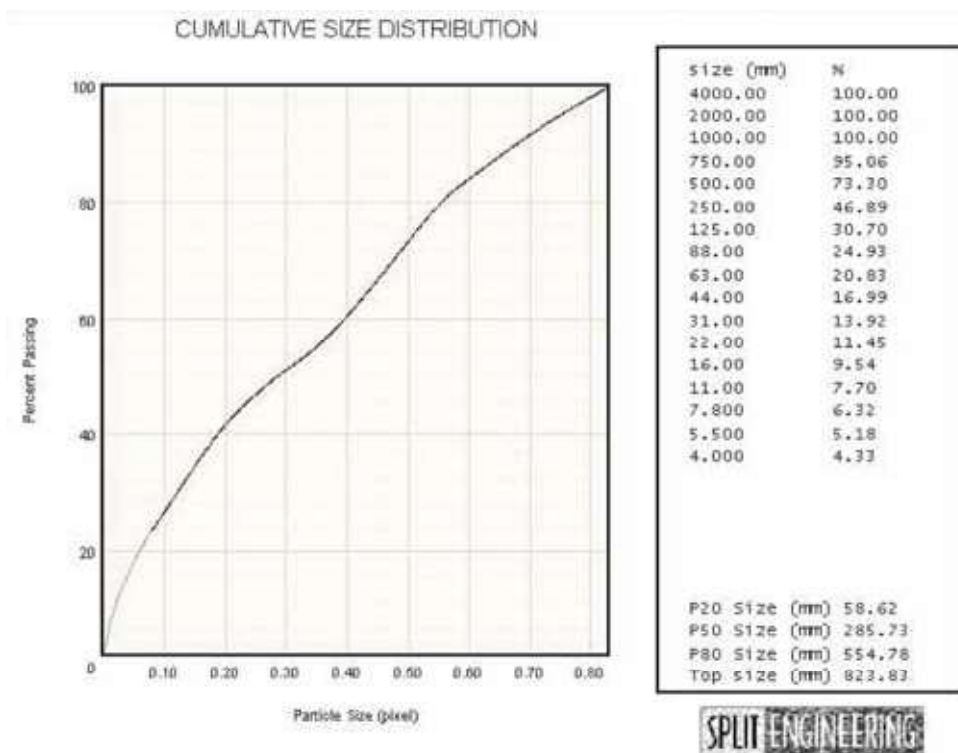


Rys. 2. Analizowany urobek pochodzący z pierwszej fazy wypuszczania: a) usyp nr 1, urobek 1, b) usyp nr 1, urobek nr 2
 Fig. 2. Analyzed mock pile from the first phase of sublevel caving a) mock pile no. 1, series no. 1, b) mock pile no. 1, series no. 2



Rys. 3. Okonturowanie urobku: a) wykonane przez użytkownika dla usypu nr 1, urobek nr 1, b) przetworzone przez program dla usypu nr 1, urobek nr 1, c) wykonane przez użytkownika dla usypu nr 2, urobek nr 1, d) przetworzone przez program dla usypu nr 2, urobek nr 1, e) wykonane przez użytkownika dla usypu nr 1, urobek nr 2, f) przetworzone przez program dla usypu nr 1, urobek nr 2, g) wykonane przez użytkownika dla usypu nr 2, urobek nr 2, h) przetworzone przez program dla usypu nr 2, urobek nr 2

Fig. 3. Output delineation: a) performed by the user for mock pile no. 1, series no. 1, b) processed by the computer for mock pile no. 1, series no. 1, c) performed by the user for mock pile no. 2, series no. 1, d) processed by the computer for mock pile no. 2, series no. 1, e) performed by the user for mock pile no. 1, series 2, f) processed by the computer for mock pile no. 1 series no 2, g) performed by the user for mock pile no. 2, series no 2, h) processed by the computer for mock pile no 2, series no 2



Rys. 4. Przykładowa krzywa składu ziarnowego dla przekroju usypu nr 1 urobku nr 1
 Fig. 4. The cumulative size distribution for section of mock pile no 1, series 1

brany. Urobek nr 1 został na początku odebrany w ok. 17%, a następnie odebrano kolejne 5% brył z jego powierzchni. Urobek nr 2 został dwukrotnie odebrany w ilości po ok. 10%. Analizę fragmentacji usypów urobku nr 1 i 2 przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w publikacji (Biessikirski i

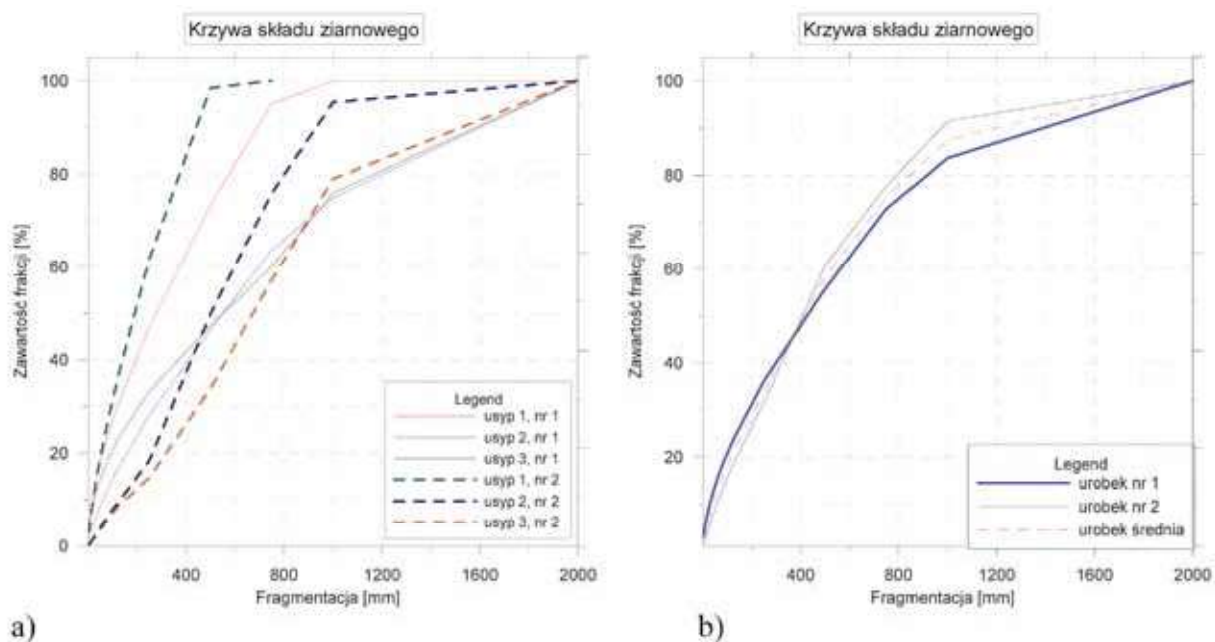
in. 2017). Na podstawie przeprowadzonych analiz metodą fotogrametryczną, otrzymano wyniki średnich procentowych udziałów wielkości ziaren dla urobku nr 1 i 2 po stopniowym ich odebraniu, które zaprezentowano w tabeli 1 i 2 oraz na rysunkach 5a-5d.

Tabela 1. Średni procentowy udział wielkości ziaren urobku w poszczególnych fazach wypuszczania – Kopalnia A
 Table 1. The average percentage share of the output particle size for various stages of gravity flow of broken rock in sublevel caving - Underground mine A

Greniczny rozmiar ziarna [mm]	Suma procentowych udziałów wielkości ziaren dla poszczególnych fotografii urobku nr 1			Wartość średnia [%]
	1 [%]	2 – urobek odebrany w 17% [%]	3 – urobek odebrany w 22% [%]	
< 4,00	4,35	1,40	3,60	3,1
< 5,50	5,20	1,85	4,67	3,9
< 7,80	6,34	2,31	5,45	4,7
< 11,00	7,72	2,94	6,48	5,7
< 16,00	9,57	3,82	7,85	7,1
< 22,00	11,48	4,79	9,26	8,5
< 31,00	13,96	6,13	11,10	10,4
< 44,00	17,03	7,90	13,36	12,8
< 63,00	20,87	10,26	16,17	15,8
< 88,00	24,97	13,09	19,32	19,1
< 125,00	30,74	16,91	23,28	23,6
< 250,00	46,92	28,10	33,24	36,1
< 500,00	73,32	46,48	47,30	55,7
< 750,00	95,06	63,57	60,00	72,9
< 1000,00	100,00	74,92	75,94	83,6
< 2000,00	-	100,00	100,00	100,0

Tablica 2. Średni procentowy udział wielkości ziaren urobku w poszczególnych fazach wypuszczania – Kopalnia A
Table 2. The average percentage share of the output particle size for various stages of gravity flow of broken rock in sublevel caving - Underground mine A

Graniczny rozmiar ziarna [mm]	Suma procentowych udziałów wielkości ziaren dla poszczególnych fotografii urobku nr 1			Wartość średnia [%]
	1 [%]	2 – urobek odebrany w 10% [%]	3 – urobek odebrany w 20% [%]	
< 4,00	2,95	0,24	0,27	2,7
< 5,50	3,72	0,34	0,37	3,4
< 7,80	4,81	0,49	0,53	4,1
< 11,00	6,20	0,72	0,74	5,0
< 16,00	8,17	1,09	1,09	6,2
< 22,00	10,33	1,54	1,50	7,4
< 31,00	13,30	2,25	2,13	9,1
< 44,00	17,19	3,30	3,03	11,1
< 63,00	22,36	4,90	4,36	13,8
< 88,00	28,55	7,09	6,12	16,8
< 125,00	36,87	9,56	8,73	20,9
< 250,00	61,66	18,33	14,68	31,6
< 500,00	98,49	49,78	33,86	51,5
< 750,00	100,00	75,86	57,13	70,7
< 1000,00	100,00	95,43	78,99	85,0
< 2000,00	100,00	100,00	100,00	100,0



Rys. 5. Krzywe składu ziarnowego: a) dla urobku nr 1 i urobku nr 2, b) uśrednionego urobku
Fig. 5. The cumulative size distribution: a) for series no. 1 and series no. 2, b) weighted output series

Na wyznaczonych krzywych składu ziarnowego, rys. 5a, widać wyraźną zmianę średniego procentowego udziału wielkości ziarna wraz z częściowym odebraniem urobku. W ocenianym usypie 1 urobku nr 1 (rys. 5a), średnia zawartość frakcji nadgabarytowej wynosiła ok. 4,96%, a frakcji najdrobniejszej ok. 4,35%. Odebranie urobku z powierzchni usypu w ilości ok. 17,00% spowodowało odsłonięcie na powierzchni usypu 2 nr 1 (rys. 5a) brył nadgabarytowych w ilości ok. 36,43%. W przypadku frakcji najdrobniejszej, zaobserwowano obniżenie jej zawartości w porównaniu do usypu nr 1 o 2,95%. Duża zawartość ziaren o wymiarze od 11 do 700 mm prawdopodobnie spowodowała utrudnione przemieszczanie się frakcji najdrobniejszych w głąb usypu urobku. Dalsze ode-

branie urobku o ok. 5,00% (usyp 3 nr 1 – rys. 5a) nie wykazuje znacznej różnicy w strukturze usypu. Odebranie urobku o ok. 5 % spowodowało nieznaczne zwiększenie zawartości brył nadgabarytowych o ok. 3,57% w porównaniu do usypu 2. W przypadku zawartości frakcji najdrobniejszej zauważono jej przyrost o ok. 2,20%. Może to być spowodowane ułatwionym przemieszczaniem się drobnej frakcji dzięki występowaniu większych przestrzeni między materiałem skalnym znajdującym się w analizowanym usypie 2. W przypadku urobku nr 2 zaobserwowano podobną tendencję jak dla urobku nr 1. Zawartość frakcji najdrobniejszej na powierzchni usypu 1 nr 2 (rys. 5a) wyniosła ok. 2,95%. Dodatkowo na powierzchni usypu nr 1 praktycznie nie występowały bryły nadgabarytowe.

Stopniowe odebranie urobku w ilości ok. 10,00% spowodowało odsłonięcie frakcji nadgabarytowej. Na podstawie tabeli 2 oraz rys 5a można zaobserwować, że zawartość brył nadgabarytowych na powierzchni usypu 2 nr 2 (rys. 5a) wynosiła ok. 24,14%, a ilość frakcji najdrobniejszej uległa zmniejszeniu o ok. 2,71%. Odebranie urobku o kolejne 10,00% spowodowało dalsze zwiększenie zawartości brył nadwymiarowych o kolejne 18,73% oraz nieznaczne zwiększenie zawartości frakcji najdrobniejszej na powierzchni usypu 3 nr 2 o ok. 0,03% (rys. 5a). Należy jednak zauważyć, że w przypadku urobku nr 2 wraz ze wzrostem stopnia odebrania następuje wyraźne zmniejszenie zawartości frakcji w zakresie od 5,5 do 500 mm. Różnica ta wynika z wielkości odebranego materiału w porównaniu z urobkiem nr 1. Dalszemu odbieraniu materiału skalnemu prawdopodobnie towarzyszyła, by podobna tendencja jak dla urobku nr 1 i 2.

Porównując ze sobą uśrednione krzywe dla urobku nr 1 i urobku nr 2 (rys. 5b), zauważono, że uzyskane zawartości frakcji w odpowiadających sobie przedziałach ziarna są do siebie zbliżone. Uśredniając uzyskane wyniki dla urobku nr 1 i urobku nr 2 (rys 5b) zaobserwowano, że zawartość frakcji najdrobniejszej w strukturze uśrednionego urobku wynosi ok. 2,13%, a brył nadgabarytowych ok. 24,73%.

3. Wnioski

Wykonane analizy pokazują możliwość zastosowania pośredniej oceny fragmentacji urobku w oparciu o technikę fotogrametrii w warunkach ruchu podziemnych zakładów górniczych.

Zbadanie przekroju usypu dostarcza dodatkowych informacji odnośnie oceny otrzymanego urobku. Można przewidywać, że dalsze postępowanie (odbieranie urobku i badanie kolejnego profilu usypu) przybliżyłoby uzyskany wynik metodą fotogrametryczną do metody bezpośredniej (z wykorzystaniem sit).

Częściowe odebranie urobku wykazało znaczne różnice w strukturze usypów. Na podstawie uzyskanych danych można było zauważyć, że w wyniku prowadzenia eksploatacji przy użyciu systemu blokowego z czołowym wypuszczeniem urobku duża część brył nadgabarytowych znajdowała się w głębi usypu, a nie na jego powierzchni. Podobne spostrzeżenia uzyskano zarówno dla urobku nr 1 i 2.

Porównując ze sobą procentowe udziały wielkości ziarna przedstawione za pomocą krzywych składu ziarnowego dla urobku nr 1 i urobku nr 2, zauważa się, że otrzymane wartości są do siebie zbliżone. Uśredniając uzyskane wyniki, można stwierdzić, że średnia zawartość frakcji najdrobniejszej w strukturze uśrednionego urobku wynosi ok. 2,13%, a brył nadgabarytowych ok. 24,73%.

Należy zauważyć, że zastosowana metoda w przypadku Kopalni A ma swoje ograniczenia, związane z prowadzonym systemem eksploatacji, przez co badanie profilu usypu urobku było możliwe tylko i wyłącznie dla ostatniej fazy wypuszczenia. Wyznaczoną w ten sposób średnią wartość udziałów

ziarna należy traktować z dużym przybliżeniem. Dokładne sprawdzenie średnich udziałów wielkości ziarna należałoby przeprowadzić poprzez wykonanie analiz dla poszczególnych faz wypuszczenia z uwzględnieniem częściowego odebrania otrzymanych usypów urobku.

Badania zostały zrealizowane w ramach działalności statutowej AGH nr 11.11.100.597

Literatura

- BATKO P., SOŁTYS A. 2007 - O sposobach określania składu ziarnowego urobku po strzelaniu. Magazyn WUG: „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 9/1, s. 5 -8.
- BIESSIKIRSKI A., BIESSIKIRSKI R. 2012 - Wpływ warunków geologiczno-górnicznych na fragmentację urobku w kopalniach wapienia. Magazyn WUG: „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, nr 12, s. 18 - 27.
- BIESSIKIRSKI A., DWORZAK M., PYRA J. 2016a - Pośrednia analiza fragmentacji urobku otrzymanego w wyniku robót strzałowych wykonywanych w kopalni dolomitu. „Przegląd Górniczy” nr 7, s. 33-38.
- BIESSIKIRSKI A., DWORZAK M., PYRA J. 2016b - Analiza porównawcza fragmentacji urobku na przykładzie jednej z kopalń dolomitu. „Przegląd Górniczy”, nr 12, s. 48-53.
- BIESSIKIRSKI A., TERPÁK D., MUSTAFIN V., ROMANOV V. SUCHOV D. 2017 - Analiza fragmentacji rudy niklowo-miedziowej eksploatowanej systemami z czołowym wypuszczeniem urobku na przykładzie rosyjskich kopalń podziemnych. „Przegląd Górniczy”, nr 10.
- BOUJILA A., BARTOLACCI G., KOCH N., CAYOUILLE J., COTE C. 2000 - Toward the improvement of primary grinding productivity and energy investigation consumption efficiency. Mine to Mill, Finland. 5., nr. 33, s. 125 - 139.
- DANCE A. 2001 - The importance of primary crushing in the mill feed size optimization. SAG, s. 270 - 281.
- ESEN S., BILGIN, H.A. 2001 - Effect of Explosive on Fragmentation. Materiał internetowy: ([http://www.metsominerals.com/inetMinerals/mm_proc.nsf/WebWID/WTB-060320-2256F60F1C/\\$File/esen_fragmentation_2001.pdf](http://www.metsominerals.com/inetMinerals/mm_proc.nsf/WebWID/WTB-060320-2256F60F1C/$File/esen_fragmentation_2001.pdf)).
- MAERZ N.H. 2001 - Automated online optical sizing analysis. SAG, s. 250 - 269.
- MAERZ N.H. 2007 - Optical sizing analysis of blasted rock: lesson learned”. Materiał konferencyjny 4th EFEE World Conference of Explosives and Blasting in Vienna, s. 75 - 83.
- OUCHTERLONY F., NYBERG U., BERGMAN, P., ESEN S. 2007 - Monitoring the blast fragmentation of Boliden Mineral's Aitik mine. Materiał konferencyjny 4th EFEE World Conference of Explosives and Blasting in Vienna, s. 47 - 63.
- PN-B-02480:1986. Grunty budowlane - Symbole, podział i opis gruntów.
- ZHANG Z. 2016 - Rock Fracture and Blasting: Theory and Application. 1st Edition. Butterworth-Heinemann (Imprint of Elsevier).

Artykuł wpłynął do redakcji – czerwiec 2017
Artykuł akceptowano do druku 20.08.2017