

MARIAN BROŻEK*, EWA ORUBA-BROŻEK**, ANNA NOWAKOWSKA***

Wpływ związków powierzchniowo czynnych na wyniki rozdrabniania ziaren dolomitu

Wprowadzenie

Mechaniczna destrukcja ziarna mineralnego bez względu na sposób rozdrabniania polega na zniszczeniu wewnętrznej struktury ziarna. Rozpatrując tę strukturę na poziomie siatki krystalicznej widzimy, że jej zniszczenie prowadzi do rozerwania wiązań atomowych w kryształach, których siła jest zależna od rodzaju wiązań. W związku z tym teoretyczna wytrzymałość ziarna na rozciąganie jest zależna od struktury siatki krystalicznej i rodzaju wiązań atomowych w kryształach i wyraża się przybliżonym wzorem (Cottrell 1964):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\gamma E}{e}} \quad (1)$$

gdzie:

- γ – swobodna powierzchniowa energia właściwa,
- E – moduł Younga,
- e – stała translacyjna sieci krystalicznej.

Dla przykładu, wytrzymałość teoretyczna kryształu soli kuchennej NaCl jest równa około 10^5 MPa. Podczas gdy doświadczalnie wyznaczona wytrzymałość mieści się w przedziale 10–100 MPa (Wnuk 1977).

* Prof. dr hab., ** Dr inż., *** Mgr inż., Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, e-mail: brozek@agh.edu.pl

Doświadczenie pokazuje więc, że rzeczywista wytrzymałość ziaren mineralnych na rozciąganie jest 2 do 4 rzędów wielkości mniejsza od wytrzymałości teoretycznej wynikającej z rozerwania wiązań atomowych w kryształach, wyrażonej wzorem (1). Zatem z punktu widzenia procesu rozdrabniania struktura ziarna mineralnego jest uwarunkowana obecnością innego czynnika (ponad strukturą krystaliczną), którego istnienie określa rzeczywistą wytrzymałość ziarna. Tym czynnikiem są wrodzone mikropęknięcia (wady struktury), wokół których koncentrują się naprężenia przy rozciąganiu obniżając wytrzymałość ziarna na rozciąganie.

Hipoteza istnienia wrodzonych mikropęknięć została wysunięta przez Griffitha, który podał wzór na wytrzymałość ciała stałego, osłabionego obecnością soczewkowatej mikroszczeliny o długości $2l$ (Griffith 1921):

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} \quad (2)$$

Liczba mikroszczelin jak i ich rozmiar są zmiennymi losowymi, w związku z czym wytrzymałość ziarna na rozciąganie jest zmienną losową o rozkładzie Weibulla; jego dystrybuanta wyraża się następującym wzorem (Weibull 1951):

$$P = 1 - \exp \left[-r \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^m \right] \quad (3)$$

gdzie:

m – moduł Weibulla,

σ_s – średnia wartość wytrzymałości ziaren w próbce,

r – stała związana z modułem Weibulla poprzez funkcję gamma:

$$r = \Gamma^m \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (4)$$

Parametry rozkładu: m i σ_s wyznaczone są z próbki. Ich wartości są zależne od rodzaju materiału, jak i od wcześniejszej historii próbki. Przez uprzednią historię próbki rozumie się wszelkie działania zmierzające do uaktywnienia istniejących lub wygenerowanie nowych mikroszczelin, których liczba i wielkość wpływa na wytrzymałość ziarna. Takimi działaniami mogą być: szok termiczny, fala sejsmiczna, obróbka związkami powierzchniowo-czynnymi.

Wytrzymałość ziarna, jak widać ze wzoru (2), jest zależna od stanu energetycznego powierzchni, charakteryzowanego przez wartość swobodnej energii powierzchniowej γ . Wartość energii powierzchniowej można zmieniać przez dodatek związków powierzchniowo-czynnych (ZPC) adsorbowanych na powierzchni ziarna. Zmienia się wtedy wytrzymałość ziarna na rozciąganie.

Adsorpcja ZPC może mieć charakter adsorpcji fizycznej lub chemicznej w zależności od pH roztworów wodnych ZPC. Używany w tej pracy oleinian sodu jest związkiem anionowym używanym jako kolektor dla minerałów typu soli. Przy niskich wartościach pH adsorpcja oleinianu jest adsorpcją fizyczną, natomiast przy wysokich pH adsorpcją chemiczną.

Jak wskazują wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie w zależności od rodzaju związku (Brożek 2003), woda jest związkiem, który w znaczący sposób obniża wytrzymałość na rozciąganie ziaren porfiru. Wynika to z dużej wartości przenikalności dielektrycznej wody, a więc i dużego elektrycznego momentu dipolowego cząsteczki wody, od którego zależy siła przyciągania cząsteczki do elektrycznie naładowanego ziarna (Vutukuri, Heins 1972). Z tego względu w badaniach zastosowano również wodę w charakterze ZPC.

Działanie ZPC polega na wnikaniu molekuł związku do wnętrza mikroszczeliny, mającej kształt klina i neutralizacji działania sił kohezji pomiędzy powierzchniami wewnętrznymi klina, nie dopuszczając tym samym do zwarcia mikroszczeliny. Prowadzi to ponadto do zwiększenia wymiarów mikroszczeliny, przez co uzyskują one wymiary na tyle duże, aby przy określonym obciążeniu znaleźć się w grupie mikroszczelin aktywnych czyli tych, które inicjują proces pęknięcia ziarna.

Z teorii wytrzymałości wynika, że jednoosiowemu ścisaniu ziarna towarzyszą naprężenia rozciągające, powstające w płaszczyźnie równoległej do kierunku przyłożenia obciążenia oraz naprężenia ścinające w płaszczyznach nachylonych pod pewnymi kątami do kierunku przyłożenia obciążenia (Sokołowski 1990).

Wieloletnie obserwacje procesu dezintegracji nieregularnych ziaren podczas ściskania (Brożek 1996a, b) doprowadziły do stwierdzenia, że za powstawanie dużych ziarn odpowiedzialne są naprężenia rozciągające, natomiast małe ziarna o spłaszczonych kształtach powstają dzięki naprężeniom ścinającym w otoczeniu punktu przyłożenia obciążenia.

Dla ciała o regularnym kształcie (kostki sześciennego) naprężenie ścinające w przekroju odchylonym o kąt ϑ od kierunku przyłożenia obciążenia ściskającego wyraża się wzorem (Sokołowski 1990):

$$\tau = \frac{\sigma(1+\nu)}{2} \sin 2\vartheta \quad (5)$$

gdzie:

- ν – liczba Poissona,
- σ – naprężenie rozciągające.

Wielkość powstających odprysków z danego ziarna sześciennego będzie więc zależna od kąta ϑ oraz od rozkładu wytrzymałości na ścinanie w objętości ziarna. Przy ścisaniu próbki ziarn w kształcie kostki na rozkład wielkości odprysków będzie miał wpływ również rozkład wytrzymałości na rozciąganie w próbce.

W przypadku dużych ziaren powstających przy zgniataniu, których źródłem są naprężenia rozciągające, w momencie zniszczenia ziarna pierwotnego powstają na ogół dwa fragmenty o nierównych wielkościach. Jest to uwarunkowane rozkładem lokalnej wytrzymałości w objętości ziarna, która w myśl koncepcji najsłabszego ogniwa determinuje wytrzymałość ziarna na rozciąganie. Wielkość tworzonych ziaren z próbki ziaren pierwotnych, będzie więc funkcją przestrzennego rozkładu wytrzymałości lokalnej w próbce oraz rozkładu minimalnej wartości tej wytrzymałości w próbce.

Można więc powiedzieć, że ZPC zmieniając wytrzymałość ziarna na rozciąganie zmieniają pośrednio również wytrzymałość na ścinanie. Wpływają więc na energię powstawania ziaren dużych jak i drobnych.

1. Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono na ziarnach dolomitu o wielkościach z przedziału 25–31,5 mm. Z klasy tej wydzielono losowo trzy próbki o liczności ponad 100 ziaren każda. Uprzednio z populacji, z której losowano próbki, odrzucono ziarna płaskie i wydłużone.

Pojedyncze ziarna każdej próbki ściskano na prasie aż do momentu pęknięcia ziarna. W każdym przypadku rejestrowano wartość siły niszczącej.

Pierwszą próbkę ziaren zgniatano bez uprzedniej obróbki ZPC. Dwie kolejne próbki przed zgniataniem, na okres jednej doby, zanurzono odpowiednio w wodzie destylowanej i 0,5% roztworze wodnym oleinianu sodu. Cały przedział wartości siły niszczącej, dla każdej próbki oddzielnie, podzielono na kilka wąskich klas siły. Dla każdej klasy siły wyliczono wychód ziaren w danej klasie siły (p_i), wartość średnią naprężenia niszczącego ($\langle\sigma\rangle$) oraz skład ziarnowy produktu rozdrabniania każdej próbki ziaren (F). Wyniki tych pomiarów posłużyły do wyliczenia wartości średniej wytrzymałości ziaren w próbce σ_s , wyznaczenia rozkładu wytrzymałości lub inaczej prawdopodobieństwa rozdrabniania oraz rozkładu wielkości ziaren produktu rozdrabniania.

2. Opracowanie wyników

2.1. Rozkład wytrzymałości

Wyniki wykonanych analiz i pomiarów zamieszczono w tabelach 1–3. W poszczególnych kolumnach, odnoszących się do klas nacisku przedstawione są wychody masowe klas ziarnowych, mierzone w [g]. Wartość wytrzymałości na rozciąganie wyliczono z następującego wzoru:

$$\sigma = \frac{Q}{D^2} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

gdzie:

Q – siła niszcząca [N],

D – średnia wielkość ziarna przed zgniataniem [m].

Wielkość średnia ziarna przed zgniataniem jest średnią arytmetyczną dolnej i górnej granicy klasy, czyli $D = 0,02825$ [m]. Wychód ziaren w danej klasie siły (p_i), który jest jednocześnie rzędną funkcji gęstości rozkładu wytrzymałości ziarna liczy się ze wzoru:

$$p_i = \frac{\Sigma_1}{M}$$

gdzie:

Σ_1 – masa ziaren w danej klasie siły niszczącej,

M – całkowita masa próbki.

TABELA 1

Wyniki rozdrabniania próbki ziaren dolomitu bez uprzedniej obróbki ZPC

TABLE 1

The results of crushing of dolomite particles without treatment with SAC

Q [kN]	< 2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-10	> 10	Σ_2	γ [%]	F [%]
Klasa[mm]												
25-31,5	81	27,6	98,6	122,8	155,0	59,4	36,0	0	0	580,4	19,0	100
20-25	53	238,8	195,8	215,2	143,4	118,2	90,8	58,0	48,0	1161,2	38,02	81,0
18-20	15	92,8	130,0	51,0	56,6	23,8	10,0	23,0	0	402,2	13,17	42,99
16-18	11	17,4	35,0	19,6	28,8	35,6	6,6	10,4	8,4	172,8	5,66	29,82
10-16	30	78,0	80,2	78,0	53,6	49,6	16,6	16,0	11,8	413,8	13,55	24,16
8-10	2,5	11,04	10,4	8,6	10,0	7,2	2,0	7,6	5,2	64,9	2,13	10,61
4-8	5,1	25,8	19,2	30,2	16,6	15,0	6,0	9,0	5,8	132,7	4,34	8,48
< 4	7,2	20,6	22,0	23,6	16,8	18,2	6,0	7,4	4,6	126,4	4,14	4,14
Σ_1	204,8	512,4	591,2	549	480,8	327,0	174	131,4	83,8	3054,0		
p_i	0,067	0,1676	0,1936	0,1798	0,1574	0,1071	0,057	0,043	0,0274			
$\Sigma p_i = P$	0,067	0,2346	0,4282	0,608	0,7654	0,8725	0,9295	0,9725	1,0			
σ [MPa]	2,07 2,51	2,51 3,76	3,76 5,01	5,01 6,27	6,27 7,52	7,52 8,77	8,77 10,02	10,02 12,53	12,53 14,03			
$\langle \sigma_i \rangle$	2,29	3,135	4,385	5,64	6,895	8,145	9,395	11,275	13,28			
$\langle \sigma_i \rangle / \sigma_s$	0,355	0,486	0,68	0,874	1,07	1,236	1,457	1,748	2,059			
											$M = 3054$ [g]	$\sigma_s = 6,45$ [MPa]

TABELA 2

Wyniki rozdrabniania próbki ziaren dolomitu po obróbce wodą destylowaną

TABLE 2

The results of crushing of dolomite particles after treatment with distilled water

Q [kN]	< 2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7	Σ_2	γ [%]	F [%]
Klasa[mm]										
25-31,5	16,0	173,8	142,0	64,8	42,8	98,6	23,2	561,2	21,90	100
20-25	30,6	216,6	196,6	146,4	112,8	75,2	12,6	790,5	30,85	78,1
18-20	12,8	54,4	92,8	40,4	23,8	39,6	8,0	271,8	10,61	47,25
16-18	28,4	73,2	69,8	51,2	16,4	44,6	17,6	301,2	11,76	36,64
10-16	24,2	90,2	48,4	79,4	56,4	24,6	17,0	340,2	13,28	24,88
8-10	4,4	17,8	21,8	6,0	7,0	4,6	5,8	77,4	3,02	11,60
4-8	9,0	31,8	26,4	22,8	3,8	8,8	7,8	110,4	4,31	8,58
<4	8,2	29,4	22,6	24,6	7,6	9,2	7,8	109,4	4,27	4,27
Σ_1	133,6	687,2	620,4	445,6	270,6	304,9	99,8	2562,1		
p_i	0,0521	0,2682	0,2421	0,1739	0,1056	0,1190	0,039	$M = 2562,1$ [g] $\sigma_s = 5,07$ [MPa]		
$\Sigma p_i = P$	0,0521	0,3203	0,5621	0,736	0,8416	0,9606	100			
σ [MPa]	2,07 2,51	2,51 3,76	3,76 5,01	5,01 6,27	6,27 7,52	7,52 8,77	8,77 10,27			
$\langle \sigma_i \rangle$	2,29	3,135	4,385	5,64	6,895	8,145	9,52			
$\langle \sigma_i \rangle / \sigma_s$	0,452	0,618	0,865	1,112	1,36	1,607	1,878			

Skumulowany wychód ziaren w kolejnych klasach siły nacisku niszczącego, czyli $\Sigma p_i = P$ liczony w stosunku do całej masy próbki ziaren, przedstawia prawdopodobieństwo rozdrobnienia lub dystrybuantę rozkładu wytrzymałości ziaren. Symbolem $\langle \sigma \rangle$ oznaczono średnią arytmetyczną wytrzymałości w danej klasie siły nacisku. Do danych empirycznych dopasowano dystrybuantę modelową wyrażoną wzorem (3). Wyliczone metodą najmniejszych kwadratów zależności modelowe są następujące:

a) ziarna bez obróbki

$$P = 1 - \exp \left[-1,16 \left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_s} \right)^{2,366} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_s = 6,45 \text{ MPa}$$

TABELA 3

Wyniki rozdrabniania próbki ziaren dolomitu po obróbce 0,5% roztworem oleinianu sodu

TABLE 3

The results of crushing of dolomite particles after treatment with 0.5% oleate solution

Q [kN]	< 2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	>7	Σ_2	γ [%]	F [%]
Klasa[mm]										
25-31,5	31,4	149,2	181,4	135,2	104,0	70,6	57,8	729,6	27,22	100
20-25	116,6	91,0	218,6	120,0	200,2	118,6	45,2	910,2	33,96	72,77
18-20	40,4	23,8	90,2	47,0	61,2	15,0	42,6	320,2	11,95	38,81
16-18	28,6	40,0	38,8	37,0	46,4	12,6	17,8	221,2	8,25	26,86
10-16	25,6	36,4	65,8	75,4	6,0	12,8	33,0	255,0	9,51	18,61
8-10	6,8	14,0	5,6	17,4	13,6	3,2	2,6	63,2	2,36	9,10
4-8	8,0	17,6	14,8	18,0	23,4	4,8	6,2	92,8	3,46	6,75
<4	8,4	10,8	18,4	16,4	18,6	5,8	9,4	87,8	3,28	3,28
Σ_1	265,8	382,8	633,6	466,4	473,4	243,4	214,6	2680		
p_i	0,099	0,1428	0,2364	0,174	0,1766	0,091	0,08	$M = 2680$ [g] $\sigma_s = 5,42$ [MPa]		
$\Sigma p_i = P$	0,099	0,2418	0,4782	0,6522	0,8288	0,9198	1			
σ [MPa]	2,07 2,51	2,51 3,76	3,76 5,01	5,01 6,27	6,27 7,52	7,52 8,77	8,77 10,53			
$\langle \sigma_i \rangle$	2,29	3,135	4,385	5,64	6,895	8,145	9,65			
$\langle \sigma_i \rangle / \sigma_s$	0,42	0,58	0,81	1,04	1,27	1,50	1,78			

b) ziarna po obróbce wodą destylowaną

$$P = 1 - \exp \left[-0,896 \left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_s} \right)^{2,514} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_{szpc}}{6,45} = 0,79 \quad \sigma_s = 5,07 \text{ MPa}$$

c) ziarna po obróbce oleinianem

$$P = 1 - \exp \left[-0,98 \left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_s} \right)^{2,466} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_{szpc}}{6,45} = 0,84 \quad \sigma_s = 5,42 \text{ MPa}$$

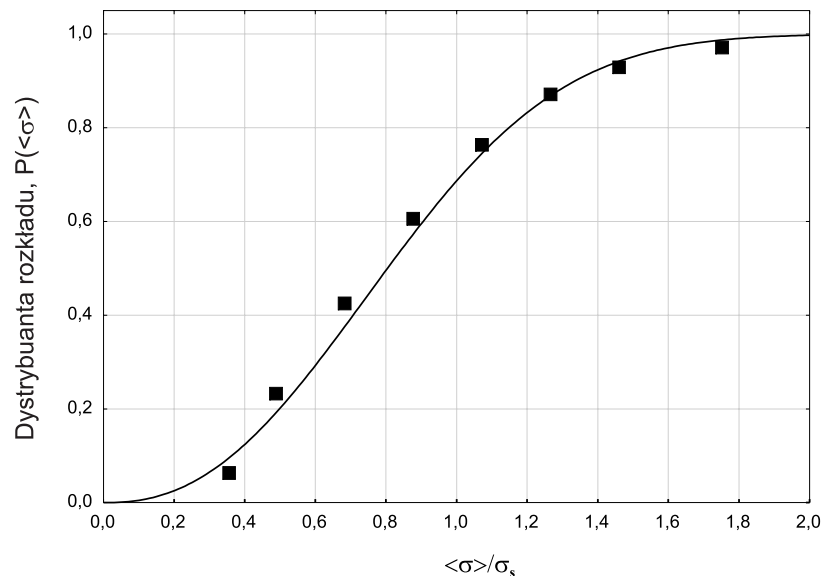
Wartość średnią wytrzymałości ziaren w próbce wyliczono według następującego wzoru:

$$\sigma_s = \sum_i p_i \langle \sigma_i \rangle$$

Na rysunkach 1–3 wykreślono dystrybuanty modelowe oraz naniesiono punkty doświadczalne. Jak widać z tych rysunków zależności modelowe dobrze zgadzają się z wartościami doświadczalnymi. Indeks korelacji krzywoliniowej jest większy od 0,95. Można więc powiedzieć, że rozkład Weibulla dobrze aproksymuje rozkład wytrzymałości nieregularnych ziaren mineralnych.

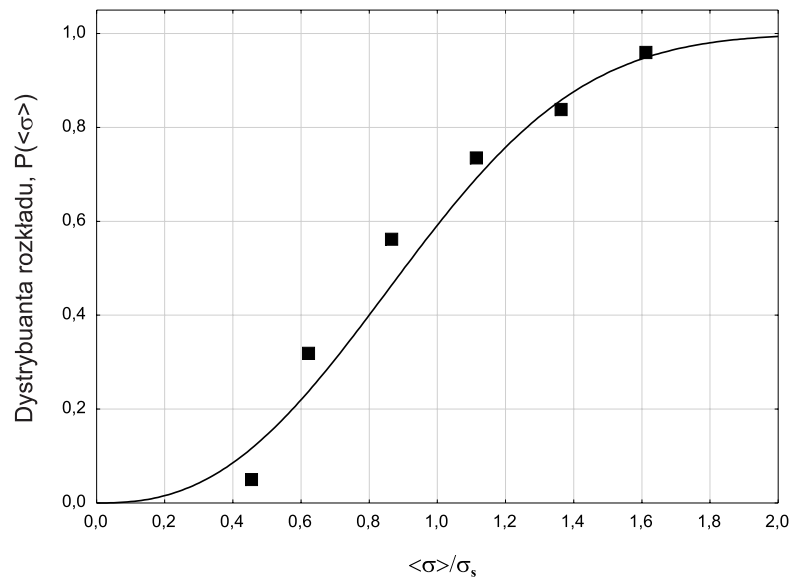
Po wzorach (7)–(9) podano wartości średniej wytrzymałości na rozciąganie σ_s oraz stosunek $\sigma_{szpc}/6,45$, czyli średniej wytrzymałości ziaren po obróbce ZPC do wytrzymałości średniej ziaren bez obróbki ($\sigma_s = 6,45 \text{ MPa}$).

Jak widać z tych danych we wszystkich przypadkach następuje spadek wytrzymałości ziarna po obróbce ZPC. Największy spadek wytrzymałości ziarna uzyskuje się po obróbce wodą destylowaną (ponad 20%). Według Westbrooka (1966) woda jest tym odczynnikiem, który najlepiej obniża właściwości wytrzymałościowe ciał niemetalicznych. Zważywszy na to, że energia zużywana na zniszczenie ziarna jest proporcjonalna do kwadratu wytrzymałości, obniżenie wytrzymałości zmniejsza zużycie energii. Po obróbce wodą destylowaną zmniejszenie zużycia energii wynosi około 36%.



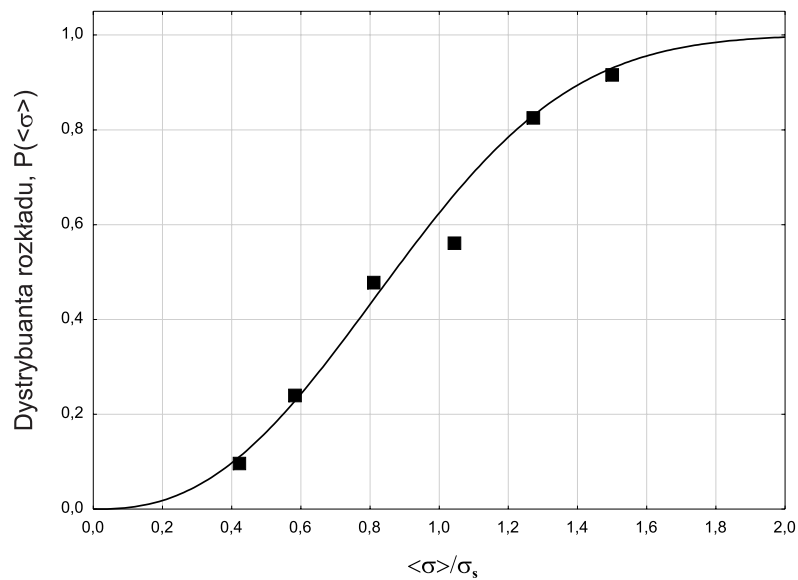
Rys. 1. Dystrybuanta rozkładu wytrzymałości ziaren dolomitu bez uprzedniej obróbki ZPC

Fig. 1. Cumulative distribution function of tensile strength of dolomite particles without treatment with SAC



Rys. 2. Dystrybuanta rozkładu wytrzymałości ziaren dolomitu po uprzedniej obróbce wodą destylowaną

Fig. 2. Cumulative distribution function of tensile strength of dolomite particles after treatment with distilled water



Rys. 3. Dystrybuanta rozkładu wytrzymałości ziaren dolomitu po uprzedniej obróbce 0,5% roztworem oleinianu sodu

Fig. 3. Cumulative distribution function of tensile strength of dolomite particles after treatment with 0.5% oleate solution

2.2. Krzywe składu ziarnowego produktu rozdrabniania

Na podstawie dotychczasowych badań nad elementarnym procesem rozdrabniania pojedynczych ziaren przez zgniatanie (Brożek, Tumidajski 1996b) można stwierdzić, że skład ziarnowy produktu rozdrabniania (dystrybuantę rozkładu wielkości ziaren) można z bardzo dobrym przybliżeniem aproksymować następującą funkcją:

$$F(x) = ax^b e^{cx} \quad (10)$$

gdzie:

- $x = \frac{d}{D}$, d – wielkość ziaren produktu rozdrabniania,
 D – wielkość średnia ziaren nadawy,
 a , b , c – parametry rozkładu.

Aproksymowane powyższą funkcją równania krzywych składu ziarnowego, dla całych próbek 100 ziaren są następujące:

a) ziarna bez obróbki

$$F(x) = 5,488x^{0,364} e^{3,03x} \quad (11)$$

$$\bar{d} = 19,68 \text{ mm} \quad \sigma_s = 6,45 \text{ MPa} \quad m = 2,366$$

b) ziarna po obróbce wodą

$$F(x) = 8,38x^{0,547} e^{2,618x} \quad (12)$$

$$\bar{d} = 19,48 \text{ mm} \quad \sigma_s = 5,07 \text{ MPa} \quad m = 2,514$$

c) ziarna po obróbce oleinianem

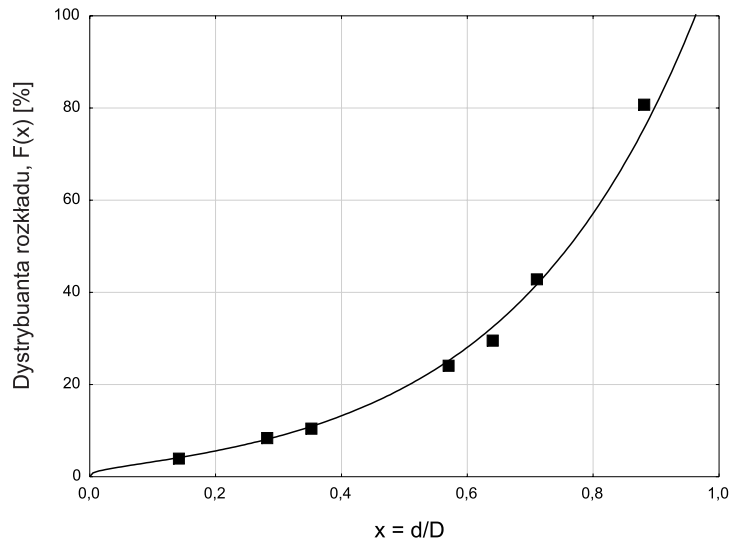
$$F(x) = 4,136x^{0,353} e^{3,237x} \quad (13)$$

$$\bar{d} = 20,72 \text{ mm} \quad \sigma_s = 5,42 \text{ MPa} \quad m = 2,466$$

Na rysunkach 4–6 przedstawiono krzywe składu ziarnowego wykreślone według równań 11–13. Jak widać z tych rysunków równania te dobrze aproksymują rozkłady empiryczne.

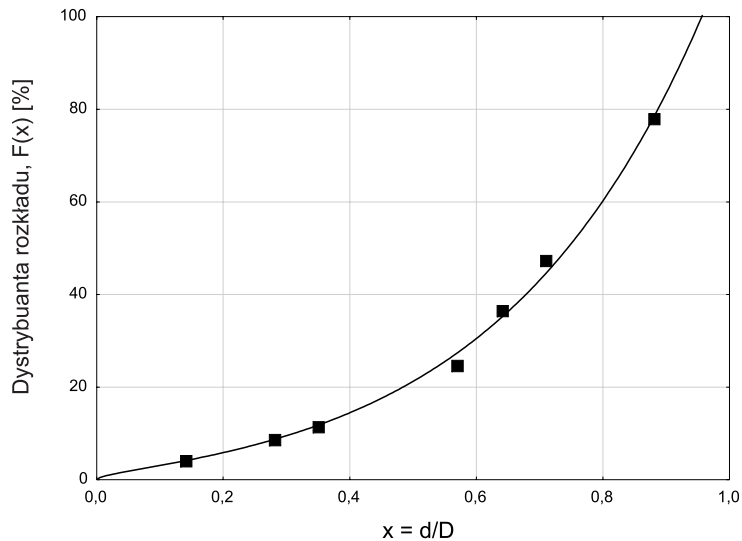
Przy każdym równaniu krzywej składu ziarnowego podano średnią wielkość ziarna produktu rozdrabniania \bar{d} oraz wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie σ_s . Zestawienie tych wartości prowadzi do następujących konkluzji. Przez mniejszą wytrzymałość na

rozciąganie po obróbce wodą powstają mniejsze naprężenia ścinające i powinno powstać mniej drobnych ziaren w stosunku do tego, co otrzymuje się przy rozdrabnianiu ziaren bez obróbki. Jeżeli powstaje ich tyle samo, to może to być skutkiem znacznego obniżenia wytrzymałości na ścinanie po obróbce wodą. Z kolei po obróbce aminą obniżenie wytrzymałości na rozciąganie jest mniejsze niż w przypadku wody. Większe są zatem naprężenia



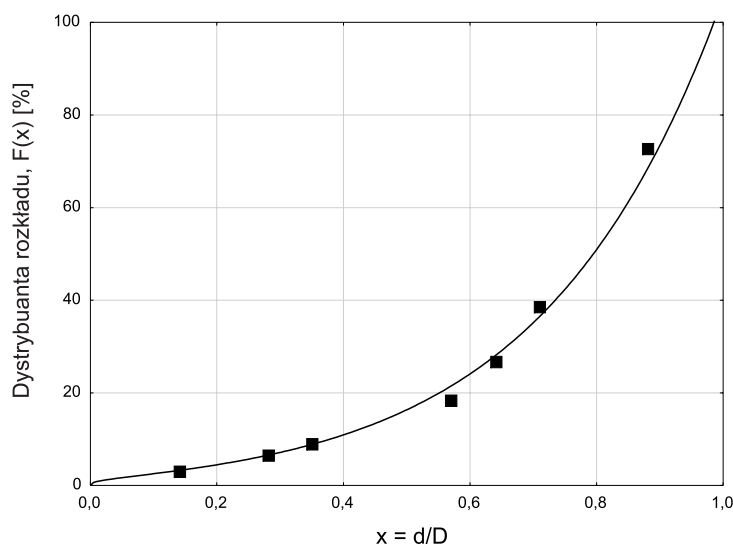
Rys. 4. Krzywa składu ziarnowego produktu rozdrabniania bez uprzedniej obróbki ZPC

Fig. 4. Particle size distribution function without treatment with SAC



Rys. 5. Krzywa składu ziarnowego produktu rozdrabniania po obróbce wodą destylowaną

Fig. 5. Particle size distribution function after treatment with distilled water



Rys. 6. Krzywa składu ziarnowego produktu rozdrabniania po obróbce 0,5% roztworem oleinianu sodu

Fig. 6. Particle size distribution function after treatment with 0.5% oleate solution

ścinające i powstaje w związku z tym więcej ziaren drobnych. Jest ich więcej niż w produkcji kruszenia bez obróbki, co również może być skutkiem obniżenia wytrzymałości na ścinanie.

Uwagi końcowe

Przedstawione w tej pracy wyniki wskazują jak złożony jest mechanizm działania ZPC i jaki jest ich wpływ na wyniki rozdrabniania. Związki te nie tylko obniżają wytrzymałość ziarna, ale zmieniają również rozkład wytrzymałości, gdyż zmienia się wartość modułu Weibulla. Ich działanie realizuje się dzięki mikroszczelinom powierzchniowym, od rozkładu których zależy początkowy rozkład wytrzymałości ziaren. Wnikanie molekuł ZPC do wnętrza mikroszczelin musi więc zmieniać rozkład wytrzymałości ziaren.

Na skład ziarnowy produktu rozdrabniania wpływa wytrzymałość każdego ziarna, a więc tym samym rozkład wytrzymałości na rozciąganie i na ściskanie. Na podstawie wcześniejszych badań (Brożek, Oruba-Brożek 2003a, b, c) dla ziaren porfiru nie poddawanych obróbce ZPC stopień rozdrobnienia S zmienia się w zależności od wytrzymałości na rozciąganie według następującego wzoru:

$$S(\sigma) = 1 + k\sigma^{m/4} \quad (16)$$

gdzie:

- m – moduł Weibulla,
- k – stała, dla porfiru równa 0,106.

Ponieważ stopień rozdrobnienia $S = \frac{D}{\bar{d}}$, wobec czego ze wzoru (16) średnia wartość średnicy ziarna produktu kruszenia jest równa:

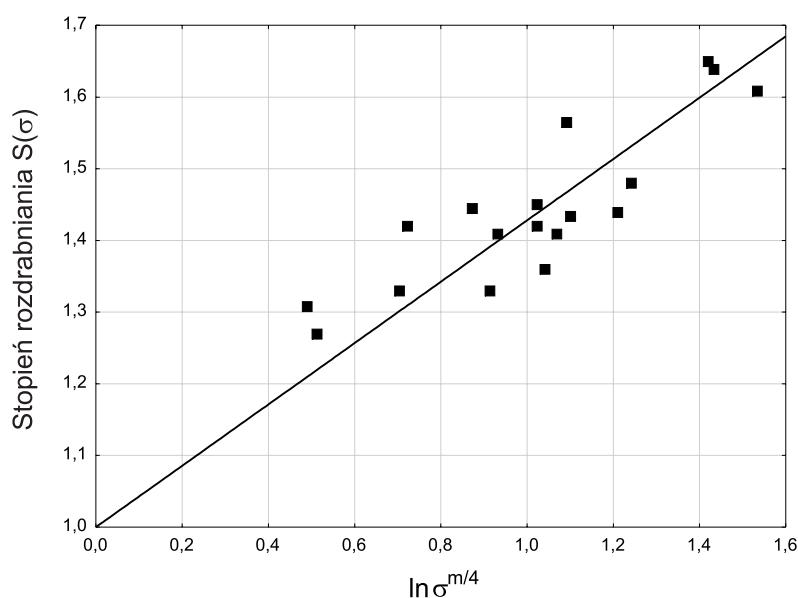
$$\bar{d} = \frac{D}{1 + 0,106\sigma^{m/4}} \quad (17)$$

Wyliczone z powyższego wzoru wartości \bar{d} dla ziaren porfiru po obróbce ZPC są następujące (Brożek, Oruba-Brożek 2003a, b, c):

- a) dla ziaren bez obróbki: $\bar{d} = 22,35$ mm ($d_{\text{exp}} = 23,4$ mm),
- b) dla ziaren po obróbce wodą: $\bar{d} = 21,87$ mm ($d_{\text{exp}} = 23,35$ mm),
- c) dla ziaren po obróbce oleinianem: $\bar{d} = 19,03$ mm ($d_{\text{exp}} = 25,0$ mm),
- d) dla ziaren po obróbce aminą: $\bar{d} = 22,9$ mm ($d_{\text{exp}} = 21,86$ mm).

Różnice pomiędzy wartościami wyliczonymi ze wzoru (17) i wyliczonymi z analizy sitowej i podanymi w nawiasach są (oprócz przypadku c) nieznaczne. Można więc powiedzieć, że zależność (16) można również zastosować dla produktów rozdrabniania ziaren po obróbce ZPC. W związku z tym zastosowano wzór (16) dla uzależnienia stopnia rozdrabniania pojedynczych ziaren dolomitu przez ściskanie. Zależność ta, wyliczona na podstawie danych zamieszczonych w tabelach 1–3, jest następująca:

$$S(\sigma) = 1 + 0,428 \ln \sigma^{m/4} \quad (18a)$$



Rys. 7. Zależność stopnia rozdrabniania od naprężenia niszczącego

Fig. 7. The dependence of crushing ratio on destructive strength

$$S(\sigma) = 1 + 0,15\sigma^{m/4} \quad (18b)$$

Na rysunku 7 przedstawiona jest zależność wyrażona wzorem (18a) przy czym na osi poziomej podane są wartości $\ln \sigma^{m/4}$. Jest to zależność prostoliniowa.

Zależność $S(\sigma)$ jest istotna z praktycznego punktu widzenia, gdyż energia rozdrabniania jest zależna od stopnia rozdrabniania. Przy symulacji procesów rozdrabniania w kruszarkach walcowych i szczękowych poprzez rozdrabnianie pojedynczego ziarna z wielokrotnymi zawrotami, znając właściwości wytrzymałościowe materiału czyli parametry rozkładu wytrzymałości na rozciąganie (σ_s , m), można opracować algorytm prognozy zużycia energii przy rozdrabnianiu.

Artykuł opracowany w ramach badań statutowych AGH. Nr umowy 11.11.100.276

LITERATURA

- Brożek M., 1996a – Immediate tensile strength of irregular mineral particles. Archives of Mining Sciences vol. 41, p. 341–360.
- Brożek M., Tumidajski T., 1996b – Granulometric characteristics of the product of crushing by compression of single particles. Archives of Mining Sciences vol. 41, p. 245–258.
- Brożek M., Oruba-Brożek E., 2003a – The effect of surface-active compounds on the tensile strength of limestone and porphyry particles. Archives of Mining Sciences vol. 48, p. 133–147.
- Brożek M., Oruba-Brożek E., 2003b – Zależność wytrzymałości na rozciąganie ziaren wapienia i porfiru od rodzaju mikroszczelin. Inżynieria Mineralna nr S.3 (10), p. 200–207.
- Brożek M., Oruba-Brożek E., 2003c – Wpływ struktury ziaren mineralnych na ich właściwości wytrzymałościowe na przykładzie wapienia i porfiru. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 19, z. 3, s. 91–109.
- Cottrell A.H., 1964 – The mechanical properties of matter. New York, J. Wiley & Sons.
- Griffith A.A., 1921 – Phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., vol. A 221, p. 163–198.
- Sokołowski M., 1990 – Energetyczny opis procesu rozdrabniania. Warszawa, Wyd. Instytutu Mechanizacji i Automatykacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego.
- Vutukuri V.S., Heins R.W., 1972 – Influence of liquids on the surface energy of limestone. Trans. IMM, sec.C, vol. 81, p. 53–56.
- Weibull W., 1951 – A statistical distribution function of wide applicability. J. Appl. Mech., vol. 18, p. 293–297.
- Westbroock J.H., 1966 – Some Effect of Adsorbed Water on the Plastic Deformation of Non-metallic Solids. Environment Sensitive Mechanical Behaviour. Metallurgical Society Conferences vol. 35, p. 247.
- Wnuk M.P., 1977 – Podstawy mechaniki pękania. Kraków, Skrypt AGH nr 585.

WPLYW ZWIĄZKÓW POWIERZCHNIOWO CZYNNYCH NA WYNIKI ROZDRABNIANIA ZIAREN DOLOMITU

Słowa kluczowe

Związki powierzchniowo czynne, wytrzymałość na rozciąganie, dolomit, stopień rozdrabniania, skład ziarnowy

Streszczenie

Wytrzymałość na rozciąganie ziaren surowców mineralnych jest zależna między innymi od swobodnej powierzchniowej energii właściwej. Obniżenie tej energii powoduje obniżenie wytrzymałości. Z kolei energia niezbędna do zniszczenia ziarna w procesie rozdrabniania przez zgniatanie jest proporcjonalna do wytrzymałości ziarna na rozciąganie. W związku z tym obniżenie wytrzymałości ziarna wpływa na obniżenie energii rozdrabniania.

Jedną z metod obniżenia wytrzymałości ziarna na rozciąganie jest zastosowanie związków powierzchniowo czynnych (ZPC). Związki te wnikając do pierwotnych mikroszczelin obecnych na powierzchni ziarna powodują obniżenie energii powierzchniowej ziarna i zmianę struktury rozkładu mokroszczelin poprzez wzrost liczby mikroszczelin aktywnych.

W pracy podano wyniki badań wpływu ZPC (woda destylowana i roztwór oleinianu sodu) na właściwości wytrzymałościowe i skład ziarnowy produktów rozdrabniania dolomitu przez zgniatanie w prasie. Wykonano serię pomiarów wartości siły prowadzącej do pęknięcia ziarna, pod wpływem oddziaływania ściskającego, na trzech reprezentatywnych próbkach nieregularnych ziaren dolomitu o wymiarach 25–31,5 mm, kolejno bez uprzedniej obróbki ZPC oraz po obróbce ZPC. Wyniki tych pomiarów prowadzą do wniosku, że ZPC powodują obniżenie wartości średniej wytrzymałości ziaren na rozciąganie oraz wzrost modułu Weibulla. Większy wpływ na właściwości wytrzymałościowe i skład ziarnowy ma woda destylowana niż wodny roztwór oleinianu.

THE EFFECT OF SURFACE ACTIVE COMPOUNDS UPON THE RESULTS OF CRUSHING OF DOLOMITE PARTICLES

Key words

Surface active compounds, tensile strength, dolomite, size reduction, particle size distribution function

Abstract

Tensile strength of particles of mineral raw materials depends, among others, upon free surface specific energy. The decrease of this energy results in the decrease of strength. Respectively, the energy necessary to destroy a particle in the process of crushing is proportional to the particle tensile strength. Due to this fact, the decrease of particle strength decreases the crushing energy.

The application of surface active compounds (SAC) is one of the methods of decreasing the particle tensile strength. These compounds, penetrating the primary micro-cracks present on the particle surface, decrease the particle surface energy and change the structure of distribution of micro-cracks by means of the growth of the number of active micro-cracks.

The paper presents the results of investigations of the effect of SAC (distilled water and sodium oleate solution) upon strength properties and particle size distribution of products of crushing of dolomite by means of press crushing. A series of measurements of the value of force causing the particle cracking, under the effect of compression, was performed on three representative samples of irregular dolomite particles of 25–31.5 mm, without the prior SAC action and after the SAC action.

Particle tensile strength was calculated according to formula (6). The arithmetic mean of particle size fraction boundaries, i.e. $D = 28.25$ mm, was assumed to be a particle diameter while Q is a value of the force at which the particle cracks. The results of crushing are presented in Tables 1–3. In these tables P represents the cumulative distribution function of tensile strength or crushing probability.

The model distribution function was fitted to empirical data. This function is expressed by formula (3) in which σ_s represents the average value of particle tensile strength in the sample. The model dependences, calculated by the least square method, are expressed by formulas (7)–(9).

As it results from the performed investigations, after the application of SAC the average tensile strength decreases, more significantly for water than for water solution of oleate, and Weibull's modulus grows (m in Eq. 3).

The ratio of size reduction S grows with the increase of particle tensile strength. The empirical dependence is represented by the general formula (16) while formula (18) is for dolomite. Dependence $S(\sigma)$ can be significant from the practical point of view because the crushing energy depends upon the degree of fineness.