

Analiza fragmentacji rudy niklowo-miedziowej eksploatowanej systemami z czołowym wypuszczaniem urobku na przykładzie rosyjskich kopalń podziemnych

The indirect method of the fragmentation analysis of the nickel – copper ore excavated according to sublevel caving based on the Russian underground mining



*Dr inż. Andrzej Biessikirski**



*Mgr inż. Dušan Terpák**



*Dr inż. Vadim Mustafin**)*



*Mgr inż. Vladimir Romanov**)*



*Mgr inż. Dmitrij Suchov**)*

Treść: W artykule przedstawiono pośredni sposób oceny fragmentacji urobku z wykorzystaniem metody fotogrametrycznej na podstawie sporządzonej dokumentacji fotograficznej, przy użyciu programu komputerowego Split desktop 2.0. Analizę wykonano w oparciu o dane dla dwóch rosyjskich kopalni rudnych prowadzących eksploatację z zastosowaniem systemu podpółkowego z czołowym wypuszczaniem urobku z zawałem stropu.

Abstract: The indirect method of the output's fragmentation assesment is presented in the article. The fragmentation assessment was mad in the Split Desktop 2.0. software, based on the photographic documentation which was taken after the blasting works. The data were obtained from the sublevel caving mining method.

Słowa kluczowe:

fragmentacja, krzywa składu ziarnowego, Split Desktop 2.0, wypuszczanie urobku

Keywords:

fragmentation, cumulative size distribution, Split Desktop 2.0, gravity flow of broken rock

*) AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**) Państwowy Uniwersytet Techniczny w Moskwie (MISIS)

1. Wstęp

Jednym z podstawowych parametrów mających znaczenie podczas prowadzenia eksploatacji rud przy zastosowaniu systemów z wypuszczaniem urobku, z zawałem stropu jest fragmentacja urobku. Rozdrobnienie urobku nie tylko pozwala na ocenę efektywności wykonywania robót strzałowych, ale również wpływa na przebieg procesu wypuszczania, dobór urządzeń ładujących, transportujących, przerobczych, jak również synchronizację całego układu technologicznego kopalni (Biessikirski i in. 2016a, Terpak 2010). Wzrost zawartości frakcji grubych w rozluźnionej rudzie powoduje poszerzenie strefy wpływu otworów wypustowych, co korzystnie przekłada się na wielkość strat i zubożenie rudy. W przypadku występowania dużej ilości nadgabarytów (bryły powyżej 700 mm) będzie dochodzić do zaklinowywania się lub zawieszania urobku podczas procesu wypuszczania (Terpak 2016). Z powyższego względu koniecznym staje się przeprowadzenie prawidłowej oceny fragmentacji urobku ze względu na możliwość przeprowadzenia ewentualnej korekty stosowanych parametrów strzałowych.

Obecnie do oceny fragmentacji urobku wykorzystywana jest analiza bezpośrednia oraz pośrednia. Analiza bezpośrednia (analiza sitowa) uważana jest za najdokładniejszą metodę oceny faktycznego stopnia rozdrobnienia urobku, jednak biorąc pod uwagę ilość koniecznego do przeanalizowania urobku, czasochłonność wykonywanych badań oraz czynnik ekonomiczny, metoda ta staje się mało praktyczna (Biessikirski i in. 2016a, Esen, Bilgin 2001). Z powyższego względu, metody pośrednie, w tym empiryczne np. zależność Kuznetsova, Cunninghama, jak również komputerowe wspomaganie oceny rozdrobnienia urobku z wykorzystaniem specjalistycznych aplikacji m.in. techniki fotogrametrii, znajdują szerokie zastosowanie (Cunningham 1983, Farnarzi i in. 2013, Kuzniecova 1973). Należy jednak zaznaczyć, że analizy oparte na technice fotogrametrycznej znajdują zastosowanie przede wszystkim w zakładach górnictwa odkrywkowego, co było przedmiotem licznych artykułów (Aler i in. 1996, Batko, Sołtys 2007, Biessikirski i in. 2016a, 2016b, Farnarzi i in. 2013, Farmer i in. 1991, MAERZ I IN. 1987). W przypadku górnictwa podziemnego technikę fotogrametryczną wykorzystano głównie w badaniach wpływu spekań na stopień rozdrobnienia urobku oraz przy modelowaniu mechanizmu kruszenia podczas urabiania masywu skalnego przez maszyny TBM (Li i in. 2016, Yin i in. 2016).

Celem niniejszej publikacji jest uzupełnienie stanu wiedzy z zakresu oceny fragmentacji urobku w górnictwie podziemnym.

2. Charakterystyka zakładów górniczych oraz zastosowanego systemu eksploatacji

Analizę rozdrobnienia urobku przeprowadzono dla dwóch rosyjskich kopalń rudnych (Kopalnia A oraz Kopalnia B) znajdujących się na Półwyspie Kolskim. Kopalnie zlokalizowane są na terenie złoża *Severny – Gluboky*, którego północna część charakteryzuje się wystąpieniem intruzji *Talnakh i Kharackh*. Obie intruzje wykazują zróżnicowanie wysokościowe w obu skrzydłach uskoku (Lightfoot 2017).

Eksploatacja rudy niklowo-miedziowej ($Ni \approx 0,48\%$ w 1 tonie rudy, $Cu \approx 1,94\%$) w 1 tonie rudy prowadzona jest w obu kopalniach przy użyciu techniki strzelniczej z zastosowaniem systemu blokowego z czołowym wypuszczaniem urobku – kopalnia A (rys. 1a) oraz systemu podpółkowego z czołowym wypuszczaniem urobku, (rys. 1.b).

W Kopalni A rudę eksploatuje się w oparciu o system blokowy z czołowym wypuszczaniem urobku, z zawałem stropu, rys. 1a. Ogólna koncepcja polega na podziale złoża na bloki eksploatacyjne, których wysokość wynosi od 18÷50 m w zależności od miąższości złoża. W spągu wykonuje się chodniki eksploatacyjne, w których wierci się długie otwory strzałowe (urabiające) w układzie wachlarzowym. Odstrzeloną rudę wypuszcza się czołowo do chodnika eksploatacyjnego do momentu pojawienia się skały płonnej. Odstawa urobku odbywa się przy pomocy ładowarek i wozów odstawczych. W celu wymuszenia zawału wykonuje się i odpala wachlarze otworów przerywających strop w rejonie chodnika likwidacyjnego.

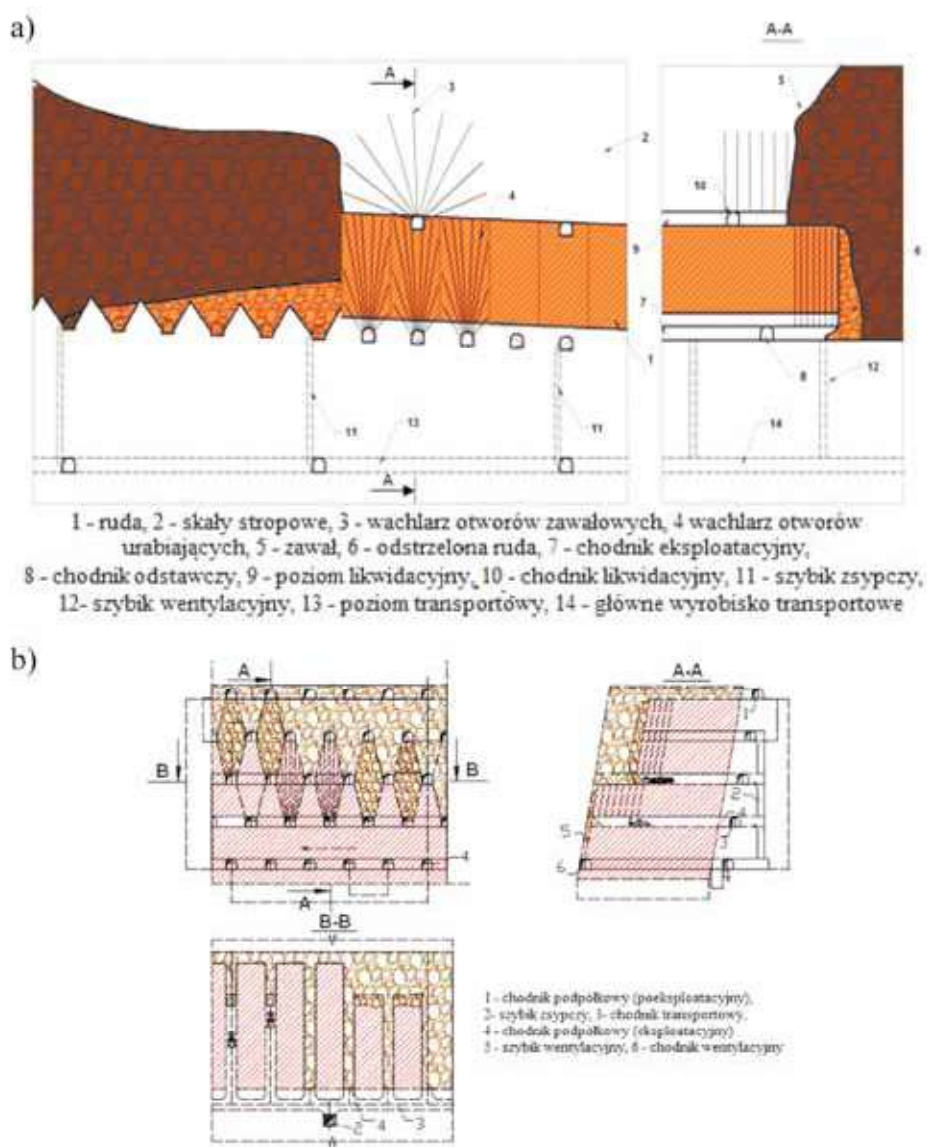
W Kopalni B do eksploatacji rudy stosuje się system podpółkowy z czołowym wypuszczaniem urobku, rys. 1b. Eksploatację prowadzi się od góry w dół z zawałem skał stropowych. Złoże dzieli się na podpiętra, których wysokość nie przekracza 30 m. W chodnikach eksploatacyjnych wykonuje się długie otwory urabiające w układzie wachlarzowym, a rudę wypuszcza się do chodnika eksploatacyjnego. Dodatkowo, na rys. 1b przedstawiono poszczególne fazy wiercenia otworów i wypuszczanie urobku. Odstawa urobku w fazie pierwszej odbywa się przy pomocy ładowarek z przodka eksploatacyjnego do szybika zsypanego. W fazie drugiej urobek transportuje się przy pomocy wozów odstawczych.

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, Cunningham 1983, Siddiqui i in. 2009). Etap ten jest szczególnie ważny, gdyż bezpośrednio wpływa na ostateczny rezultat analiz. Fotografie wykonano w sposób sekwencyjny w niewielkiej odległości od usypu, a urobek znajdował się w płaszczyźnie prostopadłej do obiektywu aparatu Canon powershot a470. Należy zaznaczyć, iż istotny wpływ na rezultat wykonywanych analiz może mieć niski poziom natężenia światła w wyrobisku górnym, wilgotność oraz pył. Niedostateczne doświetlenie może prowadzić do błędów w przypadku zastosowania metody automatycznej delineaacji (wystąpienie dużej ilości „szumów”, oraz brak możliwości automatycznej identyfikacji konturów ocenianego urobku). Przykładowe zdjęcie przedstawiające oceniany usyp urobku, w Kopalni A, przedstawiono na rys. 2.

Niewystarczające natężenie światła oraz występowanie pyłu w atmosferze kopalnianej, wymusiło zwiększenie poziomu dokładności podczas wykonywania delineaacji (okonturowania) urobku. Do oceny fragmentacji urobku zastosowano zmodyfikowaną metodykę badawczą przedstawioną w publikacji (Biessikirski i in. 2016b). Dla każdego usypu wykonano po 20 zdjęć, z których następnie wyselekcjonowano w przypadku Kopalni A - 5 zdjęć, oraz dla Kopalni B - 4 zdjęcia.

Po załadowaniu zdjęcia, program *SPLIT Desktop 2.0* samodzielnie dostosowuje fotografię do dalszej analizy poprzez reprezentację kolorów do skali szarości w różnym natężeniu. W pierwszym etapie analizy, użytkownik rozpoczyna skalowanie obrazu poprzez umieszczenie kulistego obiektu o znanym rozmiarze w miejscu wykonywanej analizy (w przypadku przeprowadzanych badań była to piłka o średnicy 248 mm). Następnie wybrany został typ analizy do przeprowadzenia (*single object* - tzw. „pojedynczy obiekt”, umożliwia wykonanie analizy fragmentacji urobku względem zeskalowanego obiektu poniżej i powyżej średnicy pojedyn-



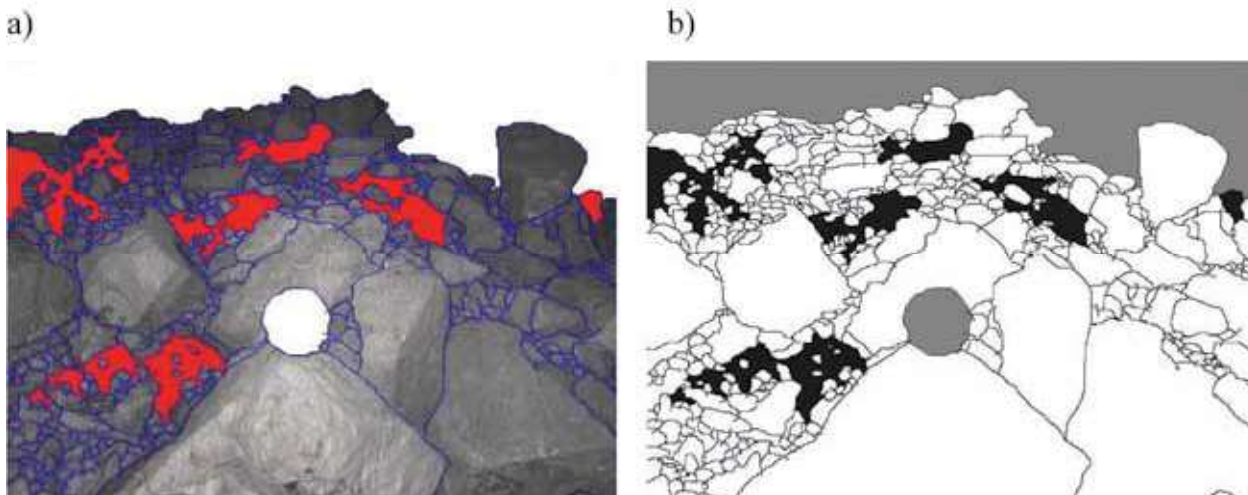
Rys. 1. Schemat ideowy: a) system blokowy z czołowym wypuszczaniem urobku – Kopalnia A, b) system podpółkowy z czołowym wypuszczaniem urobku – Kopalnia B
 Fig. 1. Schematic diagram of: a) sublevel caving in Underground mine A, b) sublevel caving in Underground mine B



Rys. 2. Analizowany urobek, Kopalnia A
 Fig. 2. Analyzed mock pile, Underground mine A

czego punktu odniesienia przy zachowaniu perspektywy zdjęcia). Program *SPLIT Desktop 2.0*. umożliwia przeprowadzenie automatycznej delineacji analizowanego urobku i wykonanie oceny większych ziaren (Split Desktop).

Wynikiem przeprowadzonych analiz jest uzyskanie różnych form krzywych składu ziarnowego (np. liniowa-liniowa, logarytmiczno-liniowa, logarytmiczno-logarytmiczna oraz Rosin-Rammler). Oczekiwany poziom istotności analizy odnoszący się do możliwego rozdrobnienia urobku (praktycznie brak występowania frakcji najdrobniejszej – zawierającej się w przedziale wielkości ziaren $0 \div 4,75$ mm, (PN-B-02480 1986) oraz natężenie światła wymusiło wykonanie delineacji urobku w sposób manualny, czego celem było uzyskanie jak największej dokładności wyników analizy (*Split Desktop*). Przykładowe okonturowanie urobku dla Kopalni A przedstawiono na rys. 3a. Na rys. 3b można zauważyć przetworzoną przez program *Split Desktop 2.0* fotografię części usypu pochodzącego z pierwszej fazy wypuszczenia.



Rys. 3. Delineacja usypu nr 1: a) ogólny widok, b) widok przetworzony przez program

Fig. 3. The delineation of the mock pile no. 1 a) general view, b) view processed by the Split Desktop 2.0

2.2. Wyniki analizy rozdrobnienia

Jak wspomniano w punkcie 2.2., ocenę fragmentacji wypuszczonego urobku sporządzono w przypadku Kopalni A na podstawie fotografii cyfrowych sporządzonych dla pięciu faz wypuszczenia, oraz analogicznie w przypadku Kopalni B dla czterech faz wypuszczenia. Dla każdego z usypów dokonano analizy fragmentacji urobku z wykorzystaniem programu *Split Desktop 2.0*. na podstawie 3 zdjęć wykonanych z różnych punktów, których wyniki uśredniono,

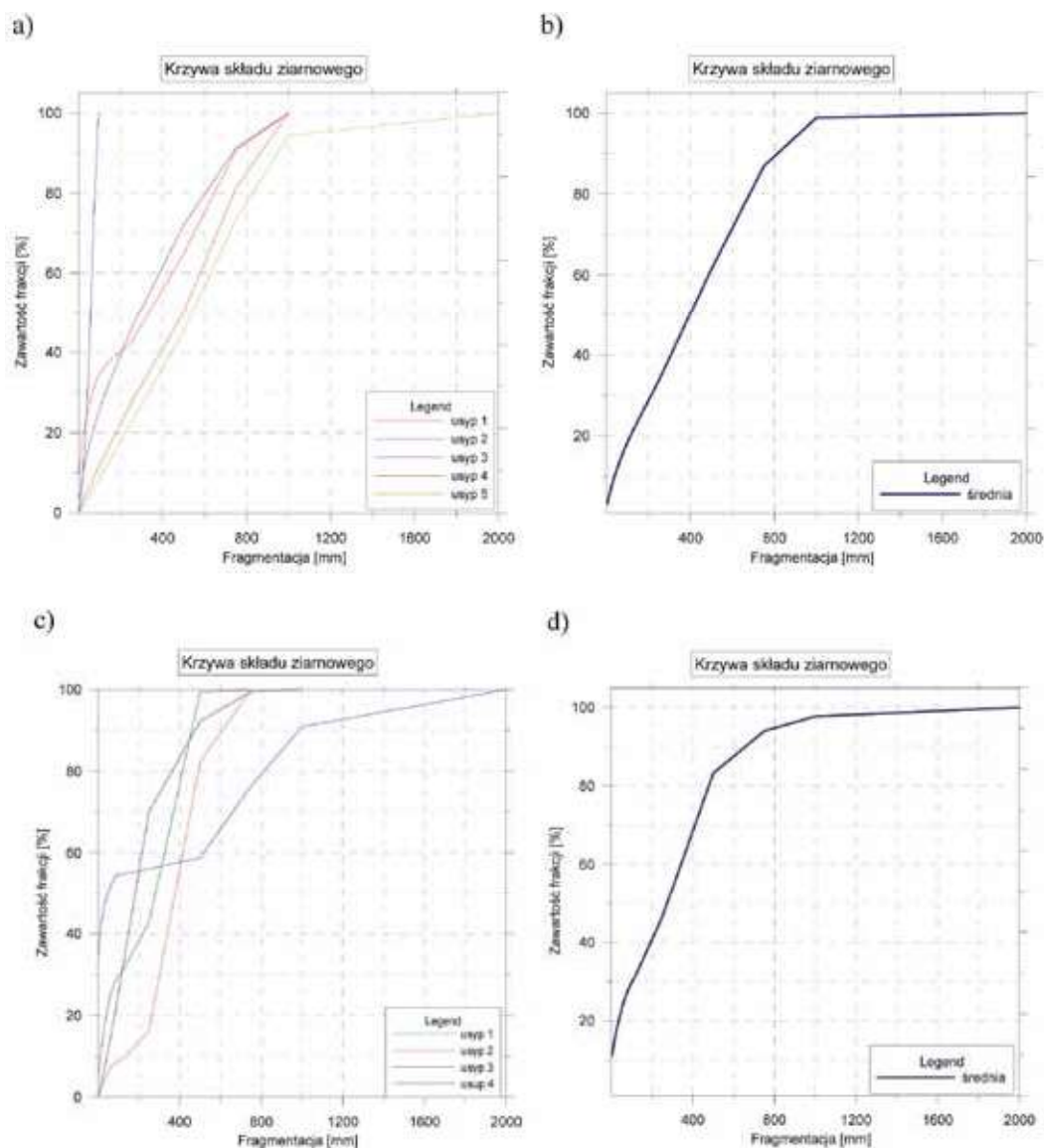
uzyskując tym samym krzywą składu ziarnowego dla pojedynczego usypu. W celu uogólnienia wyników fragmentacji urobku, otrzymane wyniki dla wszystkich faz wypuszczenia poddano uśrednieniu, otrzymując tym samym ogólną ocenę fragmentacji urobku. Przykładową krzywą składu ziarnowego dla pojedynczej analizy przeprowadzonej dla pierwszego wypuszczenia (pierwszej fazy wypuszczenia) urobku w Kopalni A przedstawiono na rys. 4. Wartości fragmentacji uzyskane z każdego analizowanego zdjęcia dla pierwszej fazy wypuszczenia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Suma procentowych udziałów wielkości ziaren urobku dla poszczególnych fotografii sektora nr 2
Sum of percentage of the output particle size for each photo which was taken in sector no. 2

Graniczny rozmiar ziarna	Suma procentowych udziałów wielkości ziaren dla poszczególnych fotografii dla pierwszej fazy wypuszczenia			Wartość średnia
	1 [%]	2 [%]	3 [%]	
[mm]				
< 4,00	9,25	9,72	10,20	9,72
< 5,50	10,52	10,99	11,50	11,00
< 7,80	12,16	12,61	13,17	12,65
< 11,00	14,04	14,45	15,06	14,52
< 16,00	16,43	16,77	17,43	16,88
< 22,00	18,78	19,03	19,74	19,18
< 31,00	21,68	21,81	22,57	22,02
< 44,00	25,10	25,06	25,88	25,35
< 63,00	29,15	28,88	29,75	29,26
< 88,00	33,49	32,95	33,87	33,44
< 125,00	36,71	35,45	37,87	36,68
< 250,00	41,56	41,41	43,99	42,32
< 500,00	62,36	65,43	66,80	64,86
< 750,00	91,12	90,55	90,81	90,83
< 1000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 3. Średni procentowy udział wielkości ziaren urobku w poszczególnych fazach wypuszczania – Kopalnia B
Table 3. The average percentage of the output particle size for various stages of gravity flow of broken rock in sublevel caving – Underground mine B

Graniczny rozmiar ziarna [mm]	Suma procentowych udziałów wielkości ziaren dla poszczególnych fotografii sektora nr 2				Wartość średnia [%]
	1 [%]	2 [%]	3 [%]	4 [%]	
< 4,00	5,22	0,49	0,79	34,69	10,30
< 5,50	6,26	0,67	1,10	36,55	11,14
< 7,80	7,65	0,96	1,57	38,11	12,07
< 11,00	9,32	1,35	2,25	40,07	13,25
< 16,00	11,55	1,98	3,34	42,33	14,80
< 22,00	13,87	2,74	4,70	44,37	16,42
< 31,00	16,88	3,88	6,82	46,69	18,57
< 44,00	20,61	5,55	10,04	49,18	21,35
< 63,00	25,29	7,49	15,00	51,88	24,91
< 88,00	28,81	8,62	21,91	54,43	28,44
< 125,00	31,21	9,43	32,61	54,91	32,04
< 250,00	42,76	16,17	70,09	56,08	46,28
< 500,00	99,42	82,41	92,28	58,86	83,24
< 750,00	100,00	100,00	99,53	76,38	93,98
< 1000,00	100,00	100,00	100,00	90,93	97,73
< 2000,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Rys. 5. Krzywe składu ziarnowego: a) w poszczególnych fazach – Kopalnia A, b) całej serii – Kopalnia A, c) w poszczególnych fazach – Kopalnia B, d) całej serii – Kopalnia B
Fig. 5. The cumulative size distribution: a) of each stage – Underground Mine A, b) for the whole series – Underground mine A, c) of each stage – Underground Mine B, d) for the whole series – underground Mine B

zauważyć, że zawartość frakcji najdrobniejszej oraz brył nadgabarytowych w strukturze całego usypu wynosi odpowiednio ok. 2,84% oraz 13,05%, tabela 2 i rys. 5b.

W przypadku Kopalni B, tabela 3 i rys. 5c, obserwuje się największą zawartość frakcji najdrobniejszej w fazie 1 (ok. 5,22%) oraz w fazie 4 (ok. 34,59%). Dodatkowo w fazie 4 występuje największa zawartość nadgabarytów (ok. 23,61%). Wysokie zawartości zarówno frakcji najdrobniejszej, jak i nadgabarytowej mogą być tłumaczone zarówno inicjacją tylną ładunku MW oraz gorszym współdziałaniem energii powstałym w wyniku detonacji. Uśredniając urobek otrzymany ze wszystkich faz wypuszczenia, tabela 3 i rys. 5d, obserwuje się w przypadku Kopalni B, że zawartość frakcji najdrobniejszej oraz brył nadgabarytowych w otrzymanym urobku wynosi odpowiednio ok. 10,30% oraz ok. 6,02%.

3. Wnioski

Zastosowanie programów komputerowych może stanowić pomocne narzędzie do oceny efektów wykonywanych robót strzałowych, jednak niemożność dostosowania przedziałów rozmiaru ziarna w programie *Split Desktop 2.0* stanowi ograniczenie użytkowe oprogramowania.

Program *Split Desktop 2.0* został wykorzystany do wykonania analizy fotogrametrycznej dla dwóch rosyjskich kopalni rudnych. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważa się, że:

- w przypadku Kopalni B największe zawartości frakcji najdrobniejszej znajdują w fazie 1 i fazie 4 wypuszczonego urobku. Wynika to z tylnej inicjacji MW oraz występowania przybitki,
- w Kopalni A największa zawartość frakcji najdrobniejszej znajdowała się w pierwszej fazie wypuszczonego urobku, co może być związane zarówno z umiejscowieniem przybitki, jak również lepszym przemieszczaniem się frakcji najdrobniejszych w stronę otworów wypustowych,
- uzysk frakcji nadgabarytowych (powyżej 700 mm) w uśrednionych usypach wynosił odpowiednio: w przypadku Kopalni A – ok. 13,05%, a dla Kopalni B – ok. 6,02%.
- Zaznacza się, że otrzymane wyniki fragmentacji urobku należy traktować z pewną rezerwą, ponieważ analizowano tylko urobek zlokalizowany na zewnętrznej powierzchni usypu. Przypuszcza się, że dokonanie uśrednienia urobku lub wykonanie analizy urobku zlokalizowanego wewnątrz usypu spowodowałoby otrzymanie odmiennych od przedstawionych w artykule wyników w postaci krzywych składu ziarnowego.

Badania zostały zrealizowane z ramach działalności statutowej AGH nr 11.11.100.597

Literatura

ALER J., DU MOUZA J., ARNOULD M. 1996 - Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech.* nr 33, s.125 – 139.

BATKO P., SOLTYS A. 2007 - O sposobach określania składu ziarnowego urobku po strzeleniu. *Magazyn WUG: „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”* nr 9/1, s. 5 -8.

BIESSIKIRSKI A., BIESSIKIRSKI R. 2012 - *Wpływ warunków geologiczno-górnictwowych 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. *„Przeгляд Górnictwa”* nr 7, s. 33-38.

BIESSIKIRSKI A., DWORZAK M., PYRA J. 2016b - Analiza porównawcza fragmentacji urobku na przykładzie jednej z kopalń dolomitu. *„Przeгляд Górnictwa”* nr 12, s. 48-53.

CUNNINGHAM CVB. 1983 - The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *Materiały konferencyjne The 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.* Lulea, Sweden s. 439 – 453.

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)).

FARMARZI F., MANSOURIN H., EBRAHIMI-FARSANGI M.A. 2013 - A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences;* nr 60, s. 82 – 94.

FARMER I.W., KEMENY J.M., MCDONIEL C. 1991 - Analysis of rock fragmentation in bench blasting using digital image processing. *Materiały konferencyjne International Congress on Rock Mechanics,* Aachen, Germany; s. 1037 - 1042.

KUZNETSOV V. M. 1973 – The mean diameter of fragments formed by blasting rock. *Journal of Mining Science;* nr 9, s. 144 –148.

LI X.F., LI H.B., LIU Y.Q., ZHOU Q.C., XIA X. 2016 - Numerical simulation of rock fragmentation mechanism subject to wedge penetration for TBMs. *Tunneling and Underground Space Technology;* nr 53, s. 96-108.

LIGHTFOOT P.C. 2017 - Nickel sulfide ores and impacts melts. *Origin of the sudbury igneous complex,* Amsterdam, Elsevier.

MAERZ N.H., FRANKLIN J.A., COURSEN D.L. 1987 - Fragmentation measurements for experimental blasting in Virginia. S.E.E. *Materiały konferencyjne: 3rd Mini-Symp. on Explosives and Blasting Research,* s. 56 - 70.

PN-B-02480:1986. Grunty budowlane - Symbole, podział i opis gruntów.

SIDDIQUI F.I., ALI SHAH S.M., BEHAN M. Y. 2009 - Measurement of Size Distribution of Blasted Rock Using Digital Image Processing. *Journal of King Abdulaziz University;* vol. 20, nr 2, s. 81-93.

Split Desktop 2.0 – instrukcja obsługi.

TERPÁK D. 2010 - Vplyv zmeny koeficienta približenia náloží na fragmentáciu rozvalu pri trhacích prácach na VDZ v SMZ, a.s. Jelšava, práca diplomová, FBERG Košice.

TERPÁK D. 2016 - Modelirovanie processa vypuska lignita pri otrabotke moshnyh pologih plastov. *Materiały konferencyjne: Problemy nedropol'zovaniâ, Konferencija mlodych ucyonyh: 20–22 kwietnia, Sankt – Peterburg;* s. 98 – 99.

YIN L., MIAO C., HE G., DAI F., GONG Q. 2016 - Study on the influence of joint spacing on rock fragmentation under TBN cutter by linear cutting test. *Tunneling and Underground Space Technology;* nr 57, s. 137-154.

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