



Ocena energii rozdrabniania składników cementowych

Energy assessment in mixture grinding of cement raw materials

Hussin A. M. AHMED ¹⁾, Mohammed-Noor N. AL-MAGHRABI ²⁾,
Gamal S. Abdel HAFFEZ ²⁾

¹⁾ Central Metallurgical Research and Development Institute (CMRDI), P.O. Box 87, Helwan, Cairo, Egypt;

²⁾ King Abdulaziz University, Faculty of Engineering, Mining Engineering Dept. P.O. Box, 21589, Jeddah, KSA

RECENZENCI: Prof. dr hab. inż. Jan DRZYMAŁA; Dr hab. inż. Barbara TORA

Streszczenie

Przemysł cementowy stosuje rozdrabnianie, które zużywa dużo energii. Zatem proces rozdrabniania cementu jest ważnym zagadnieniem. Dlatego w tym artykule rozważano rozdrabnianie surowego cementu w okresowym młynie kulowym według różnych metodologii, w tym mielenie każdego składnika (gлина, kwarcyt, wapień) osobno oraz mielenie ich razem jako mieszaniny trzech składników. Oceniano zużycie energii dla obu rozwiązań. Dodatkowo, w przypadku mieszaniny trzech składników, zmieniano stosunek wszystkich trzech składników. Wyniki oceniano za pomocą składu ziarnowego produktów mielenia dla odpowiednich poziomów zużycia energii i podziału użytej energii pomiędzy składniki mieszaniny. Stwierdzono, że ilość zużytej na mielenie energii silnie wpływa na ziarnowy moduł Gaudina-Schumanna w zależności od tego, czy materiał był mielony jako mieszanina czy też nie. W przeciwieństwie do tego, wpływ zużywanej energii na dystrybucyjny moduł Gaudina-Schumanna był niewielki. Ustalono, że zmodyfikowane równanie Charlesa, stosowane do obliczania energii rozdrabniania mieszaniny, opisuje bardzo dobrze dystrybucję energii pomiędzy składnikami mieszaniny. Dystrybucja energii pomiędzy składnikami mieszaniny zależy w dużym stopniu od udziału twardych składników, które zwiększają rozdrabniałość składników miękkich. Z tego powodu kwarc wykorzystuje tylko 96% energii przewidywanej dla mieszaniny 1:2:1 dla wszystkich stosowanych poziomów zużycia energii.

Summary

Cement industry depends mainly on grinding which is an energy intensive unit operation. Thus, understanding the behaviour of cement raw materials grinding is a vital issue. Therefore, this paper considers batch ball mill grinding of cement raw materials according to different grinding schemes, including single grinding of each component (clay quartzite, limestone) separately and grinding them together in ternary mixtures. The applied energy levels were verified for both schemes. In addition, in the ternary mixtures case, the ratio between the components was changed. The results were judged in light of the product size distribution at specified level of energy and the energy distribution between the mixture components. It was found that increasing the grinding energy level sharply affects the Gaudin-Schumann size modulus of the ground material whether was ground as single or a mixture. On contrary, the energy influence on the Gaudin-Schumann distribution modulus was minor. It was also found that the modified Charles equation for energy calculation (in mixture grinding) expresses very well the energy distribution between the mixture components. The energy distribution among the mixture components depends to a large extent on the hard component portion which enhances the grindability of the soft ones. For that reason quartz utilizes only 96% of its predicted energy in the mixture 1:2:1 at any applied level of grinding energy.

1. Wprowadzenie

Energia jest znaczącym składnikiem kosztów w różnych przemysłach, w tym przy produkcji pigmentów, wypełniaczy, leków i cementu. Przemysł cementowy konsumuje około 2% energii elektrycznej produkowanej na całym świecie (Zhang *et. al.*, 1988). Obecnie światowa konsumpcja cementu znacząco rośnie. Wynosiła ona w 1995 roku 1,6 teragramów ($Tg = 10^{12}g$) a ocenia się, że będzie ona wynosiła w 2025 roku 2,1 Tg, co wymaga coraz więcej energii (Norholm, 1995). Nie tylko wysoka konsumpcja energii przez przemysł cementowy, ale także wzrastające zapotrzebowanie na bardzo drobne produkty cementowe prowadzi do jeszcze wyżej konsumpcji energii. Z powodu wzrastającego zapotrzebowanie na energię

1. Introduction

Energy is an important cost factor in different industries including pigments, fillers, pharmaceuticals and cement. Cement industry consumes about 2% of the electricity produced in the whole world (Zhang *et. al.*, 1988). The world consumption of cement is increasing rapidly. It was about 1.6 teragrams ($Tg = 10^{12}g$) in 1995 and expected to reach 2.1 Tg by 2025 that requires more energy (Norholm, 1995). Not only such high consumption of cement but also the increasing demands for finer-cement products impose higher energy consumption. Owing to the severe economic pressure for energy, there is general trend to reduce energy consumption. Therefore, high-energy consumption in cement industry

obserwuje się ogólny trend do redukcji zużycia energii. Dlatego wysokie zużycie energii przez przemysł cementowy jest stale obiektem rozważań literaturowych. Większość badaczy analizuje te etapy mielenia, które zużywają najwięcej energii w procesach rozdrabniania. Na przykład rozdrabnianie surowców cementowych i klinkieru konsumuje około 62% całkowitego zapotrzebowania na energię, której 24% idzie na rozdrabnianie składników cementu, a 38% na mielenie klinkieru i finalne rozdrabnianie cementu (Fujiimoto, 1993; Benzer, et.al., 2001; Abdel Hafez, 2005). Powoduje to pojawienie się potrzeby rozumienia przebiegu rozdrabniania surowców cementowych. Dlatego w tym artykule badano wpływ sposobu rozdrabniania na skład ziarnowy komponentów cementu i wykorzystanie energii oraz jej dystrybucji, co może pomóc w analizie i optymalizacji schematów rozdrabniania cementu dla osiągnięcia minimalizacji zużycia energii. Wykorzystano zmodyfikowaną metodologię Charlesa do obliczeń energetycznych dla oceny różnych systemów i schematów mielenia (Ipek, et al., 2005). Charles (1957) zaproponował następującą formułę korelująca redukcję rozmiaru ziarn z zużyciem energii:

$$E = AX^{(1-n)} \quad (1)$$

gdzie E jest zużyciem energii, X jest miarą redukcji rozmiaru ziarn lub inaczej ziarnowy moduł Gaudina-Schumanna zaś A oraz n są stałymi. W celu skorelowania stałej n z dystrybucją Gaudina-Schumana składu α , równanie 1 było testowane przez różnych badaczy (Mehrim, 1970; Fuerstenau and Sullivan, 1962). Ich próby doprowadziło do ogólnie akceptowanego zmodyfikowanego równania Charlesa opisującego zależność energia-redukcja rozmiaru ziarn w formie

$$E = CX^{-a} \quad (2)$$

gdzie C jest stałą.

Podczas mielenia mieszaniny, przyjmując stałą rozdrabniałość jej składników, wykazano że równanie 2 może być z powodzeniem stosowane, jak pokazano na rys. 3, dla mieszanin składników mieszaniny o jednakowych gęstościach (Fuerstenau i Sullivan, 1962; Ipek et al., 2005). Mówi ono, że całkowita energia potrzebna do mielenia jednostki masy danej mieszaniny wynosi (Ipek, et al., 2005):

$$E = m_1 C_1 X_1^{-a_1} + m_2 C_2 X_2^{-a_2} + \dots + m_n C_n X_n^{-a_n} \quad (3)$$

gdzie E jest energią konsumowaną na jednostkę masy mieszaniny (w kWh/t) a po pomnożeniu przez 3,6 jest wyrażona w jednostkach J/g. Z kolei m_1 , m_2 oraz

was and still is a matter of literature debate. Most researchers attributed this to grinding steps in the plant that are energy intensive. For example, grinding of raw material and cement clinker consumes about 62% of the total energy needed in a cement plant from which 24% for grinding of raw materials and 38% for clinker and final cement product grinding (Fujiimoto, 1993; Benzer, et.al., 2001; Abdel Hafez, 2005). This makes the need for understanding the grinding behavior of the cement raw materials a must. Therefore, this paper investigates the effect of the grinding schemes on cement raw materials size distribution, energy utilization and energy distribution, which can help in the analysis and optimization of cement grinding circuits for minimal energy consumption. The application of the Charles modified methodology for energy calculation will be used for evaluation of the different tested systems and schemes (Ipek, et al., 2005). In this approach, Charles (1957) proposed a formula correlating the size-reduction with the applied energy that is:

where, E is the energy input, X is a measure for size reduction or the size modulus as defined by the Gaudin-Schumann (G-S) distribution form, and A and n are constants. To correlate constant n with that of the Gaudin-Schumann size distribution α , Eq. 1 was tested by different workers (Mehrim, 1970; Fuerstenau and Sullivan, 1962). Their trials lead to generally applicable modified version of the Charles energy-size reduction relationship as in the form of Eq. 2.

where C is another constant.

In mixture grinding and assuming constant grindability of constituent materials Eq. 2 was proven to be successfully applicable as shown in Eq. 3 for mixtures of identical specific gravities (Fuerstenau and Sullivan, 1962; Ipek et al., 2005). It expresses the total energy required for grinding a unit mass of a given mixture by the following equation (Ipek, et al., 2005):

where; E is the energy consumed per unit mass of mixture, kWh/t which can be multiplied by 3.6 to be converted into J/g; m_1 , m_2 , m_n are the mass fractions

m_n to ułamki masowe składników mieszaniny, zaś symbole $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ oznaczają moduł dystrybucji Gaudina-Schumanna (lub krótko G-S) mielonego materiału jako składnika w mieszaninie, X_1, X_2, X_n to moduł rozmiarowy G-S rozdrabnianego składnika mieszaniny a C_1, C_2, C_n to stałe rozdrabniałości materiału, gdy każdy ze składników jest mielony osobno. Powyższa formuła użyta do śledzenia zużycia energii w rozważanym układzie. W dodatku obliczoną energię porównano z energią przewidywaną dla każdego badanego przypadku.

2. Część eksperymentalna

2.1. Charakterystyka stosowanych materiałów i ich przygotowanie

Składnikami wyjściowymi cementu była glina jako źródło krzemionki i/lub tlenków glinu, wapień jako źródło węgla wapnia, a kwarcyt stosowano do regulacji ilości krzemionki w mieszaninie. Badane materiały były wyselekcjonowane tak, aby nie było w nich widocznych zanieczyszczeń. Skład chemiczny tych materiałów podano w tablicy 1. Z każdego materiału przygotowano wąską klasę ziarnową przez przesiewanie na sucho produktu uzyskanego przez stopniowe rozdrabnianie. Klasa ziarnowa $-800+630 \mu\text{m}$ była nadawą do badań rozdrabniania.

Tablica 1
Analiza chemiczna rozpatrywanych składników
(glina, wapień oraz kwarcyt)

| Materiał Materia | Tlenek Oxide | | | | | | Suma Total [%] |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|------------|----------------------|
| | SiO ₂ [%] | Al ₂ O ₃ [%] | CaO [%] | Fe ₂ O ₃ [%] | MgO [%] | LOI [%] | |
| Glina Clay | 51,2 | 26,3 | 2,93 | 2,39 | 2,85 | 14,2 | 99,87 |
| Wapień Limestone | 0,86 | 0,27 | 54,5 | 0,24 | 1,04 | 42,55 | 99,46 |
| Kwarcyt Quartzite | 95,63 | 0,03 | 0,59 | 1,58 | 0,56 | 0,63 | 99,02 |

Gęstość każdego składnika badano w laboratorium. Ich wartości wynosiły 2,59, 2,61 oraz 2,64 (g/cm³) odpowiednio dla gliny, wapienia oraz kwarcytu. Odzwierciedla to ich niemal identyczny udział masowy i objętościowy każdego składnika w mieszaninie.

2.2. Metodologia i ocena rozdrabniania

Ekspertymenty dotyczące okresowego rozdrabniania przeprowadzono na sucho w laboratoryjnym młynku kulowym połączonym z przyrządem do pomiaru momentu obrotowego. Cechy młynka i warunki prowadzenia pomiarów opisano w tablicy 2.

of the components in mixture; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ are the G-S distribution modulus of the materials ground as a component in a mixture; X_1, X_2, X_n are the G-S size modulus of the materials ground as a component in a mixture; and C_1, C_2, C_n are the grindability constants of the materials when each is independently ground. The above formula will be used for following up the energy in the considered systems. In addition, the calculated energy will be compared with the predicted energy in each case.

2. Experimental techniques

2.1. Test materials characteristics and preparation

The cement raw materials used in this study were clay as a source of either silica and/or alumina, limestone as a main source of calcium carbonate and quartzite so as to supply the blend mainly with silica. The sample materials were selected free from apparent defects. Chemical analyses of these materials are given in Table 1. From each of the three materials a mono-sized product was prepared by dry sieving of stage-crushed product. The prepared $-800+630 \mu\text{m}$ mono-sized product was considered as the feed for the subsequent grinding tests.

Table 1
Chemical analyses of the considered clay,
limestone, and quartzite samples

The specific gravity of each of them was determined in the laboratory. The values were 2.59, 2.61 and 2.64, for clay, limestone, and quartzite, respectively. This reflects identical mass and volume fractions in a given mixture.

2.2. Grinding tests methodology and evaluation

Batch grinding experiments were carried out dry in a laboratory ball mill connected with a torque meter. The different features of this mill and test operating conditions are described in Table 2. The conditions were chosen to represent optimum

Wybrano takie parametry, aby reprezentowały one optymalne warunki rozdrabniania (Ipek, et al., 2005; Abdel Hafez, 2005).

grinding conditions (Ipek, et al., 2005; Abdel Hafez, 2005).

Tablica 2
Charakterystyka młyna i warunki eksperymentalne

Table 2
Ball mill characteristics and test conditions

| | | |
|--------------------------------------|--|---|
| Młyn Mill | Średnica wewnętrzna, mm Inner diameter D, mm | 152,5 |
| | Długość, mm Length L, mm | 160 |
| | Objętość, cm ³ Volume V, cm ³ | 2 930 |
| | Prędkość krytyczna, obr/min Critical speed N _c , rpm | 116 |
| | Prędkość operacyjna, obr/min Operational speed, rpm | 93 |
| Mielniki Media charge | Materiał Material | kule ze stali stopowej alloy steel balls |
| | Srednica, mm Diameter d, mm | 15 and 25 |
| | Gęstość, g/cm ³ Specific gravity, g/cm ³ | 7,78 |
| | Średnia masa kul, g Average ball weight, g | 32,1 |
| | Objętość zajmowana w młynie Mill occupied volume | 42% V |
| Wypełnienie młyna Material charge | Materiały Materials | glina, wapień, kwarcyt Clay, limestone and quartzite |
| | Gęstość Specific gravity | odpowiednio 2,59, 2,61 oraz 2,64 2.59, 2.61 and 2.64, respectively |
| | Wypełnienie materiałem Material filling ratio | 100% przestrzeni mielników, ~250g 100 % of media charge voids, ~250g |

Na początku, przygotowana wcześniej wąska klasa ziarnowa –800+630 μm była niezależnie mielona przy jednostkowym (na gram) zużyciu energii na poziomie 8,10, 13,50, 21,60, 27,00, 32,40, 42,48 oraz 54,00 J/g. W każdym eksperymencie, poziom zużycia energii E (w J/g) był wyliczony poprzez odnotowanie wskazania przyrządu mierzącego moment obrotowy i stosowanie zmodyfikowane równanie (Abdelhafez, 2005).

At the beginning, the –800+630 μm previously prepared mono-size samples were ground independently at different specific energy levels 8.10, 13.50, 21.60, 27.00, 32.40, 42.48, and 54.00 J/g. In each experiment, the energy level E in J/g was calculated by registering the reading of torquemeter digital display and applying Eq. 4 modified from the Abdelhafez (2005) work.

$$E = \frac{2\pi N \times T \times t}{m} \quad (4)$$

gdzie N wyraża prędkość młyna, rpm, T jest momentem obrotowym (N·m), t oznacza czas mielenia, min, a m jest masa próbki w gramach.

where, N expresses the mill operating speed, rpm, T is the recorded torque (N·m), t refers for the applied grinding time, min and m is the sample mass in grams.

Skład ziarnowy mielonego materiału oznaczono za pomocą przesiewania na sucho. Wiele uwagi poświęcono na otrzymanie dokładnych i powtarzalnych składów ziarnowych po każdym mieleniu (Austin i Brame, 1983). Przy rozdrabnianiu mieszaniny glina–wapień–kwarcyt, wąskie klasy ziarnowe bada-

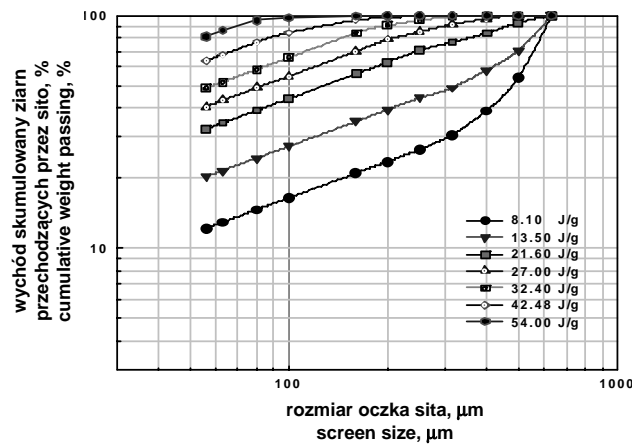
The size distribution of the ground material was determined by dry sieving. Considerable care was taken to get accurate and reproducible sieve size distributions after each grinding tests (Austin and Brame, 1983). For the grinding of clay–limestone–quartzite ternary mixtures, the mono-sized samples

nych trzech materiałów mieszano ze sobą w proporcji 1:1:1, 1:2:1 lub 1:3:1 (wagowo) i mielono przy trzech różnych poziomach zużycia energii, tj. 13,50, 27,00 i 42,48 J/g dla tych samych warunków pracy młynka. Zmielona mieszanina była poddana analizie sitowej na sucho. Skład ziarnowy każdego materiału w zmielonej mieszaninie otrzymano w oparciu o bilanse metalurgiczne składników dla na sucho odsewanych klas ziarnowych mieszaniny (Ipek et al., 2005).

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Mielenie poszczególnych materiałów

Rysunek 1(a-c) pokazuje skład ziarnowy, w ujęciu Gaudina-Schumanna, produktów otrzymanych w wyniku rozdrabniania każdego materiału osobno dla różnych poziomów zużycia energii.



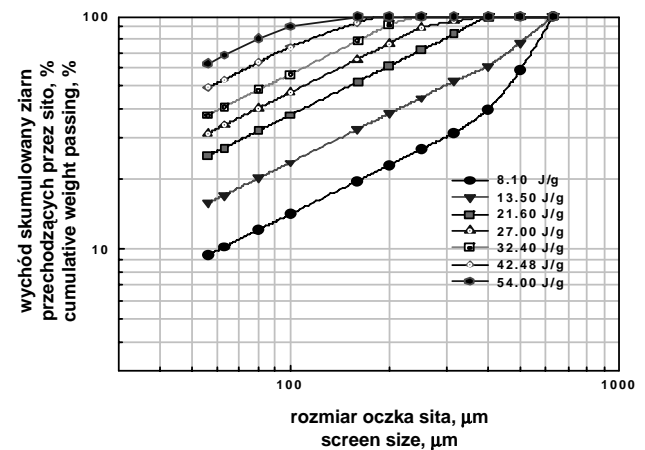
a) glina, clay

of the three test materials were mixed in the proposed ratio (1:1:1, 1:2:1 or 1:3:1) by weight and ground under three different specific energy levels (13.50, 27.00, and 42.48 J/g) at the same mill operating conditions. The ground mixture was then screen analysed on dry bases. The size distribution of each material in the ground mixture was obtained by metallurgical balancing of the different constituents of the dry-sieved size fractions of the mixture (Ipek et al., 2005).

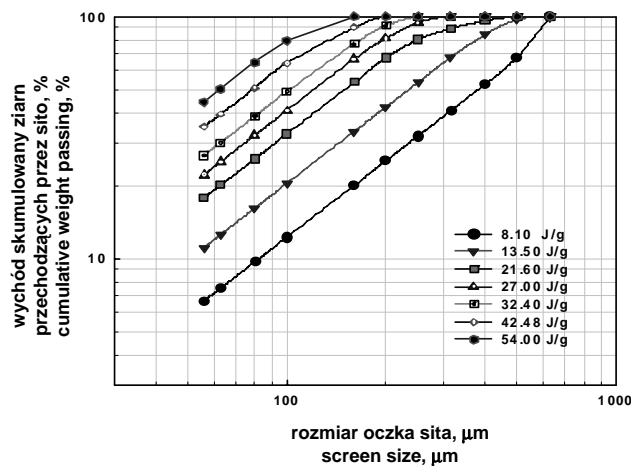
3. Results and discussion

3.1. Single – material grinding

Figure 1(a-c) shows the Gaudin-Schumann size distribution plot of the products obtained from grinding each material independently at the various specific energy levels.



b) wapień, limestone



c) kwarcyt, quartzite

Rys. 1

Skład ziarnowy indywidualnie mielonych składników cementu przy różnych wydatkach jednostkowej energii rozdrabniania

Fig. 1

Size distribution of singly-ground selected cement raw materials at different specific energy levels

Z rysunku tego wynika, że moduł dystrybucji Gaudina–Schumanna α jest otrzymywany jako nachylenie liniowej części krzywej składu ziarnowego. Z rysunku 1 wynika, że zachodzi to dla frakcji drobniejszych niż 160 μm , zwłaszcza gdy stosuje się wysokie zużycia energii jednostkowej, podczas gdy przy niskim zużyciu energii linowa część wykresu obecna jest przy znacznie większych rozmiarach ziarn. Z drugiej strony, moduł rozmiaru G-S X można również otrzymać przez ekstrapolację liniowej części krzywej do przecięcia z wartością 100%. Otrzymane wartości zarówno α jak i X zostały potwierdzone poprzez dopasowanie odpowiedniej części wykresu rys. 1 z równaniem Gaudina–Schumanna stosując program Sigmaplot. Zaobserwowano pewne drobne różnice. Tabela 3 pokazuje średnie wartości α oraz X dla trzech badanych materiałów dla różnych zastosowanych poziomów energii mielenia. Pokazuje ona, że moduł dystrybucja G-S α jest w przybliżeniu stały dla każdego materiału, mimo stosowania różnych poziomów zużycia energii. Wyniósł on 0,52 dla gliny, 0,70 dla wapienia i od 1,05 do 1,06 dla kwarcytu. Otrzymane liczby są w dobrej zgodności z danymi opublikowanymi w literaturze (Fuerstenau and Sullivan, 1962; Ipek, et al., 2005).

From this Figure, the Gaudin–Schumann distribution modulus (α) is obtained from the slope of the linear portion of the distribution curve. As it is clear from Fig. 1, this portion can be usually met on the fractions finer than 160 μm , especially when applying high specific energy levels, while the lower energy levels showed straight portion of the plot at much coarser screen sizes. On the other hand, the G-S size modulus (X) can be also obtained by extrapolating the linear portion of the curve to the 100% intercept. The hitherto obtained results for both α and X were reconfirmed by running curve fitting of the suitable portion of the plots in Fig. 1 applying the Gaudin–Schumann formula and using the Sigmaplot commercial software. Minor differences were noticed. Table 3 shows the average values of α and X for the three tested materials with the different applied specific energy levels. It shows that the G-S distribution modulus α is approximately constant for each material nevertheless of the applied specific energy level. It is approximately 0.52 for clay, 0.70 for limestone and from 1.05 to 1.06 for quartzite. These results are in good agreement with already published literature data (Fuerstenau and Sullivan, 1962; Ipek et al., 2005).

Tablica 3
Parametry Gaudina-Schumanna dla badanego materiału gdy był mielony oddzielenie przy różnych poziomach jednostkowej energii rozdrabniania

Table 3
The Gaudin-Schumann parameters of tested materials when singly ground at different specific energy levels

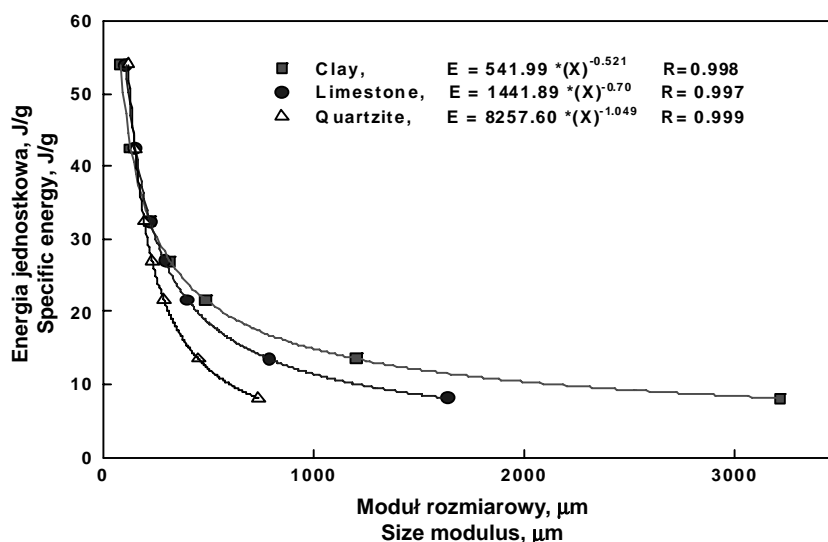
| Energia jednostkowa Specific energy J/g | Glina Clay | | Wapień Limestone | | Kwarcyt Quartzite | |
|---|---------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | α_1 | $X_1, \mu\text{m}$ | α_2 | $X_2, \mu\text{m}$ | α_3 | $X_3, \mu\text{m}$ |
| 8,10 | 0,52 | 3 217 | 0,706 | 1 637 | 1,058 | 738 |
| 13,50 | 0,52 | 1 205 | 0,708 | 789 | 1,056 | 454 |
| 21,60 | 0,53 | 488 | 0,704 | 403 | 1,056 | 290 |
| 27,00 | 0,53 | 318 | 0,707 | 293 | 1,055 | 234 |
| 32,40 | 0,52 | 224 | 0,706 | 226 | 1,051 | 197 |
| 42,48 | 0,53 | 133 | 0,703 | 153 | 1,047 | 152 |
| 54,00 | 0,52 | 84 | 0,700 | 109 | 1,049 | 121 |

Tablica 3 pokazuje również, że moduł rozmiarowy X maleje z 3217 μm przy 8,10 J/g do 84 μm przy 54,00 J/g dla gliny. Odzwierciedla to dużą prędkość mielenia gliny. Dla wszystkich stosowanych poziomów energii, redukcja modułu rozmiarowego dla wapienia była w przybliżeniu połowę tego, co ma miejsce w przypadku gliny i spadał od 1637 μm (8,10 J/g) do 109 μm (54,00 J/g). Wskazuje to, że wapień, w stosunku do gliny, trudniej się rozdrabnia. Zjawisko to jest także ważne, gdy porównuje się obniżenie modułu rozmiarowego dla kwarcytu z modułem dla gliny i wapienia. Jest to zgodne z danymi

Table 3 also shows that the size modulus decreased from 3217 μm at energy level of 8.10 J/g to only 84 μm at an energy level of 54.00 J/g for clay. This reflects a high grinding rate of clay. For the whole applied energy levels, the reduction of the size modulus of limestone was approximately half of that encountered in case of clay where it dropped from 1637 μm (8.10 J/g) to 109 μm (54.00 J/g). This implies more difficult limestone-grindability compared to that of clay. The phenomenon is still valid when comparing the reduction in the size modulus of quartzite with that of clay or limestone. This agrees

literaturowymi dotyczącymi wskaźnika (W_i) wszystkich trzech badanych materiałów (W_i kwarcytu > W_i wapienia > W_i gliny) (Rizk and Ahmed, 1995).

with literature data regarding work index (W_i) of the three tested materials (W_i quartzite > W_i limestone > W_i clay) (Rizk and Ahmed, 1995).



Rys. 2
Zależność pomiędzy modułem wymiarowym G-S (X_i) i stosowanymi poziomami zużycia energii jednostkowej dla wszystkich trzech badanych materiałów

Fig. 2
Relationship between G-S size modulus (X_i) and the applied specific energy level for the three tested materials

Rysunek 2 reprezentuje zależność energia-skład ziarnowy w ujęciu Charlesa (1957) dla serii pokazanej na rys. 1. Na rysunku tym wzięto pod uwagę moduł rozmiarowy G-S X na osi x (jako wskaźnik składu ziarnowego) w zależności od mierzonej jednostkowej energii (oś y). Krzywe dla trzech materiałów opisano równaniem Charlesa (równanie 2) stosując program Sigmaplot. Wyznaczono parametry C oraz α tego równania. Postacie równania Charlesa dla każdego materiału, zawierające wartości zarówno C jak i α , są podane na rys. 2, razem z obliczonym współczynnikiem korelacji R . Stała C w równaniu Charlesa dla trzech materiałów wyniosła 541,99, 1441,89 i 8257,60, odpowiednio dla gliny, wapienia i kwarcytu. Wyniki te wskazują, że równanie Charlesa dobrze reprezentuje badane materiały, gdyż współczynnik korelacji w każdym przypadku jest większa od 0,99. Porównując wyniki z Tabeli 3 z dopasowanymi parametrami pokazanymi na rys. 2 można zauważyć, że moduł α jest w przybliżeniu ten sam. Schodzące się krzywe przy wysokich energiach jednostkowych wskazują na trudności z drobnym mieleniem.

3.2. Mielenie potrójnej mieszaniny

Wybrane do badań materiały były mielone przy trzech kombinacjach składu mieszaniny glina, wapień i kwarcyt. Pierwsza mieszanina (A) była utworzona przez połączenie równych ilości masowych

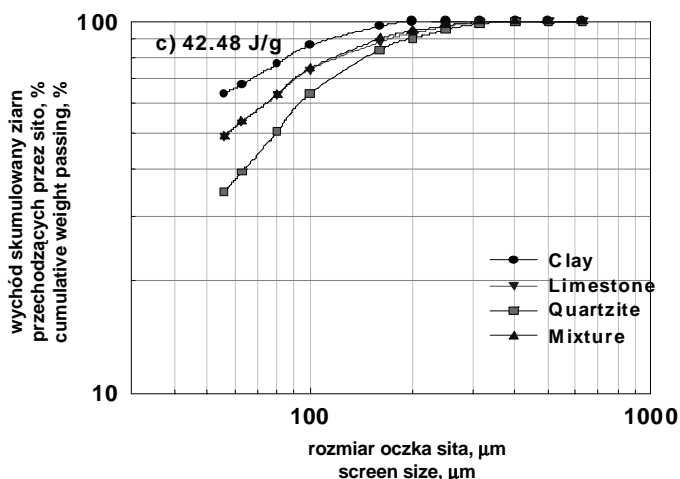
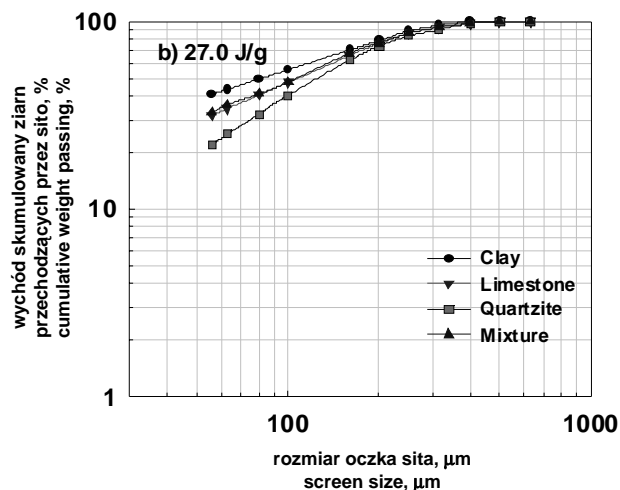
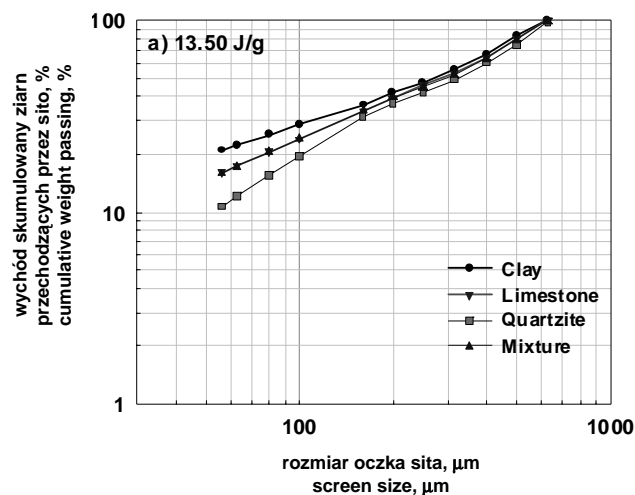
Figure 2 represents energy-size distribution relationship as proposed by Charles (1957), for the grinding series shown in Fig. 1. It is plotted by considering the G-S size modulus X on the x-axis as an indicator for size distribution against the measured specific energy on the y-axis. The curves for the three materials were fitted in accordance with the Charles equation (Eq. 2) using Sigmaplot commercial software, to determine the equation parameters C and α . Forms of the Charles equation for each material, containing both C and α , are written in Fig. 2, together with the correlation coefficient R . The Charles constant C for the three materials was 541.99, 1441.89, and 8257.60 for clay, limestone, and quartzite, respectively. The results show that, the Charles equation represents well the studied materials where the correlation coefficient in each case is greater than 0.99. Comparing results in Table 3 with the fitting results shown in the equations in Fig. 2, it can be seen that the distribution modulus α is approximately the same. The packed curves at high energy levels imply difficulty in fine grinding.

3.2. Ternary-mixture grinding

The selected materials were ground at three different combinations (mixtures) of clay: limestone: quartzite. The first mixture (A) was formed by combining equal mass fractions of the three components

składników tj. w proporcji 1:1:1. Pozostałe mieszanki, B i C, stanowiły materiał o wzrastającej masowej ilości wapienia (1:2:1 i 1:3:1), aby symulować standardowy skład cementu. Rysunki 3–5 opisują skład ziarnowy mieszanki i indywidualnych składników tworzących mieszankę potrójną, przy trzech badanych poziomach energii jednostkowej, tj. 13,5, 27,00 i 42,48 J/g.

i.e. 1:1:1. The other two mixtures, B and C, were based on increasing the limestone mass fractions (1:2:1 and 1:3:1) to simulate the standard cement blend. Figures 3–5 depict the size distribution of the mixture and that of the individual materials forming this ternary-mixture at the three studied energy levels (13.5, 27.00, and 42.48 J/g).



Rys. 3
Skład ziarnowy mieszanki A (1:1:1) i ich składników wynikających ze stosowania różnych poziomów jednostkowej energii mielenia

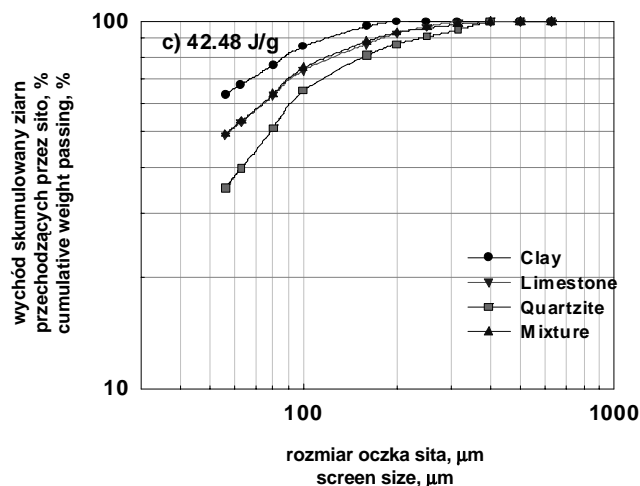
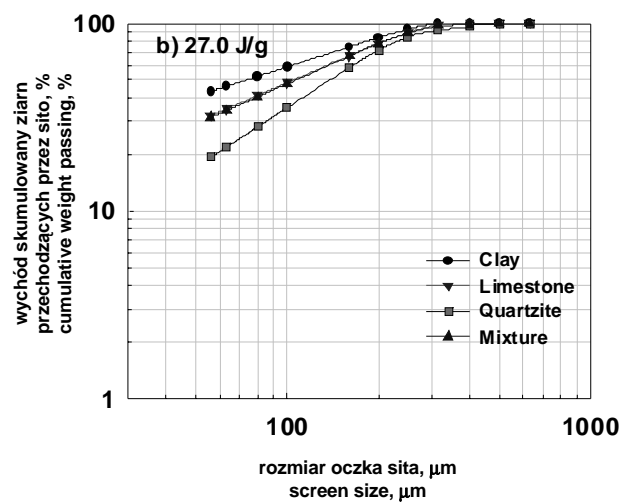
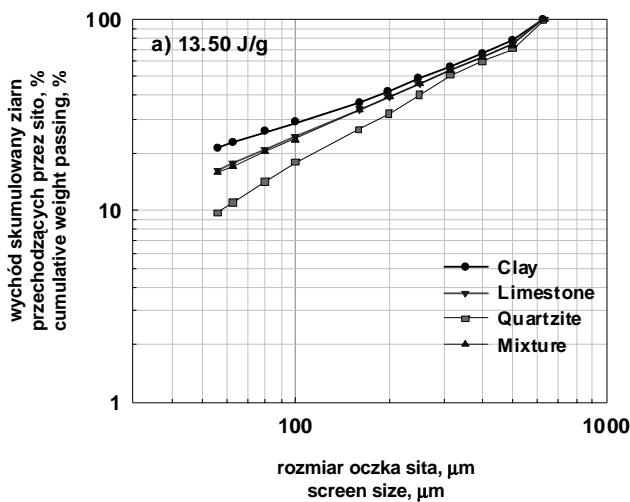
Fig. 3
Size distribution of mixture A (1:1:1) and its individual components resulted from applying different energy levels

Rysunek 3(a–c) pokazuje skład ziarnowy mieszanki o proporcji 1:1:1 oraz skład jej składników przy różnych poziomach zużycia energii. Pokazuje on, że istnieje pewna poprawa mielenia gliny i wapienia, podczas gdy pogarsza się stopień zmielenia kwarcytu. Można to zaobserwować przez porównanie ułamka masowego każdego składnika przechodzącego przez najdrobniejsze sito 56 μm dla mielonych składników w mieszance i dla składników mielonych indywidualnie przy tym samym poziomie

Figure 3(a–c) shows the size distributions of the 1:1:1 mixture and its individual components at the different energy levels. It shows that there exist some improvements in clay and limestone grinding while grinding of quartzite has been lacked behind. This can be seen by comparing the mass fraction of each component passing from the finest screen (56 μm) when ground either as a component of a mixture or ground single at the same level of total energy. For example at 13.50 J/g energy level, the

energii mielenia. Na przykład przy poziomie zużycia energii 13,50 J/g procent frakcji $-56 \mu\text{m}$ był mniejszy niż 20% dla indywidualnie mielonej gliny (Rys. 1a), podczas gdy osiągał on wartość więcej niż 20% gdy mielenie odbywało się w mieszaninie (przy tym samym poziomie zużycia energii) (Rys. 3a). Ma to także miejsce przy wyższych poziomach energii (27,00 oraz 42,48 J/g). Można to zaobserwować porównując rys. 1a z rys. 3b oraz 3c oraz, dla wapienia, porównując rys. 1b z rys. 3a–c. Z drugiej strony przeciwne zjawisko można zaobserwować dla kwarcytu gdy porówna się rys. 1c z rys. 3a–c. Wynika z tego, że twardej składnik (kwarcyt) podwyższa stopień rozdrabniania składników miękkich (głina i wapień).

percent of $-56 \mu\text{m}$ was less than 20 for singly-ground clay (Fig. 1a), while it reached more than 20% when it was ground in this mixture at the same energy level (Fig. 3a). This is also valid for the higher energy levels (27.00 and 42.48 J/g). It can be seen by comparing Fig. 1a with Figs. 3b and 3c. The same can be noticed for limestone by comparing Fig. 1b with Fig. 3a–c. On the other hand, an opposite phenomenon can be seen for quartzite when comparing Fig. 1c with Fig. 3a–c. This shows that the hard component (quartzite) enhances the grinding of the soft one (clay and limestone).



Rys. 4
Składy ziarnowe mieszaniny B (1:2:1) i jej indywidualnych składników przy różnych poziomach zużycia energii

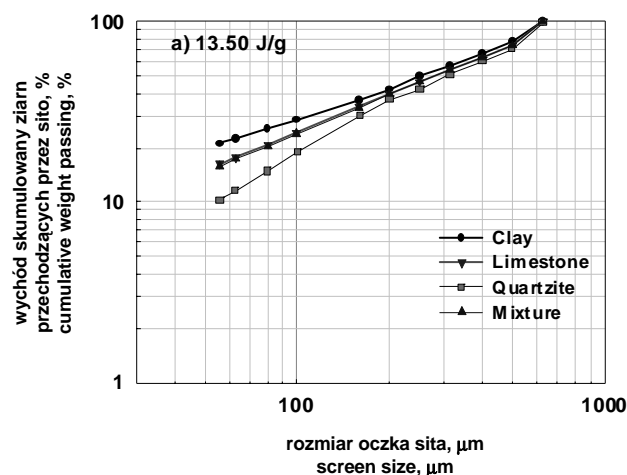
Fig. 4
Size distribution of mixture B (1:2:1) and its individual components resulted from applying different energy levels

Rysunek 4a–c pokazuje dystrybucję dla mieszaniny o proporcji 1:2:1 jej składników. Wskazuje on, że spada stopień zmieleniu gliny i wapienia z powodu zmniejszania się ilości kwarcytu w nadawie do młyna. Widać to z porównania rys. 1a z rys. 4a–c dla gliny oraz rys. 1b z rys. 4a–c dla wapienia. W tym

Figure 4a–c shows the size distributions of the 1:2:1 mixture and its individual components. It shows that the improvement in clay and limestone grinding is going down due to the decrease in the quartzite portion in the material charge. This can be seen by comparing Fig. 1a with Fig. 4a–c for clay and Fig. 1b

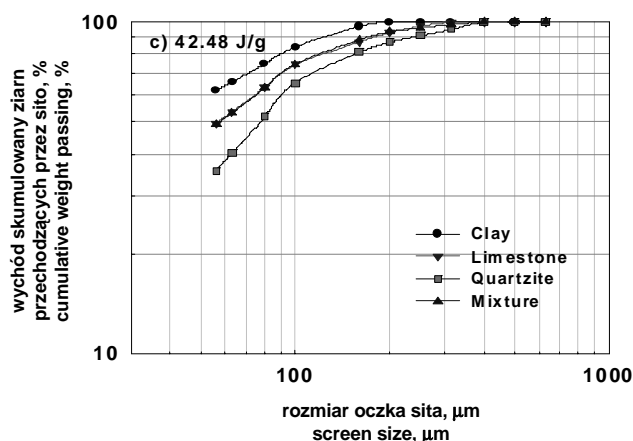
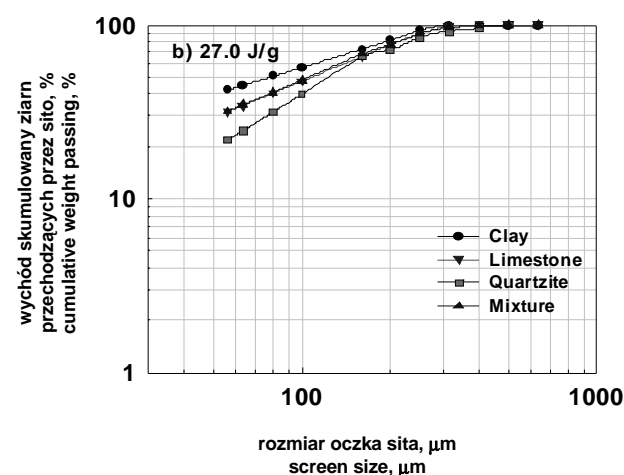
układzie obserwuje się ciągły spadek rozdrobnienia kwarcytu. Można to zobaczyć porównując rys. 1c z rys. 4a–c. Potwierdza to poprzednie ustalenie, że twarde składniki (kwarcyt) podnoszą stopień zmielenie miękkich składników (głina i wapień). Efekt ten zależy od udziału procentowego twardego składnika w mieszaninie.

Rysunek 5a–c pokazuje skład ziarnowy dla mieszaniny o proporcji jak 1:3:1 i indywidualnych składników. Potwierdza on poprzednio zaobserwowany nieznaczny wzrost stopnia zmielenia.



with Fig. 4a–c for limestone. The continuous decrease in quartzite grinding still exists in this case. It can be seen by comparing Fig. 1c with Fig. 4a–c. This confirms the previous finding that the hard component (quartzite) enhances the grinding of the soft one (clay and limestone). However, this improvement depends on the percentage of the hard component in the mixture.

Figure 5a–c shows the size distribution of the 1:3:1 mixture and its individual components. It confirms the previous minor improvements noticed.



Rys. 5
Składy ziarnowe mieszaniny C (1:3:1)
i jej indywidualnych składników
przy różnych poziomach zużycia energii

Fig. 5
Size distribution of mixture C (1:3:1)
and its individual components resulted
from applying different energy levels

Rysunek 3–5 potwierdza, że mielenie składników mieszaniny daje inne wyniki, niż gdy składniki te mielone są oddzielnie. Dlatego należy spodziewać się, że istnieje pewna dystrybucji energii pomiędzy różne składniki mieszaniny. Prześledzono to przez zastosowanie zmodyfikowanego równania Charlesa (rów. 3) traktując glinę jako pierwszy, wapień jako drugi, a kwarcyt jako trzeci składnik. Dla takiego przypadku równanie 3 przyjmie postać:

However, Figs 3–5 confirm that grinding a certain material in a mixture gives different results than when it is ground independently. Therefore, it is expected that there exist some change in the energy distribution between the different components of a mixture. This will be followed up applying the modified Charles equation (Eq. 3) considering clay as the first component, limestone as the second one and quartzite as the third component. However, Eq. 3 will take the form as in Equation 5.

$$E = 541,99m_1(X_1)^{-0,521} + 1441,89m_2(X_2)^{-0,70} + 8257,60m_3(X_3)^{-1,048} \quad (5)$$

Aby zastosować to równanie dla badanej mieszaniny wyznaczono moduł rozmiarowy G-S X_i dla każdego poziomu energii mielenia i pokazano go w tablicy 4, dla porównania, razem z odpowiednimi modułami α . Po pierwsze, można zauważyć, że wyniki mielenia mieszaniny są zgodne z wynikami wynikającymi z mielenia osobno. Wyniki te potwierdzają hipotezę i ustalenia Ipeka et al. (2005).

To apply equation, for the studied mixtures, the G-S size distribution moduli (X_i) for each energy level were determined. They are shown in Table 4 together with the corresponding distribution modulus α for comparison. Firstly, it can be seen that, the values of the distribution modulus α for each material when ground in mixture are in close agreement with those resulting from grinding the material separately. These results support the hypotheses and findings of Ipek et al. (2005).

Tablica 4
Parametry Gaudina-Schumanna dla badanych materiałów, gdy były mielone jako składniki mieszaniny przy różnych poziomach energii jednostkowej

Table 4
Gaudin-Schumann parameters of tested materials when ground as a component of mixture at different specific energy levels

| Proporcja Mixing ratio | Materiał Material | Energia jednostkowa, J/g Specific energy, J/g | | | | | |
|---------------------------|----------------------|--|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
| | | 13,50 | | 27,00 | | 42,48 | |
| | | α | $X, \mu\text{m}$ | α | $X, \mu\text{m}$ | α | $X, \mu\text{m}$ |
| 1:1:1 | Glina Clay | 0,52 | 1 117 | 0,52 | 312 | 0,52 | 136 |
| | Wapień Limestone | 0,7 | 763 | 0,7 | 291 | 0,7 | 157 |
| | Kwarcyt Quartzite | 1,05 | 472 | 1,05 | 236 | 1,05 | 153 |
| 1:2:1 | Glina Clay | 0,52 | 1 085 | 0,52 | 278 | 0,52 | 135 |
| | Wapień Limestone | 0,7 | 752 | 0,7 | 282 | 0,7 | 155 |
| | Kwarcyt Quartzite | 1,05 | 515 | 1,05 | 268 | 1,05 | 151 |
| 1:3:1 | Glina Clay | 0,52 | 1 117 | 0,52 | 295 | 0,52 | 140 |
| | Wapień Limestone | 0,7 | 751 | 0,7 | 289 | 0,7 | 153 |
| | Kwarcyt Quartzite | 1,05 | 491 | 1,05 | 239 | 1,05 | 149 |

Dystrybucje energii pomiędzy trzema składnikami rozdrabnianymi w różnych mieszaninach przy różnych poziomach nakładu energii obliczone w oparciu o równanie 5 są pokazane w tablicy 5. Widać, że równanie Charlesa sprawdza się przy obliczeniach całkowitej energii jednostkowej w mieszaninach trójskładnikowych, gdyż mierzona energia całkowita jest w przybliżeniu taka sama jak obliczona z równania Charlesa.

Rysunek 6 pokazuje zależność pomiędzy obliczoną i przewidywaną energią jednostkową konsumowaną przez kwarcyt przy różnych udziałach składników w mieszaninie i przy różnych poziomach zużycia energii.

The energy distribution between the three components, ground in different mixtures at various energy levels, are shown in Table 5 as calculated from Eq. 5. It shows that the Charles equation is valid for calculating the total specific energy in ternary mixtures as the total energy measured is approximately the same as that calculated by the Charles formula.

Figure 6 shows a relationship between predicted and calculated energy consumed by quartzite at the different mixing ratios under various energy levels.

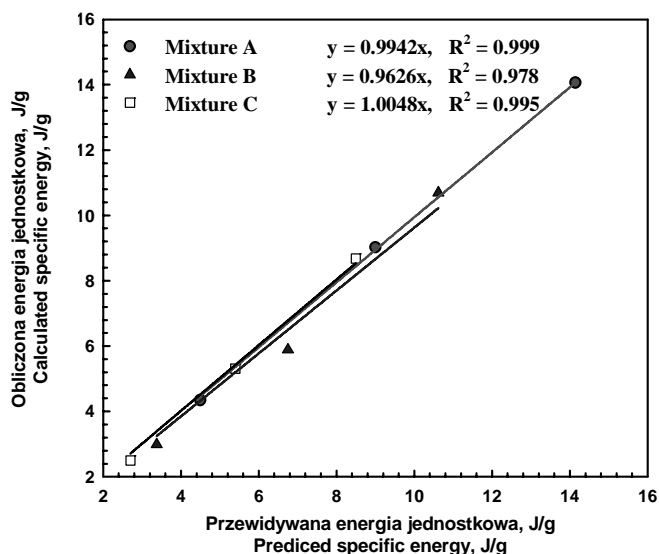
Tablica 5

Dystrybucja energii jednostkowej pomiędzy składniki przy różnych stosunkach składników w mieszaninie i przy różnych poziomach zużycia energii

Table 5

Specific energy distribution between the mixture components at different mixing ratios and energy levels

| Proporcja Mixing ratio | Mierzona energia jednostkowa, J/g Measured specific energy, J/g | Obliczona energia jednostkowa dla każdego składnika, J/g Calculated specific energy for each component, J/g | | | Całkowita energia jednostkowa, J/g Total calc. specific energy, J/g |
|---------------------------|--|--|---------------------|----------------------|--|
| | | Gлина Clay | Wapień Limestone | Kwarcyt Quartzite | |
| 1:1:1 | 13,50 | 4,67 | 4,61 | 4,34 | 13,62 |
| | 27,00 | 9,07 | 9,11 | 9,02 | 27,20 |
| | 42,48 | 14,18 | 14,17 | 14,06 | 42,41 |
| 1:2:1 | 13,50 | 3,55 | 6,99 | 2,99 | 13,53 |
| | 27,00 | 7,22 | 13,81 | 5,89 | 26,92 |
| | 42,48 | 10,47 | 21,23 | 10,69 | 42,39 |
| 1:3:1 | 13,50 | 2,80 | 8,34 | 2,50 | 13,64 |
| | 27,00 | 5,60 | 16,39 | 5,31 | 27,30 |
| | 42,48 | 8,34 | 25,57 | 8,68 | 42,59 |



Rys.6

Zależność pomiędzy przewidywaną a wyliczoną energią jednostkową konsumowaną przez kwarcyt przy różnych zawartości a ich składników wyjściowych w mieszaninie przy różnych poziomach dostarczanej energii

Fig. 6

Relationship between predicted and calculated energy consumed by quartzite at the different mixing ratios under various energy levels

Wykresy pokazują serię linii prostych spełniających zależność $y=kx$, gdzie y jest energią obliczoną według równania Charlesa (równanie 5) a x jest spodziewaną energią, która jest równa energii całkowitej pomnożonej przez ułamek masowy w mieszaninie, gdzie k jest wielkością stałą. Wartości stałej k wynosiły 99,42, 96,26 oraz 100, odpowiednio

The plots represent a series of straight lines having the general formula $y=kx$ where y is the energy calculated according to Charles equation (Eq. 5) and x is the predicted energy and equals total energy multiplied by component mass fraction in the mixture, and k is constant. The value of the constant k was 99.42, 96.26, and 100 for mixtures

dla mieszanin A, B oraz C. Zatem kwarcyt traci 0,6% energii, gdy jego udział masowy wynosi jedna trzecia składu mieszaniny (mieszanina A). Straty energii osiągają wartość około 4% gdy jego udział wynosi 25% (B). Dalsze zmniejszanie ilości kwarcytu w mieszaninie (C) nie powoduje już zmian. Wskazuje to na optymalną ilość kwarcytu w mieszaninie, która powoduje optymalne mielenie mieszaniny.

4. Konkluzje

Badania opisane w tej pracy prowadzą do następujących konkluzji:

1. Stosując różne zużycie energii jednostkowej przy rozdrabnianiu indywidualnym silnie wpływa się na rozmiarowy moduł Gaudina-Schumana X z niewielkim wpływem na dystrybucyjny moduł G-S α .
2. Wzór Charlesa na zależność energia-skład ziarnowy sprawdza się dla potrójnej mieszaniny składników cementu.
3. Dystrybucja składu i energii dla rozdrabnianej mieszaniny potrójnej zależy od składu mieszaniny i natury zmieszanych materiałów.
4. Jeżeli mieszanina trzech składników posiadających prawie równe gęstości jest mielona w młynie kulowym, skład ziarnowy mielonej mieszaniny można przewidzieć na podstawie charakterystyki mielenia poszczególnych składników, gdy ich ułamki masowe w mieszaninie oraz całkowita energia mielenia są znane. Należy też obliczyć parametry X oraz α Gaudina-Schumana.
5. Nieznaczna poprawa rozdrabniania ma ogromne znaczenie dla ekonomiki przemysłowej. Ważne jest określenie udziału twardego składnika w mieszaninie kierowanej do mielenia.

A, B, and C respectively. It shows that quartzite losses 0.6% of its energy when its fraction is one third of the blend (mixture A). The losses reach about 4% when it represents 25% (mixture B). Decreasing the quartzite mass fraction in the blend (mixture C) makes no losses. This indicates that there is an optimum quartzite portion in the mixture which gives an optimum overall grinding of the mixture.

4. Conclusions

The work presented in this paper can lead to the following conclusions:

1. Applying different energy levels for grinding of single materials sharply affects the Gaudin-Schumann size modulus X with minor influence on the G-S distribution modulus α .
2. The Charles energy-size distribution formula is valid for ternary cement mixtures.
3. In ternary mixture grinding the products size and energy distributions depend mainly on the mixing ratio and the nature of the mixed materials.
4. If a mixture of three constituents of nearly equal densities is being ground in a ball mill, the size distribution of the ground mixture may be predicted if the grindability characteristics of the individual constituents (their mass fractions in the mixture and the total grinding energy input) are known. This can be achieved by calculating both G-S parameters X and α .
5. A marginal improvement in the grinding performance will be of immense economic benefit to the industry. Thus, determining the hard component portion in the blend is a vital issue.

Literatura — References

1. Abdel-Hafeez, G. S., *Assessment of Energy Efficiency in Grinding Process, Ph.D. Department Of Mining And Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Assiut University, Assiut, Egypt (2005).*
2. Austin, L. G. and Brame, K., *A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling ball mills with a size mass balance simulation model, Powder Technol. Vol. 34, pp. 261-274, (1983).*
3. Benzer, H., Ergun, L., Oner, M. and Lynch, A. J., *Simulation of open circuit clinker grinding, Minerals Engng., Vol. 14, No.7, pp. 701-710, (2001).*
4. Charles, R. J., *Energy-size reduction relationships in comminution, Trans. SME/AIME, 208, pp. 80- 88, (1957).*
5. Fuerstenau, D. W. and Sullivan, D. A., *Size distributions and energy consumption in wet and dry grinding, Transactions of AIME, Vol.220, pp.397- 402, (1962).*

6. Fujimoto, S., *Reduction specific power usage in cement plants*, *World Cement*, pp. 25 – 34, (1993).
7. Ipek, H., Ucbas, Y., and Hosten., C., *Ternary-mixture grinding of ceramic raw materials*, *Minerals Engineering*, Vol. 18, pp. 45-49, (2005).
8. Mehrim, M. R., *Energetics of comminution*, M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering, Assiut University, (1970).
9. Rizk, A. M. E. and Ahmed, A. A., *Determination of the work index of some Egyptian ores*, *Bulletin of the Faculty of Engng.*, Assiut University, Vol. 23, No.2 ,pp. 241-246, July (1995).
10. Zhang, Y.M., Napier-Munn T. J., Kavetsky, A., *Application of comminution and classification modeling to grinding of cement clinker*, *Transaction of Institute of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 97, December, pp207-214, (1988).
11. Norholm, A., *Notes on energy conservation*, FL Smith and Co. Seminar, September, Ýstanbul, Turkey, (1995).