

Badania degradacji ziarnowej wybranych materiałów zasypowych do likwidacji szybów górniczych

Tests of grain degradation of the selected filling materials for shafts closure



Mgr inż. Joanna Całus Moszko*)



Dr inż. Sławomir Bock*)



Dr hab. inż. Stanisław Prusek*)

Treść: Artykuł dotyczy zagadnienia doboru materiałów zasypowych do likwidowanych szybów górniczych. Materiały te charakteryzować się powinny określonymi własnościami, zapewniającymi bezpieczeństwo zarówno podczas, jak i po zakończeniu procesu likwidacji szybu. Jedną z takich własności jest wodoprzepuszczalność, na którą wpływ ma skład ziarnowy danego materiału. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych oraz dołowych, których celem była ocena zmian składu ziarnowego żużla stalowniczego i granitu. Dokonano oceny degradacji ziarnowej tych materiałów z uwagi na ich zrzut do likwidowanego szybu Żeromski w ZG „Piekary”. Przedstawiono degradację ziarnową dla dwóch głębokości zrzutu do szybu, tj. 190 m i 303 m. Artykuł przedstawia również wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych za pomocą programu PFC3D, których celem była ocena zmian składu ziarnowego żużla i granitu, dla większych głębokości zrzutu do likwidowanego szybu (do 1000 m).

Abstract: This paper presents the issue of filling material selection used for mine shafts closure. These filling materials should be characterized by certain properties that provide security both during and after the shaft closure. One such property is the water permeability which is affected by the grain size distribution of the material. The paper presents the results of laboratory and underground tests of filling materials, whose aim was to assess the changes in grain size composition of metallurgical slag and granite. An assessment of grain degradation was made due to the dropping into the shaft “Żeromski” in “Piekary” colliery. The tests were performed in the active part of the shaft over its length up to a depth of 190 and 303 m. This paper also presents the results of numerical calculations performed by the use of PFC3D, whose aim was to assess the changes in grain composition of metallurgical slag and granite for larger heights of dropping to the shaft (up to 1000 m).

Słowa kluczowe:

likwidacja szybów, materiał zasypowy, degradacja ziarnowa

Key words:

shafts closure, filling material, grain degradation

1. Wprowadzenie

Proces likwidacji szybów górniczych może wiązać się z możliwością wystąpienia wielu zagrożeń jak np. metanowych, wodnych, wentylacyjnych czy też powszechnych związanych z pojawianiem się zapadlisk na powierzchni terenu [12, 20, 21]. Powstawanie zapadlisk na powierzchni terenu jest najczęściej związane z uszkodzeniem obudowy oraz obsunięciem się kolumny zasypowej w szybie [15]. Z tego powodu, dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas i po

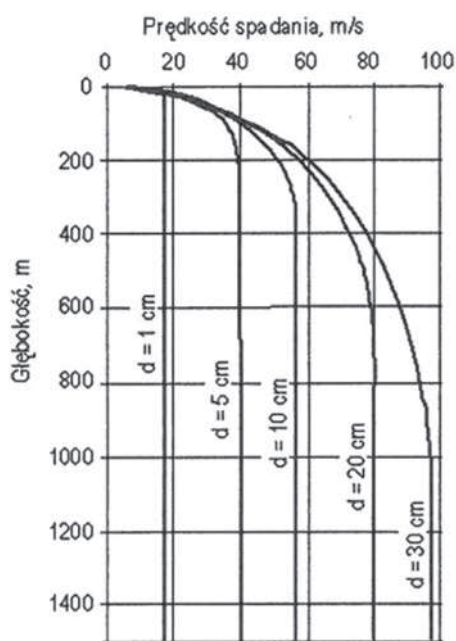
zakończeniu procesu likwidacji szybu, istotny jest właściwy dobór materiału zasypowego, który zapewni stabilność kolumny zasypowej. Tematyka doboru materiałów zasypowych do likwidacji szybów była przedmiotem wielu publikacji [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 21, 22].

Szczególnie istotną cechą materiału zasypowego jest jego wodoprzepuszczalność, która ma bezpośredni związek z jego składem ziarnowym. Wodoprzepuszczalność materiału warunkuje swobodny spływ wody do najniższej położonych wyrobisk przyszybowych. W likwidowanych szybach górniczych problemem może być zmiana współczynnika filtracji w obrębie kolumny zasypowej wskutek zmiany składu ziarnowego materiału, spowodowanej zrzuceniem go do szybu oraz

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

działaniem narastających ciśnień (pionowego i poziomego) w kolumnie zasypowej. Niebezpieczne sytuacje mogą pojawić się w przypadku braku odpowiedniej przepuszczalności zasypu szybowego, gdy woda gromadząca się w przestrzeni międzyziarnowej, powoduje wzrost ciśnienia hydrostatycznego zależnego od głębokości. Wówczas na tamy zabudowane na wlotach do szybu zaczyna działać ciśnienie o dużej wartości, które może spowodować przerwanie tych tam, a następnie przemieszczenie się materiału i obsunięcie kolumny zasypowej. Takie zdarzenie stanowi istotne zagrożenie w przypadku likwidacji szybu w czynnej kopalni. W przypadku nieczynnych zakładów, obsunięcie zasypu w szybie może prowadzić do powstania zapadłisk na powierzchni terenu, w przypadku kiedy uszkodzeniu ulegnie obudowa.

Dotychczas dla oceny degradacji materiałów z uwagi na ich zrzut do likwidowanych szybów, prowadzono rozważania teoretyczne [13] oraz analizy numeryczne [2, 3, 19]. Z przeprowadzonej analizy teoretycznej wynika, że pod wpływem energii kinetycznej, w suchym zasypie, zrzucony materiał zagęszcza się tworząc stabilną kolumnę zasypową. W przypadku zrzucania ziaren do wody, co może mieć miejsce w przypadku braku wodoprzepuszczalności zasypu, następuje gwałtowne wyhamowanie ziaren, które osiągają stałą prędkość opadania w wodzie. W takiej sytuacji tworzy się luźny



Rys. 1. Prędkość opadania materiału zasypowego w zależności od średnicy ziarn oraz głębokości szybu [13]

Fig. 1. Speed of descent of the filling material depending on the diameter of grains and the depth of the shaft [13]

ślup materiału z wodą, który może doprowadzić do utraty stabilności zasypu i jeżeli wytrzymałość tam wlotowych zostanie przekroczona, może nastąpić ucieczka materiału do wyrobisk przyszybowych. W badaniach tych, na podstawie analizy fizyki zjawiska spadku ciał swobodnych, opracowano szereg wykresów i tablic przedstawiających między innymi prędkość opadania w powietrzu brył o zróżnicowanych średnicach (rys.1) oraz krytyczną głębokość zrzutu różnych materiałów zasypowych, po przekroczeniu której następuje degradacja ziaren (tabl. 1).

Z przedstawionych w tabelicy 1. i na rysunku 1. danych wynika, że dla każdego materiału istnieje pewna graniczna wartość głębokości, powyżej której ziarna osiągają stałą prędkość, a zatem energia uderzenia wywołująca degradację nie rośnie w sposób liniowy. Należy jednak zwrócić uwagę, że założenie to jest słuszne dla spadku swobodnego występującego w przykładzie w szybie bez zbrojenia. W innych przypadkach struga materiału może podczas spadku uderzać o regularnie rozmieszczone zbrojenie szybu. W rezultacie może to powodować nieasympotyczny wzrost degradacji materiału zasypowego, zależny od głębokości i rozmieszczenia dźwigarów, co za pomocą obliczeń numerycznych analizowano w publikacjach [2, 3].

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w likwidowanym szybie Żeromski ZG „Piekary”, których celem była ocena degradacji ziarnowej materiałów zasypowych następująca wskutek zrzucenia ich do szybu na określone głębokości. Przedstawiono również wyniki badań numerycznych prognozy degradacji ziaren dla różnych głębokości zrzutów oraz badania laboratoryjne dla oceny zmian uziarnienia wybranych materiałów przed oraz po ich zrzuceniu do szybu.

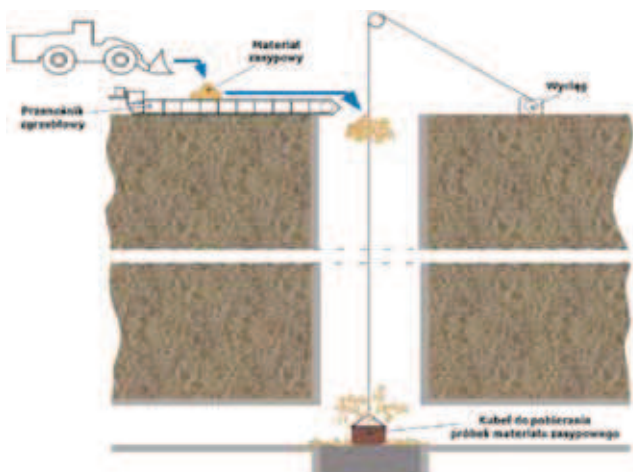
2. Badania dołowe degradacji ziarnowej wybranych materiałów zasypowych podczas likwidacji szybu górniczego

Badania dołowe prowadzono w likwidowanym szybie Żeromski ZG „Piekary”. Badania wykonano w ramach projektu MISSTER pt. „Mine Shafts: Improving Security and new Tools for the Evaluation”, który realizowany był w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2010÷2013 i współfinansowany przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali. Ze względu na charakter badań oraz konieczność prowadzenia ich w sposób nie powodujący zakłóceń procesu likwidacji szybu, testy dołowe przeprowadzono dla dwóch głębokości zrzutu to jest: 190 m i 303 m. Do badań wybrano kilka materiałów, najczęściej wykorzystywanych w polskich kopalniach do likwidacji szybów takich jak: granit, dolomit, żużel wielkopiecowy, żużel stalowniczy oraz odpady pogórnice. Materiały te przygotowano w różnych frakcjach uziarnienia, w ilości po około 10

Tablica 1. Krytyczne głębokości zrzutu dla wybranych materiałów zasypowych (na podstawie: [13])
Table 1. Critical depth of dropping of selected filling materials (based on: [13])

Rodzaj materiału skalnego	R_c , MPa	E_c , MPa	Średnica ziarna D ,				
			10 mm	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm
			Krytyczne głębokości zrzutu, m				
Granit	150	30000	-	-	118	102	98
Dolomit triasowy	75	17000	-	49	45	42	41
Piaskowiec gruboziarnisty	48	12800	-	25	23	22	22
Piaskowiec średnioziarnisty	52	11000	-	35	32	31	30
Piaskowiec drobnoziarnisty	70	11000	-	73	62	58	54
Iłowce i mułowce	45	13500	-	20	20	19	19

Mg. Z każdego materiału przed zrzutem do szybu, pobrano bezpośrednio z samochodu próbę o wielkości około 2 Mg, do badań laboratoryjnych zgodnie z normą PN- 90 G-04502. Pozostała ilość każdego z materiałów dostarczona została na miejsce badań, tj. w rejon likwidowanego szybu Żeromski. Ideę prowadzenia badań degradacji ziarnowej materiałów zasypowych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat prowadzenia badań degradacji ziarnowej materiałów zasypowych w szybie Żeromski [18]

Fig. 2. Schematic depiction of grain degradation tests in shaft "Żeromski" [18]

Przygotowane materiały zasypowe podawane były do szybu za pomocą przenośnika zgrzeblowego (rys. 3a) usytuowanego na jego zrębie.

Po zrzuceniu przygotowanej partii materiału do szybu na określoną głębokość, pobierano próbę materiału zrzuconego za pomocą kubła stalowego o objętości 1,0 m³, (rys. 3b). Materiał wyciągnięty z kolumny szybowej, gromadzony był na zwalach w pobliżu wlotu szybu. Z tak przygotowanego materiału pobrane zostały próbki ogólne, które następnie zostały zapakowane do worków i przetransportowane do laboratorium GIG, w celu określenia ich skład granulometryczny.

Oznaczanie składów ziarnowych próbek materiałów zasypowych przed i po zrzuceniu do szybu Żeromski wykonano metodą analizy sitowej na podstawie PN-ISO 1953 za pomocą przesiewacza wielkolaboratoryjnego o ruchu posuwisto – zwrotnym (dla materiałów o uziarnieniu 63-31,5 mm) (rys. 4a) oraz wytrząsarki laboratoryjnej Analysette (dla materiałów o uziarnieniu < 31,5 mm) (rys.4b).

Po zważeniu próbek z kolejnych sit obliczono wychody poszczególnych klas ziarnowych jako ich procentowe udziały w masie badanej próbki z dokładnością do 0,1 % (wzór 1)

$$Y_i = (m_i \div m_s) \cdot 100\% \quad (1)$$

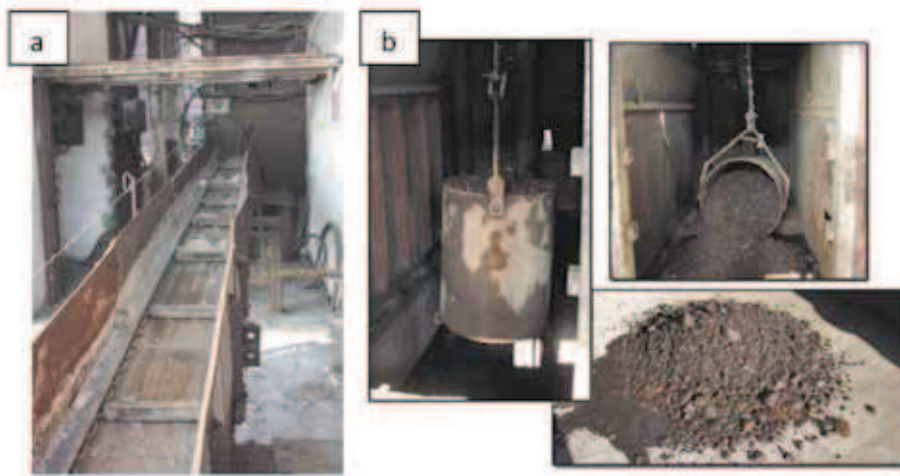
gdzie:

Y_i – wychód poszczególnych klas ziarnowych, %

m_i – masa próbki pozostałej na sicie, g

M_s – masa całkowita próbki, g

Na podstawie obliczonych wychodów poszczególnych klas ziarnowych wykreślono krzywe składu ziarnowego dla



Rys.3. Badania materiałów zasypowych w szybie Żeromski a) przenośnik zgrzeblowy do podawania materiałów do szybu, b) wyciągnięcie materiału zasypowego z szybu za pomocą stalowego kubła o pojemności 1 m³ [18]

Fig. 3. Tests of filling materials in shaft "Żeromski" a) Scraper conveyor for material feeding, b) Recovery of filling material from shaft by means of a 1-m³ steel bin [18]



Rys. 4. Badania laboratoryjne zmian uziarnienia materiałów zasypowych

a – przesiewacz wielkolaboratoryjny o ruchu posuwisto – zwrotnym b – wytrząsarka laboratoryjna Analysette

Fig. 4. Laboratory tests of changes of filling materials grain size

a) Stand for wet screening samples, b) Stand for grain size distribution analysis

zastosowanych w testach dołowych materiałów. Przykładowe wyniki badań składu ziarnowego dla: granitu i żuźla stalowniczego, zrzucanych do szybu na głębokości odpowiednio 190 m i 303 m, przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 5 i 6.

W celu ilościowej analizy zmian składu ziarnowego wskutek zrzucenia materiału do szybu wyznaczono współczynnik degradacji ziarnowej i_M , będący stosunkiem wielkości ziarn dominujących w danym materiale przed (D_M) i po jego zrzuceniu do szybu (d_M)

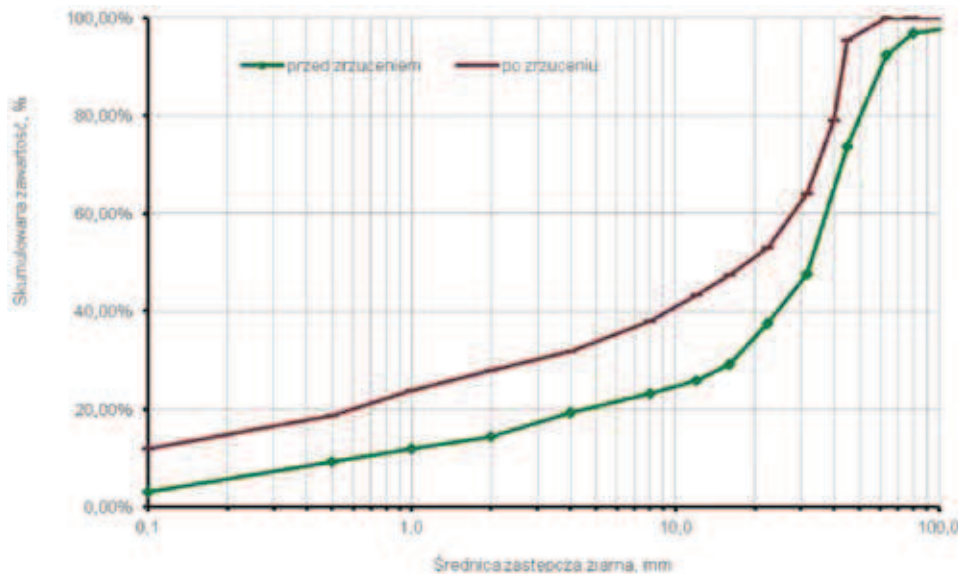
$$i_M = \frac{D_M}{d_M} \quad (2)$$

gdzie:

D_M – średnica zastępcza ziaren (mediana) charakteryzująca wielkość ziarna zastępczego, przy którym uzyskano 50 % sumy odsiewów (dla materiału przed zrzuceniem do szybu)

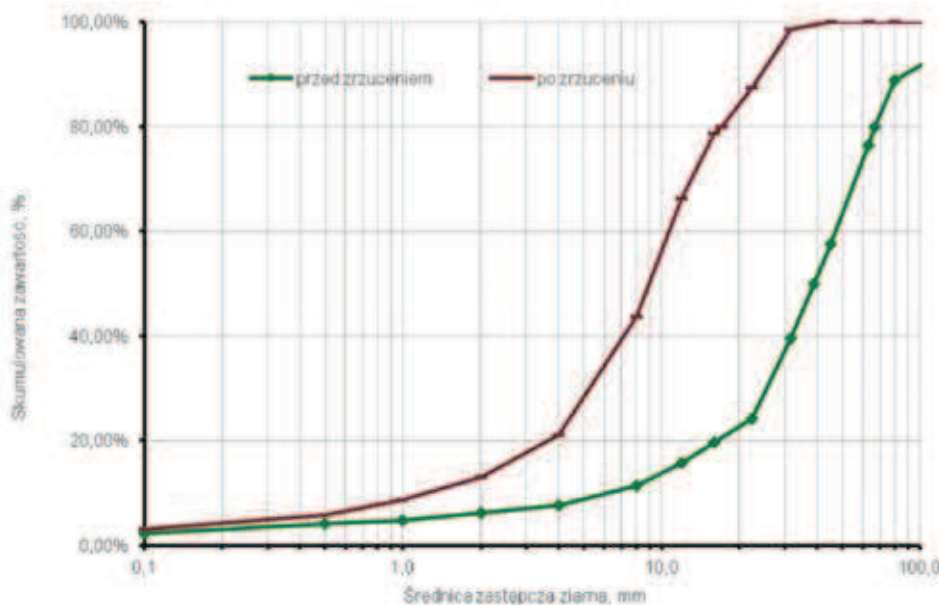
d_M – średnica zastępcza ziaren (mediana) charakteryzująca wielkość ziarna zastępczego, przy którym uzyskano 50 % sumy odsiewów (dla materiału po zrzuceniu do szybu)

Wyznaczone wartości średnicy zastępczej ziaren D_M oraz d_M i współczynników degradacji dla materiałów zasypowych zrzucanych do szybu Żeromski zebrano w tablicy 2.



Rys. 5. Krzywa składu ziarnowego dla granitu II przed i po zrzuceniu do szybu na głębokość 190 m

Fig. 5. Grain size distribution curve for granite II before and after dropping into the shaft at the depth of 190 m



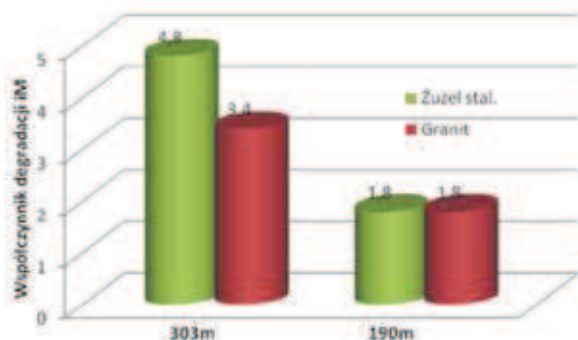
Rys. 6. Krzywa składu ziarnowego dla żuźla stalowniczego I przed i po zrzuceniu do szybu na głębokość 303 m

Fig. 6. Grain size distribution curve for metallurgical slag before and after dropping into the shaft at the depth of 303 m

Tablica 2. Wyznaczone wartości ziarna zastępczego D_M , d_M i współczynnika degradacji i_M dla żuźla stalowniczego i granitu
Table 2. Obtained values of median diameter D_M , d_M and degradation coefficient i_M for metallurgical slag and granite

Material	D_M mm	d_M mm	i_M -
Głębokość zrzutu 303 m			
Żużel stalowniczy I	44,0	9,1	4,8
Granit I	51,0	14,9	3,4
Głębokość zrzutu 190 m			
Żużel stalowniczy II	32,8	17,9	1,8
Granit II	33,0	18,0	1,8

Rysunek 7 przedstawia zależność współczynnika degradacji ziarnowej i_M od rodzaju materiału, dla prób dołowych przeprowadzonych w szybie Żeromski.



Rys. 7. Współczynnik degradacji ziarnowej żuźla stalowniczego i granitu zrzuconych do szybu Żeromski na głębokości 190 m i 303 m

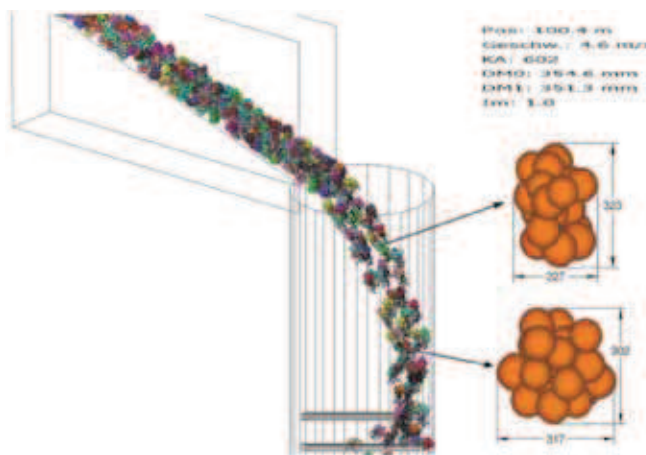
Fig. 7. Degradation coefficient for metallurgical slag and granite after dropping them into the shaft at the depth of 190 m and 303 m

Na podstawie przeprowadzonych testów dołowych stwierdzić można zależność między degradacją ziarnową materiału a głębokością zrzutu do szybu oraz początkową średnicą ziaren. Większa degradacja ziarnowa nastąpiła w przypadku zrzutów na głębokość 303 m. Największej degradacji ziarnowej uległy ziarna żuźla stalowniczego o średnicy zastępczej ziaren równej 44 mm, dla którego degradacja wynosiła 4,8. Dla granitu o nieco większej średnicy zastępczej ziaren równej 51 mm, przy zrzucie na tą samą głębokość, wartość degradacji wynosiła 3,4. W przypadku zrzutów na głębokość 190 m, wartość współczynnika degradacji wyniosła 1,8, zarówno dla granitu, jak i dla żuźla stalowniczego, przy porównywalnych zastępczych średnicach ziaren.

3. Badania numeryczne zmian współczynnika degradacji ziarnowej z wykorzystaniem programu PFC3D

Możliwości techniczne prowadzenia badań dołowych pozwoliły na wykonanie testów na dwóch głębokościach zrzutu: 190 m i 303 m. W celu odwzorowania zależności degradacji ziarnowej dla większych głębokości zrzutu przeprowadzone zostały uzupełniające badania modelowe z wykorzystaniem programu PFC3D. Doświadczenia z dotychczas prowadzonych likwidacji szybów wskazują, że na stopień degradacji ziaren może mieć wpływ obecność zbrojenia szybowego (na przykład dźwigarów, czy też przedziału drabinowego). Wcześniejsze badania z wykorzystaniem programu PFC3D wskazują, że istnieje możliwość przeprowadzenia badań modelowych pozwalających na analizę wpływu zbroje-

nia na zmiany składu ziarnowego materiału zasypowego z wykorzystaniem metod numerycznych [2, 3]. Program PFC3D, oparty na metodzie elementów dyskretnych, umożliwia odwzorowanie dynamicznego zachowania się modeli cząstkowych. Pozwala to na jego szerokie zastosowanie dla celów mechaniki górotworu i gruntów, obróbki materiałów i surowców mineralnych, mechaniki płynów i systemów wieloobiektowych. Podstawową różnicą w stosunku do metod ośrodka ciągłego jest możliwość pełnego obrotu, oderwania się bloków i powstawanie szczelin w procesie deformacji, czy też symulacja degradacji ziaren w procesie likwidacji szybu. We wcześniejszych badaniach numerycznych konglomeraty tworzone za pomocą połączeń równoległych, co zapewnia bardzo dobre odwzwierciedlenie degradacji materiału zasypowego (rys. 8). Połączenie równoległe umożliwia symulację „lepiszcza” między cząsteczkami, działającego niezależnie (równoległe) od połączenia kontaktowego (punktowego) z uwzględnieniem możliwości wystąpienia poślizgu. Połączenie to zapewnia przeniesienie między cząsteczkami zarówno sił, jak i momentów.



Rys. 8. Symulacja degradacji materiału zasypowego z wykorzystaniem konglomeratów tworzonych za pomocą połączeń równoległych [3]

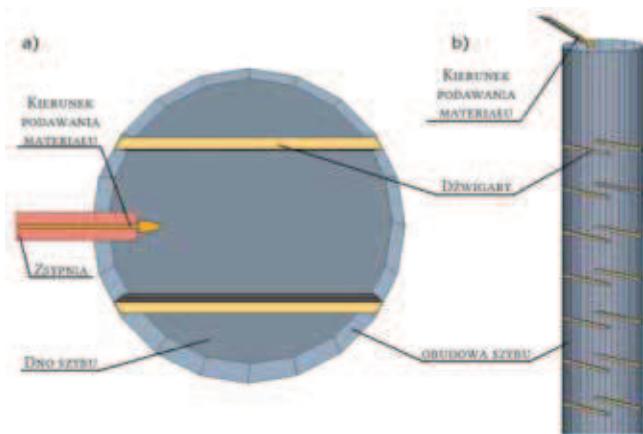
Fig. 8. Simulation of filling materials degradation by means of grain conglomerates formed by the use of parallel bonds [3]

Wadą budowania indywidualnych połączeń pomiędzy cząsteczkami jest jednak pracochłonność kalibracji modeli numerycznych oraz długi czas obliczeń, dlatego prezentowane obliczenia degradacji materiałów zasypowych przeprowadzono w uproszczony sposób. Materiał zasypowy tworzone generując pojedyncze ziarna i przypisując im odpowiednie własności materiałowe. Następnie, podczas wykonywania symulacji, monitorowano pozycję i prędkość każdego z ziaren w celu wykrycia kolizji z innymi ziarnami, obudową szybu

lub zbrojeniem. Specjalny podprogram napisany w języku wewnętrznym programu PFC3D (FISH) automatycznie zliczał każdą kolizję i na tej podstawie obliczano wartość współczynnika degradacji ziaren, przy czym punktem odniesienia były wartości degradacji określone na podstawie badań dołowych. Do obliczeń numerycznych wykorzystano opracowany w GIG program do generowania w programie PFC3D modeli szybu o zadanych parametrach [2]. Do podstawowych parametrów wprowadzanych przez użytkownika, należą:

- głębokość szybu,
- średnica szybu,
- konstrukcja zbrojenia (rozstaw i wielkość dźwigarów oraz pomostów spoczynkowych, rozmieszczenie dźwigarów względem osi szybu oraz względem podawania materiału zasypowego).

Badania numeryczne współczynnika degradacji ziarnowej prowadzono dla szybu o średnicy 5,6 m, wyposażonego w dźwigary w rozstawie co 3 m i kierunku podawania materiału do szybu równoległe do osi zabudowania dźwigarów. Odpowiadało to warunkom prowadzonych badań dołowych w szybie Żeromski (rys. 9.).



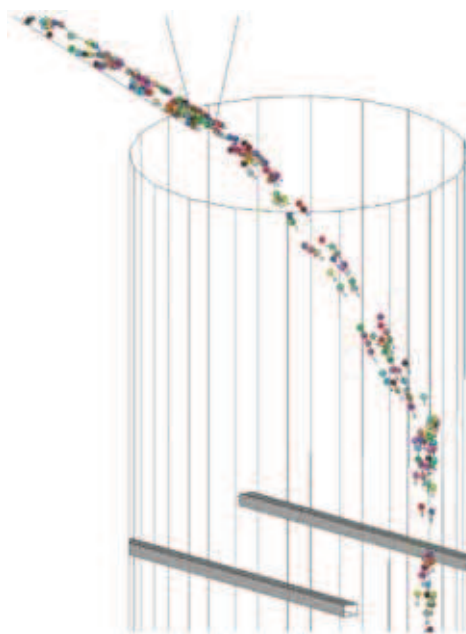
Rys. 9. Przyjęty do obliczeń model zbrojenia szybu a) widok z góry, b) widok z boku

Fig. 9. Numerical model of the shaft's steelwork a) Top view, b) Side view

W następnym kroku stworzono model numeryczny dla trzech materiałów zasypowych o różnych średnicach zastępczych ziaren i parametrach, które przedstawiono w tabelicy 3.

W dalszej kolejności symulowano zasypywanie szybu - materiał podawany był do szybu za pomocą rynny zsypanej (rys.10).

W pierwszym etapie symulację zasypywania szybu prowadzono dla głębokości 190 m i 303 m, co stanowiło bazę do kalibracji modeli. Na podstawie obliczonej liczby zderzeń ziaren oraz wartości degradacji danego materiału zasypowego uzyskanych z badań dołowych, prowadzono prognozę degra-



Rys. 10. Zrzut ekranu z przebiegu symulacji zasypywania szybu

Fig. 10. Screenshot of the backfilling simulation

dacji dla głębokości zrzutów 50, 100, 500 i 1000 m. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 11.

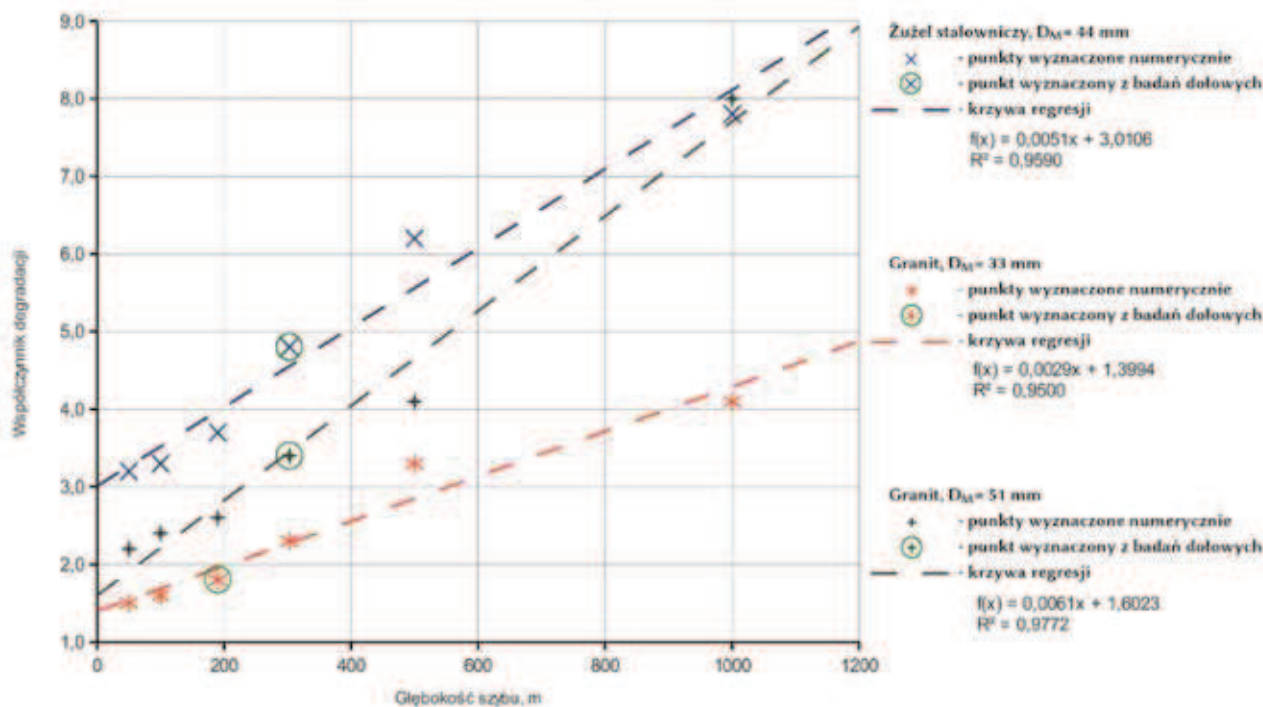
Z uzyskanych obliczeń numerycznych wynika wyraźna zależność między degradacją materiału i początkową średnicą ziaren. I tak na przykład dla głębokości zrzutu 1000 m, prognozowana wartość degradacji granitu II o średnicy zastępczej ziaren równej 33 mm wynosi 4,1, zaś dla granitu I o średnicy zastępczej ziaren równej 51 mm prognozowana degradacja wynosi 8,0. Świadczy to o istotnym wpływie początkowego uziarnienia materiału na stopień jego degradacji – im mniejsze ziarna początkowe materiału, tym mniejsza dynamika wzrostu stopnia jego degradacji. Uziarnienie nie jest jednak jedyną własnością materiału zasypowego decydującą o skłonności do jego degradacji. W przypadku żuźla stalowniczego I o uziarnieniu pośrednim (średnica zastępcza ziaren wynosząca 44 mm) zaobserwowano degradację wyższą niż dla granitu I o średnicy zastępczej ziaren równej 51 mm. Jest to zgodne z wynikami prowadzonych badań dołowych i laboratoryjnych, które wykazały, że o degradacji materiału decyduje również jego rodzaj.

Wcześniejsze badania [2, 3, 13] wykazały, że w przypadku szybów bez zbrojenia, niezależnie od głębokości szybu, powyżej pewnej głębokości krytycznej nie występuje dalsze zwiększanie energii kinetycznej ziaren i w związku z tym degradacja materiału zasypowego nie wzrasta liniowo wraz z głębokością szybu. W przypadku likwidacji szybów wyposażonych na przykład w dźwigary, założenie to nie jest

Tablica 3. Parametry materiałów zasypowych przyjęte do obliczeń

Table 3. Properties of filling material

Parametr			Wartość parametru dla materiału o własnościach		
Nazwa	Symbol	Jedn.	żuźla stalowniczego I	granitu I	granitu II
Zastępcza średnica ziaren	D_M	mm	44	33	51
Moduł Younga	E	MPa	20 000	30 000	30 000
Ciężar właściwy	γ	kg/m ³	2200	2300	2300
Sztywność normalna	k^n	MPa/m	880	990	1 530
Sztywność styczna	k^s	MPa/m	880	990	1 530



Rys. 11. Zmiany współczynnika degradacji ziarnowej wybranych materiałów zasypowych w zależności od głębokości zrzutu do szybu

Fig. 11. Changes in the degradation coefficient of selected filling materials depending on the heights of drop

prawdziwe. W szybie bez zbrojenia ziarna w chwili uderzenia posiadały wyższą energię kinetyczną, jednak droga hamowania ziaren uderzających o dno szybu pokryte luźnymi okruskami skalnymi wydłuża się i spora część energii ulega rozproszeniu. Powoduje to, że pomimo wysokiej energii kinetycznej w niektórych przypadkach siła uderzenia (będąca iloczynem energii kinetycznej oraz długości drogi hamowania) nie osiąga wartości krytycznej i nie następuje zniszczenie ziaren. W przypadku uderzeń o stalowe elementy zbrojenia szybu, droga hamowania jest niezwykle krótka, zatem siła uderzenia powodująca zniszczenie ziaren osiąga wartość graniczną nawet przy stosunkowo niewielkiej energii kinetycznej [3]. Uzyskane z przedstawionych obliczeń numerycznych wyniki (rys. 11) wskazują, że wraz ze zwiększającą się głębokością zrzutu liniowo rosła wartość degradacji materiału zasypowego. Wynika to z występowania znacznej liczby uderzeń ziarna o kolejne, regularnie rozmieszczone zbrojenie szybu. Należy jednak zwrócić uwagę na ograniczenia przedstawionego uproszczonego sposobu numerycznego szacowania degradacji, w którym analizowane ziarna pomimo uderzeń nie dzielą się na fragmenty, zaś degradacja szacowana jest w sposób pośredni na podstawie liczby zderzeń. W rzeczywistości skutek uderzeń, ziarna materiału dzielą się na fragmenty – a zatem zwiększa się liczba ziaren drobnych w porównaniu do materiału wyjściowego, co – jak wykazano wcześniej – ma wpływ na jego skłonność do degradacji. A zatem wraz z postępującym rozdrobnieniem materiału zmniejszać się będzie dynamika jego degradacji. Przypuszczalnie zatem należy, że dla szybów o dużej głębokości (np. 1000 m), uzyskiwane tą metodą wyniki będą wskazywać zawyżone wartości degradacji materiału. Niemniej jednak należy zauważyć, że pomimo tak uproszczonego sposobu obliczania degradacji, doświadczenia uzyskane z badań dołowych i laboratoryjnych wskazują, że otrzymane wyniki mieszczą się w zakresie spodziewanych wartości. Istotną zaletą przedstawionej metody jest możli-

wość szybkiego oszacowania stopnia degradacji dowolnego materiału zasypowego z uwzględnieniem jego podstawowych własności (takich jak ciężar właściwy, moduł Younga, współczynnik tarcia, skład ziarnowy) oraz konstrukcji zbrojenia szybu (rozstaw i wielkość dźwigarów oraz pomostów spoczynkowych, rozmieszczenie dźwigarów względem osi szybu oraz względem podawania materiału zasypowego).

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ostatnich latach przez pracowników GIG w zakresie degradacji materiałów stosowanych dla likwidacji szybów górniczych. Zmiana składu ziarnowego, jaka następuje podczas zrzucenia określonego materiału do szybu, może decydować o parametrach filtracyjnych, a w konsekwencji o bezpieczeństwie realizacji całego procesu likwidacji szybów, jak również wpływać istotnie na stateczność terenu wokół szybu po zakończeniu jego likwidacji.

Przeprowadzone badania w likwidowanym szybie Żeromski oraz badania laboratoryjne w GIG, wskazują, że wpływ na degradację materiałów zasypowych z uwagi na jego zrzucanie do szybu posiada uziarnienie początkowe, rodzaj materiału i głębokość zrzutu. Z uwagi na koszty oraz dużą czasochłonność, badania w szybie Żeromski przeprowadzono tylko dla dwóch głębokości zrzutu tj. 190 m i 303 m. W celu dokładnej oceny wpływu głębokości na zmianę uziarnienia materiału wykonano obliczenia numeryczne w programie PFC3D. Wyniki analiz numerycznych umożliwiły ocenę stopnia degradacji dla głębokości zrzutu od 0 do 1000 m. Wskazały na wzrost degradacji wraz ze wzrostem głębokości, przy czym wzrost ten jest zależny od rodzaju materiału i uziarnienia początkowego, na co wskazały już wcześniejsze badania dołowe.

Literatura

1. *Andrusikiewicz W.*: Dobór materiału zasypowego dla potrzeb likwidacji wyrobisk szybowych. Materiały Konferencyjne Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 2001, str. 373÷384.
2. *Bock S. i in.*: Analiza numeryczna wpływu zbrojenia szybowego na zmiany składu ziarnowego materiału zasypowego w procesie likwidacji szybu. Dokumentacja pracy statutowej nr 11110922 - 153 2012 [niepublikowana]
3. *Bock S.*: Impact of shaft steelwork on grain size distribution of filling material during shaft closure. *Engineering Structures* (2015), pp. 102-119. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.11.024
4. *Bromek T., Bukowski P.*: Ocena przepuszczalności materiałów zasypowych używanych do likwidacji szybów kopalnianych. *Przeгляд Górnicy*, T.58 (11), 2002 str.18÷23
5. *Cempiel E.*: Wyznaczenie natężenia przepływu wody i przepuszczalność materiału zasypowego w likwidowanych szybach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Seria: Górnictwo, z. 260, 2004, str. 57-67.
6. *Cempiel E., Konior J.*: Zmiany przepuszczalności zasypu podczas podszadzenia zawodnionego szybu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Seria: Górnictwo, z. 261, 2004 str.111÷115.
7. *Chudek M. i in.*: Materiały w budownictwie geotechnicznym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, T.III, 2001
8. *Ciganek J. i in.*: Problematyka technicznej likwidacji jam hlbinnych bani. Podziemne skarby. Zbornik referatów Ostrawa 1994.
9. *Ciganek J. i in.*: Technika studiu likwidacji jam. Prace Katedry Horniekiego a Ekologickeho Stawitelstwi. HSC 893/1993.
10. *Czaja P., Kohutek Z.*: Konstrukcyjne aspekty likwidacji szybów. VI Sympozjum – Wybrane problemy eksploatacji złóż na dużych głębokościach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Gliwice 1994.
11. *Czaja P.*: Ocena rozwiązań projektowych likwidacji szybów zastosowanych w procesie restrukturyzacji polskiego górnictwa węglowego. *Górnictwo i Geoinżynieria*. Zeszyt 3/1, Rok 33, 2009.
12. *Czaja P.*: Technologia likwidacji szybów oraz ich infrastruktury podziemnej i powierzchniowej. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
13. *Frolik A., Rogoż M.*: Zagęszczenie zasypu w trakcie likwidacji szybu. *Przeгляд Górnicy*. T. 62(3), 2006 str. 27÷33.
14. *Gierenz S.*: Verfüllung stillgelegten Schachten. Karli und Salz AG. Kali und Steinsalz nr 7-8 1990.
15. *Kleta H.*: Zasady oceny bezpieczeństwa szybów i ich odporność na oddziaływania górnicze. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2013
16. *Patzke D., Schneider M.*: Inertsierung beim Verfüllen tiefer Tagesschachte, Glückauf 127, Nr 7/8 1991.
17. *Plewa F., Kleta H.*: „Analiza możliwych koncepcji likwidacji szybów z uwzględnieniem zagrożeń naturalnych i uwarunkowań powierzchniowych w świetle bezpieczeństwa powszechnego wraz z realizacją zadania pt: Projekt techniczny likwidacji szybu „FORTUNA I” wraz z opracowaniem technologii prowadzenia prac oraz kosztorysu inwestorskiego” Fundacja „Nauka I Tradycje Górnicze”, 2005
18. *Prusek S., Bock S., Szymala J., Catus Moszko J.*: *Underground and laboratory tests of filling materials used for shafts closure*– 3rd International Conference on Shaft Design and Construction, London 2012.
19. *Prusek S., Bock S.*: New method to feed filling materials into shafts with directing tubular tanks. In Conference Proc., vol. III of 14th GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, 17-26 June, 2014, Bulgaria
20. *Prusek, Catus Moszko J., Bukowski P.*: Laboratory tests of filtration coefficient of selected materials used in liquidating shafts in collieries, *Journal of Mining Science*, Vol.50, No.2, 2014 s. 265÷276.
21. *Stalega S. i in.*: Zasady likwidacji szybów i wyrobisk przyszybowych w kopalniach węgla kamiennego. Poradnik techniczny. GIG Katowice – Seria: Instrukcja nr 6 1997.
22. *Stobiński J.*: Likwidacja szybów, *Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie*, nr 3 1992.