

Jan SIDOR, Paweł TOMACH

e-mail: jsidor@agh.edu.pl

Katedra Maszyn Górniczych, Przerobczych i Transportowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Eksperymentalna weryfikacja możliwości wytwarzania w młynie wibracyjnym sorbentu wapniowego w postaci mączki

Wstęp

Młyny wibracyjne zaliczane są do grupy młynów z mielnikami swobodnymi, które energię wydatkowaną na proces rozdrabniania otrzymują od drgającej komory o określonej częstotliwości i amplitudzie drgań. Cechuje je zróżnicowana budowa oraz szerokie możliwości technologiczne. Można przeprowadzać w nich proces mielenia w środowisku powietrza lub cieczy, z klasyfikacją ziarnową lub bez, w obniżonej lub podwyższonej temperaturze, w sposób okresowy lub ciągły. Użytkuje się je również jako młyny laboratoryjne o pojemnościach komór od kilku cm^3 do 5 dm^3 . Przemysłowe młyny wibracyjne w zależności od gałęzi przemysłu, w której są stosowane, mają pojemność komór mielących od 20 dm^3 do 2 m^3 [Sidor, 2005]. Stosowane są we wszystkich rodzajach procesu mielenia, w aktywizacji wielu procesów technologicznych, mechano-chemicznej syntezie, w procesach wytwarzania mikroproszków, nanoproszków oraz nanostruktur, a nawet w procesach przygotowania materiałów biologicznych do badań genetycznych. Wydajność młynów przemysłowych, uwarunkowana ich zastosowaniem, rodzajem mielonego materiału, warunkami mielenia, uziarnieniem nadawy i produktu mielenia wynosi od kilkudziesięciu kg/godz do 60 Mg/godz .

Średnica komór przemysłowych młynów wibracyjnych mieści się w zakresie $0,2\div 0,8 \text{ m}$ [Schubert, 1989; Drzymała i inni, 1992], a długości komór, uwarunkowane ich średnicą, wynoszą od $0,5 \text{ m}$ do 4 m . Z uwagi na zalety technologiczne oraz znacznie mniejsze koszty inwestycyjne i eksploatacyjne młyny wibracyjne mogą, z dobrymi rezultatami ekonomicznymi, zastępować młyny grawitacyjne, czyli młyny kulowe i prętowe.

Młyny wibracyjne znalazły zastosowanie w większości technologii wytwarzania proszków o zróżnicowanych własnościach fizycznych. Młyny te stosuje się we wszystkich rodzajach procesu mielenia, głównie jednak w procesach mielenia: drobnego – do uziarnienia produktu mielenia poniżej $50\div 100 \mu\text{m}$; bardzo drobnego – poniżej $10\div 20 \mu\text{m}$ i koloidalnego – poniżej $1\div 5 \mu\text{m}$. W przemyśle stosuje się je w szerokim zakresie wydajności [Sidor i Tomach, 2010]:

- w technologiach masowych o wydajności $20\div 60 \text{ Mg/godz}$. – o ciągłym procesie mielenia w środowisku powietrza,
- w technologiach średniej wydajności $0,5\div 20 \text{ Mg/godz}$. i małej wydajności $0,01\div 2 \text{ Mg/godz}$. o ciągłym procesie mielenia w środowisku powietrza lub cieczy,
- w technologiach małej wydajności $0,02\div 2 \text{ Mg/godz}$., w których proces mielenia zachodzi w sposób okresowy w środowisku powietrza lub cieczy,
- mikrotechnologiach i technologiach specjalnych o wydajności $0,1\div 20 \text{ kg/godz}$., realizowanych w sposób okresowy w środowisku powietrza lub cieczy,
- procesach przygotowania – przez mielenie i homogenizację próbek o masie od $0,1 \text{ g}$ do kilkuset g do celów analitycznych.

Do zalet młynów wibracyjnych, w odniesieniu do młynów kulowych o tej samej wydajności i tym samym uziarnieniu tego samego produktu mielenia, można zaliczyć: [Sidor i Tomach, 2012]

- zdecydowanie większe możliwości technologiczne, w tym możliwość uzyskania produktu mielenia o znacznie drobniejszym uziarnieniu, węższej klasie ziarnowej, ziarnach o ostrych krawędziach oraz możliwość mielenia materiałów o ziarnach płytkowych, np. miki,
- znacznie niższy ($4\div 10$ razy) pobór mocy,
- niższa masa młyna ($4\div 5$ razy) i koszt mielników ($6\div 8$ razy),
- mniejsza powierzchnia zabudowy młyna ($3\div 4$ razy) oraz kubatura młynowni ($4\div 20$ razy),

- prostota łączenia komór młyna z dozownikiem nadawy i urządzeniem odbierającym produkt mielenia, co ułatwia prowadzenie w nich procesu mielenia w atmosferze gazu obojętnego, obniżonym ciśnieniu, a także w podwyższonej lub obniżonej temperaturze (nawet w temperaturze ciekłego azotu),

- możliwość mielenia materiałów tworzących z powietrzem mieszanki wybuchowe.

Młyny wibracyjne w stosunku do młynów mieszadłowych (atrytorów) wyróżniają się:

- niższym ($6\div 10$ razy) jednostkowym zapotrzebowaniem energii na mielenie,
- mniejszym zużyciem mielników ($2\div 4$ razy),
- większym ($10\div 20$ razy) maksymalnym wymiarem ziaren nadawy,
- mniej skomplikowanym układem mielenia i łatwiejszą obsługą.

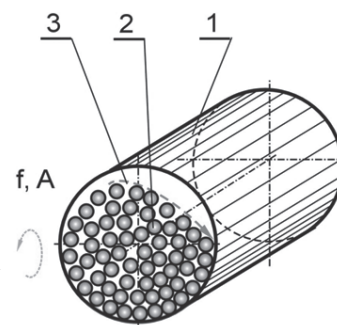
Młyny wibracyjne nie są jednak maszynami wolnymi od wad do których należy przede wszystkim szkodliwe oddziaływanie na otoczenie – generowany poziom ciśnienia akustycznego rzędu $95\div 110 \text{ dB}$ oraz przenoszenie znacznych obciążeń dynamicznych na podłoże. Nie stanowi to jednak problemu, ponieważ wszystkie młyny wyposaża się w dźwiękochłonno-izolacyjne obudowy i odpowiednie fundamenty. Obciążenia dynamiczne występujące w konstrukcji zespołu roboczego młynów wibracyjnych wymagają monitoringu temperatury łożysk.

Wymagania BHP i ochrony środowiska oraz postęp w konstrukcji tych maszyn spowodowały, że obecnie wprowadzane do przemysłu młyny wibracyjne są przyjazne dla środowiska – spełniając stosowne normy poziomu ciśnienia akustycznego [Sidor i Majchrzak, 2000].

Sposób działania najczęściej stosowanego rurowego młyna wibracyjnego o quasi-kołowej trajektorii amplitudy z mielnikami w kształcie kul zamieszczono na rys. 1.

W młynach wibracyjnych (rurowych, korytowych, toroidalnych) mielniki uzyskują energię od drgającej komory i w przeciwieństwie do młynów kulowych energią tą można łatwo zwiększać przez podwyższanie częstotliwości i amplitudy drgań.

Proces mielenia w młynach wibracyjnych, podobnie jak w młynach kulowych, zachodzi pomiędzy swobodnymi mielnikami, zwykle kulami, rzadko prętami o długości zbliżonej do długości komory oraz pomiędzy mielnikami a wewnętrzną częścią komory. Mielniki o innych kształtach, takich jak na przykład cylpetsy, są rzadko stosowane. W rurowych młynach wibracyjnych komora ma kształt walca, zamkniętego z obu stron przegrodami sitowymi, zatrzymującymi mielniki, a przepuszczającymi mielony materiał. W niektórych młynach nadawa wprowadzana jest wprost do komory, wówczas komora ma tylko jedną przegrodę sitową, usytuowaną od strony wylotu zmielonego materiału. Zestaw mielników tworzą zwykle kule o jednakowych wymiarach. Podczas pracy młyna zróżnicowanie wymiarów mielników zachodzi samoczynnie, wskutek ich zużywania się.



Rys.1. Sposób działania młyna wibracyjnego: 1 – komora, 2 – mielniki, 3 – charakter ruchu mielników, f – częstotliwość drgań, A – amplituda drgań

Opis badań

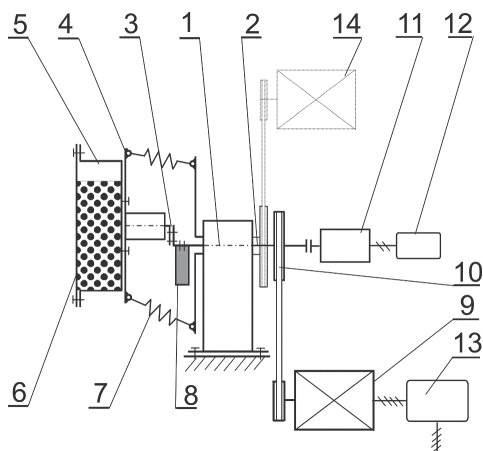
Cel badań

Celem badań było otrzymanie mączki wapiennej z odpadowego kamienia wapiennego pochodzącego z Kopalni Wapienia Czatkowice.

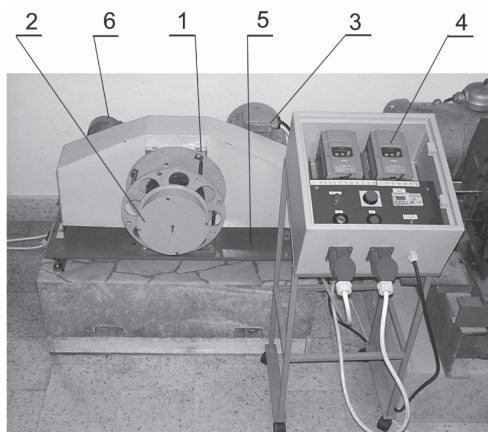
Wymagane uziarnienie mączki precyzuje PN-EN 13043:2004 – *Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu, PN-R-64802:1996 – Pasze. Kreda pastewna* oraz wymagania sorbentów do odsiarczania spalin. Według tej normy uziarnienie mączki powinno zawierać się w klasie 0÷0,080 mm, przy czym pozostałość na sicie (p.n.s.) 0,080 mm nie powinna przekraczać 5%, p.n.s. 0,063 mm – 30% oraz p.n.s. 0,045÷20%. Powierzchnia właściwa mączki oznaczona aparatem Blaine'a powinna wynosić 4000÷6000 cm²/g [Kopalnia Wapienia Czatkowice, 2012].

Stanowisko badawcze

Proces mielenia przeprowadzano w laboratoryjnym młynie wibracyjnym o niskiej częstotliwości drgań – w sposób okresowy na sucho bez aeracji, w środowisku powietrza, w komorze stalowej o średnicy 210 mm i pojemności 2,1 dm³. Schemat budowy stanowiska laboratoryjnego młyna wibracyjnego zamieszczono na rys. 2, natomiast na rys. 3. przedstawiono widok tego stanowiska.



Rys. 2. Schemat budowy młyna wibracyjnego: 1 – moduł napędu, 2 – wał wibratora, 3 – wał mimośrodowy, 4 – tarcza, 5 – komora z mielnikami, 6 – pokrywa komory, 7 – element sprężysty, 8 – obciążnik, 9 – silnik wibratora, 10 – przekładnia pasowa, 11 – czujnik częstotliwości drgań, 12 – wskaźnik prędkości obrotowej wału wibratora, 13 – układ zasilania i sterowania, 14 – silnik napędu komory



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjnego młyna wibracyjnego: 1 – moduł napędu, 2 – komora o średnicy 0,21 m, 3 – silnik wibratora, 4 – układ zasilania i sterowania, 5 – podstawa, 6 – silnik obrotu komory

Materialy

Nadawą był uziarniony odpad kamienia wapiennego o uziarnieniu 0,1÷4,0 mm. Materiał był w stanie suchym o wilgotności nie przekraczającej 0,5 % H₂O.

Uziarnienie zmielonego kamienia wapiennego oznaczano metodą dyfraktometryczną – granulometrem laserowym LAU-15. Analizę uziarnienia przeprowadzano w środowisku alkoholu izopropylowego. Wynik analizy uziarnienia jest średnią arytmetyczną z trzech pomiarów. Kontrolnymi parametrami uziarnienia zmielonego materiału był wymiar

ziarna d_{97} , powierzchnia właściwa oraz pozostałości na sitach: 0,080 mm, 0,063 mm oraz 0,045 mm. Nadawą do mielenia był przemysłowy odpad kamienia wapiennego o uziarnieniu 0÷0,40 mm, pochodzący z młyna rolowo-misowego z zakładu produkującego sorbenty wapińowe do suchej metody odsiarczania spalin.

Program badań

Program badań obejmował cztery serie prób kinetyki mielenia kamienia wapiennego o tych samych czasach poszczególnych prób, to jest: 2,5; 5; 10 i 15 minut. Ustalony był również stopień napełnienia komory (0,70) oraz częstotliwość drgań komory (12 Hz). Parametrami zmiennymi były dwa zestawy mielników oraz dwa warianty mielenia: bez aktywatora oraz z aktywatorem (oznaczone +A). W badaniach przyjęto dwa zestawy mielników:

- SA – jednakowe kule stalowe o średnicy Ø17,2 mm,
- SB – jednakowe kule stalowe o średnicy Ø13,5 mm.

Wyniki badań

Wyniki badań uziarnienia mączki kamienia wapiennego, uzyskanej w procesie mielenia w laboratoryjnym młynie wibracyjnym, przedstawiono w postaci tabel i wykresów: w tab. 1 dla zestawu mielników SA, a w tab. 2 dla zestawu mielników SB.

Tab. 1. Wyniki badań uziarnienia kamienia wapiennego – seria I – zestaw mielników SA

Symbol próby	SA-1	SA-2	SA-3	SA-4	Wymóg normowy
Czas mielenia, [min]	2,5	5	10	15	
	Uzyskany parametr uziarnienia				Maksimum
p.n.s. 0,080 mm [%]	15,23	10,02	6,30	3,72	5,0
p.n.s. 0,063 mm [%]	20,09	14,38	8,90	5,60	30,0
p.n.s. 0,045 mm [%]	25,31	19,19	11,42	7,54	20,0
Wymiar ziarna d_{97} , [µm]	155,19	130,82	112,49	88,24	-
Powierzchnia właściwa, [cm ² /g]	15099,7	18088,6	23041,7	25019,5	-

Tab. 2. Wyniki badań uziarnienia kamienia wapiennego – seria II – zestaw mielników SB

Symbol próby	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	Wymóg normowy
Czas mielenia, [min]	2,5	5	10	15	
	Uzyskany parametr uziarnienia				Maksimum
p.n.s. 0,080 mm [%]	16,91	5,71	4,35	1,81	5,0
p.n.s. 0,063 mm [%]	22,42	9,56	7,05	4,25	30,0
p.n.s. 0,045 mm [%]	27,98	14,32	10,08	7,04	20,0
Wymiar ziarna d_{97} , [µm]	155,54	97,87	90,81	70,42	-
Powierzchnia właściwa, [cm ² /g]	15609,6	19662,6	22846,3	25376,7	-

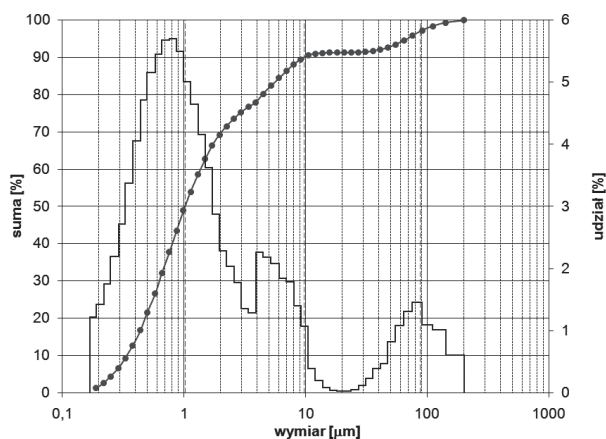
Autorzy, ze względu na ograniczną objętość pracy, zdecydowali się umieścić tylko niektóre wyniki z przeprowadzonych badań. Dlatego w tab. 3 przedstawiono wybrane wyniki uziarnienia kamienia wapiennego, zmielonego w laboratoryjnym młynie wibracyjnym przy zastosowaniu aktywatora, dla czasów mielenia 2,5 oraz 5 minut dla zestawu mielników SA i SB.

Tab. 3. Wyniki badań uziarnienia kamienia wapiennego przy mieleniu z użyciem aktywatora (+A)

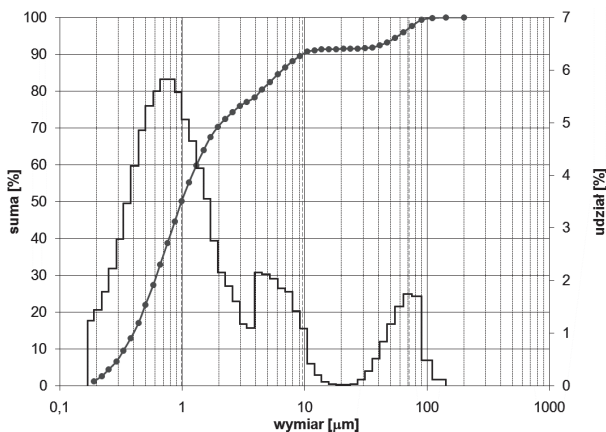
Symbol próby	SA-1+A	SA-2+A	SB-1+A	SB-2+A	Wymóg normowy
Czas mielenia, [min]	2,5	5	2,5	5	
	Uzyskany parametr uziarnienia				Maksimum
p.n.s. 0,080 mm [%]	11,20	1,60	12,07	0,53	5,0
p.n.s. 0,063 mm [%]	15,45	5,87	16,94	2,24	30,0
p.n.s. 0,045 mm [%]	19,96	8,40	21,90	5,69	20,0
Wymiar ziarna d_{97} , [µm]	134,67	69,89	133,71	58,45	-
Powierzchnia właściwa, [cm ² /g]	18384,9	20570,0	16819,3	20307,6	-

Na skład ziarnowy produktu mielenia istotny wpływ miał zestaw mielników oraz ewentualny udział aktywatora procesu mielenia. Stąd na rys. 4–6 przedstawiono wykresy prezentujące rozkład uziarnienia wybranych prób. Są to krzywe składu ziarnowego oraz krzywe sumacyjne, wygenerowane przez oprogramowanie dedykowane dla granulometru laserowego LAU-15. Parametry uziarnienia wszystkich prób zamieszczonych na rys. 4–6 spełniają wymagania wymienionych wyżej norm odnośnie uziarnienia sorbentu i komponentu pasz.

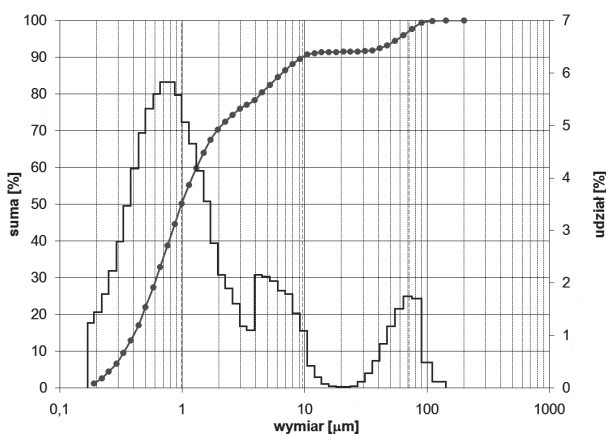
Na rys. 4 przedstawiono uziarnienie próby SA-4 zmielonej przy zestawie mielników SA – czas mielenia 15 min, bez aktywatora, na rys. 5 – uziarnienie próby SB-4 zmielonej przy zestawie mielników SB, czas mielenia 15 min, bez aktywator, a na rys. 6 – uziarnienie próby SB-2+A zmielonej przy zestawie mielników SB, czas mielenia 5 min, z użyciem aktywatora.



Rys. 4. Krzywa składu ziarnowego oraz krzywa sumacyjna próby SA-4



Rys. 5. Krzywa składu ziarnowego oraz krzywa sumacyjna próby SB-4



Rys. 6. Krzywa składu ziarnowego oraz krzywa sumacyjna próby SB-2+A

Analiza wyników badań

Przeprowadzone badania wskazują, że:

1. Dla prób mielonych przy użyciu zestawu mielników SA jedynie w czasie mielenia do 10 min (włącznie) uzyskano mączkę, która nie spełniała tylko jednego parametru uziarnienia wymaganego przez normę, to jest pozostałości na sicie (p.n.s.) 0,080 mm. W czasie mielenia 2,5 min nie został spełniony wymóg normowy tj. p.n.s. 0,045 mm. Dla dłuższego czasu mielenia (15 minut) otrzymana mączka wapienna spełniała wszystkie kryteria uziarnienia.
2. W przypadku zastosowania zestawu mielników SB otrzymano korzystniejsze rezultaty niż dla zestawu SA. Otrzymana mączka spełniała wszystkie parametry uziarnienia już po upływie 10 minut mielenia. Dla czasu mielenia 15 minut, w porównaniu do zestawu mielników SA, otrzymano lepsze wyniki o: 51% dla p.n.s. 0,80 mm, 24% dla p.n.s. 0,063 mm, 7% dla p.n.s. 0,045 mm, 20% dla wymiaru ziarna d_{97} oraz 10% w przypadku powierzchni właściwej.
3. Zastosowanie aktywatora procesu mielenia (symbol prób +A), znacząco poprawiło wszystkie parametry uziarnienia mączki wapiennej. Dla czasów mielenia już od 5 minut spełnione były wszystkie wymagane przez normy parametry uziarnienia produktu mielenia. Przy zastosowaniu zestawu mielników SA, w czasie mielenia 5 minut dla p.n.s. 0,080 mm, 0,063 mm oraz 0,045 mm otrzymano korzystniejsze wyniki, odpowiednio o: 84, 59 i 56%, a dla wymiaru ziarna d_{97} oraz powierzchni właściwej wyniki korzystniejsze o: 47 i 14%. Natomiast dla zestawu mielników SB, w czasie mielenia 5 minut dla p.n.s. 0,080 mm, 0,063 mm oraz 0,045 mm otrzymano korzystniejsze wyniki odpowiednio o: 91, 77 i 60%, a dla wymiaru ziarna d_{97} oraz powierzchni właściwej korzystniejsze odpowiednio o 40 i 3%.
4. Proces mielenia przeprowadzany był w bardzo niekorzystnych warunkach, to jest bez aeracji komory, co powodowało silny *coating* i aglomerację drobnych ziaren.

Wnioski

Sondażowe wyniki badań wskazują, że młyn wibracyjny można zastosować do wytwarzania mączki kamienia wapiennego jako sorbentu do mokrej metody odsiarczania spalin.

Wyniki uzyskano przy bardzo niskiej częstotliwości drgań komory młyn – 12 Hz, niskim przyspieszeniu ruchu drgającego – 56,8 m²/s, co może mieć istotny wpływ na niezawodność i trwałość konstrukcji przemysłowego młyna wibracyjnego.

Na podstawie wyników badań wytwarzania mączki kamienia wapiennego, nawet bez optymalizacji procesu mielenia, można w młynie wibracyjnym średniej wielkości – o pojemności komór 1 m³ uzyskać wydajność około 3,5±5 Mg/godz. Aeracja komór w młynie przemysłowym może zwiększyć wydajności nawet o 40÷60%.

Doświadczenia przemysłowe wykazały [Sidor i Majchrzak, 2000], że młyn ten, dzięki niskiej częstotliwości drgań, może być przyjazny dla otoczenia.

LITERATURA

- Drzymała Z., Dzik T., Guzik J., Kaczmarczyk S., Kurek B., Sidor J., 1992. *Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych*. PWN, Warszawa
- Schubert H., 1989. *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
- Sidor J., 2005. *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych*. Rozprawy, Monografie nr 150, UWN-D AGH, Kraków
- Sidor J., Majchrzak T., 2000. *Preliminary tests of noise emission of industrial vibrating mill of low frequency vibration* [w:] Panuszka R., Wiciak J. (eds.). Structural acoustics and mechanics for environmental protection – IX Conference. Kraków–Zakopane, April 5–7, 2000. Polish Acoustical Society, Cracow, 45–48
- Sidor J., Tomach P., 2010. *Rozwój konstrukcji rurowych młynów wibracyjnych*. *Maszyny Górnicze*, nr 1(121), 27–34
- Sidor J., Tomach P., 2012. *Młyny wibracyjne w procesach bardzo drobnego mielenia surowców mineralnych* [w:] Krauze K. (red.). *Problemy bezpieczeństwa w budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń górnictwa podziemnego*, 159–170. (ISBN 978-83-929335-7-1)
- Kopalnia Wapienia Czatkowice, 2013. *Oferta – Mączka Wapienna – Karta Charakterystyki Produktu* (01.2013): http://www.czatkowice.com.pl/files/KP_KWC_maczka.pdf