

Dr inż. Jacek FELIKS

Dr inż. Marcin MAZUR

Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie

ZASTOSOWANIE WIBRACYJNEJ KRUSZARKI SZCZĘKOWEJ DO ROZDRABNIANIA SOLI KAMIENNEJ W CELU JEJ OCZYSZCZANIA®

Application of vibratory jaw crusher for rock salt comminution in the process of its purification®

Słowa kluczowe: sól spożywcza, kruszenie, kruszarki wibracyjne, oczyszczanie soli.

W artykule przedstawiono wyniki badań, dotyczących kruszenia wibracyjnego zanieczyszczonej soli kamiennej z Kopalni Soli Kłodawa. Sól wydobywana jest w systemie komorowym z użyciem materiałów wybuchowych. W wyniku tego procesu w urobku występują zanieczyszczenia w postaci pozostałości, m.in. przewodów strzelniczych i przybitki strzelniczej. Obecnie stosowany proces technologiczny wzbogacania polega na rozdrabnianiu w kruszarce udarowej i wydzielaniu rozdrobnionych zanieczyszczeń przy pomocy separatorów magnetycznych i przesiewaczy. Ponieważ w klasie ziarnowej powyżej 20 mm znajduje się większość zanieczyszczeń, traktuje się ją jako odpad. W rzeczywistości, oprócz zanieczyszczeń znajdują się w tej klasie bardzo duże ilości soli, ok. 98%. W Katedrze Maszyn Górniczych Przeróbczych i Transportowych Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie podjęto próbę wydzielenia z tego typu odpadu produktu handlowego. Propozycja polega na zastosowaniu wibracyjnej kruszarki szczękowej z wymuszeniem bezwładnościowym, a następnie wydzieleniu z produktu kruszenia zanieczyszczeń na odpowiednio dobranych sitach. Zastosowanie kruszarki tego typu umożliwi selektywne kruszenie wyżej wymienionego odpadu (rozdrobnieniu ziaren soli, pozostawiając nierozdrobnione odpady postrzelnicze). Umożliwiło to wydzielenie odpadów od soli, która może być wykorzystana jako pełnowartościowy produkt handlowy.

Key words: Food salt, crushing, vibratory crushers, salt purification.

The article presents results of contaminated rock salt vibratory crushing from the Kłodawa Salt Mine. Salt is extracted there in a chamber system using explosives. This technology of mining causes metal impurities (blasting wire), wood and paper (from blast holes packaging) to appear in excavated salt. The existing technological process of enrichment consists in crushing in impact crushers and separation of shredded impurities by means of magnetic separators and screens. Most contamination stays in the grain class above 20 mm, therefore this class is treated as a waste. In fact, this class – apart from unwanted impurities – contains a very large amount of salt, about 98%. In the Department of Mining, Dressing and Transport Machines of the AGH University of Science and Technology in Krakow, an attempt was made to extract the commercial product from this type of waste. The proposal is to use a vibratory jaw crusher with inertial actuation of jaws and then separate impurities from the crushing product on appropriately selected screen. The use of this type of crusher enables selective crushing of the abovementioned waste (crushing salt grains and leaving waste nonfragmented). This process enabled the separation of waste from salt, which could be used as a standard value commercial product.

WPROWADZENIE

Sól kamienna (halityt) jest to skała osadowa zwykle bezbarwna, może być też biała lub niebieskawa, która powstała w wyniku wytrącania się halitu (NaCl) podczas odparowywania wody z mórz lub słonych jezior. Należy ona do grupy skał chemicznych. Złoże soli kamiennej występują w formie wysadów w osadach różnego wieku, najczęściej permskich i trzeciorzędowych, powstają też współcześnie (np. Morze Kaspijskie). Największe złoże soli kamiennej znajdują się w Rosji, USA, Niemczech, Francji oraz w Chinach. W Polsce

duże złoże soli kamiennej występują w północno-zachodniej i środkowej części kraju, w Kłodawie i Inowrocławiu. Złoże te pochodzą z górnego permu – cechsztynu. Wydobywa się je metodą wypłukiwania solanki (Inowrocław) oraz metodą podziemną (Kłodawa). W okolicach Bochni i Wieliczki niewielkie złoże soli kamiennej pochodzą z okresu trzeciorzędowo – mioceńskiego. Są to złoże obecnie nieeksploatowane. Sól kamienna stosowana jest zarówno w przemyśle spożywczym (sól spożywcza, sól warzona), jak i chemicznym (do produkcji farb, mydła). Jest stosowana jako środek do rozmrażania i zwalczania śliskości zimowych (sól drogowa) [4].

Adres do korespondencji – Corresponding author: Jacek Feliks, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych, Al. Mickiewicza 30, paw. B-2, 30-059 Kraków, e-mail: feliks@agh.edu.pl

Kopalnia soli „Kłodawa” położona jest w województwie Wielkopolskim. Wydobycie soli kamiennej odbywa się tam już od ponad pół wieku. Kłodawski wysad solny ma długość 26 km, a maksymalną szerokość 2 km. Sól kamienną wydobywa się tam systemem komorowo-filarowym, który pozwala na zachowanie naturalnych walorów soli, m.in. jej wysokiej czystości. Produkt końcowy uzyskuje się poprzez przeróbkę mechaniczną, tzn. poprzez kruszenie, mielenie, sortowanie, bez zastosowania zabiegów chemicznych.



Rys. 1. Sól spożywcza i sól drogowa [4].

Fig. 1. Food salt and road salt [4].

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 2. Sól wydobywana w Kłodawie ma wiele odcieni. Najczęściej jest to sól biała i różowa. Sól błękitna jest rzadkością [4].

Fig. 2. Salt mined in Kłodawa Salt Mine has many tints. The most common is white and pink salt. Blue salt is very rare [4].

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Kłodawska sól kamienna ma zawartość czystego NaCl w granicach 97%. Obecnie prace górnicze w kłodawskiej kopalni soli prowadzi się na głębokości 750 m (rys. 1 – 2).

Skały solne zalegają zwykle niezgodnie w stosunku do skał otaczających. Na powierzchniach zetknięcia występuje woda, solanka, gaz, a czasem nawet ślady ropy naftowej. Stosowanie filarów ochronnych ma zatem na celu ochronę granic złoża, które nie mogą być naruszone przez wyrobiska górnicze. Największym niebezpieczeństwem występującym w kopalniach soli jest zagrożenie wodne. Powstanie nieznacznego przecieku wody lub solanki może spowodować wypłukanie dużych kanałów i pieczar, które stanowią groźbę zalania kopalni.

Eksploracja soli kamiennej dzieli się na dwie metody [5]:

- metoda sucha – polegająca na odspajaniu [6],
- metoda mokra – polegająca na ługowaniu lub rozpuszczaniu wodą.

W kopalni soli „Kłodawa” sól wydobywa się metodą suchą, komorowo-filarową (rys. 3).



Rys. 3. Wymiary komory: 15 m wysokości i szerokości, 200 m długości. Kopalnia soli „Kłodawa” [4].

Fig. 3. Exploitation chamber dimensions: height and width – 15 m, length – 200 m [4].

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Jednym z procesów związanych z produkcją soli kamiennej jest rozdrabnianie, polegające na dzieleniu poszczególnych ziaren materiału na mniejsze części przez ich: zgniatanie, ścinanie, ścieranie, uderzanie lub łamanie [7, 8]. Do zmniejszenia wymiaru ziaren stosuje się maszyny zwane kruszarkami i młynami. Podczas projektowania bądź doboru odpowiedniej kruszarki lub młyna należy się kierować parametrami, takimi jak twardość materiału kruszonego, wydajność, regularność wymiarów ziarna, plastyczność, wilgotność i wiele innych. Rozróżniamy kruszarki i młyny obciążone w sposób ciągły (np. kruszarka walcowa, młyn kulowy) oraz w sposób cykliczny (kruszarka szczękowa) [9].

Obecnie KS Kłodawa pozyskuje sól kamienną, udostępniając ją za pomocą wyrobisk podziemnych, urabiając materiałami wybuchowymi i ładując ładownikami do wozów kopalnianych. Następnie urobek transportowany jest na powierzchnię szybem Michał oraz Barbara. Przyjęta technologia wybierania – a szczególnie urabianie – powoduje, że w urobku pojawiają się zanieczyszczenia metalowe (druć strzelniczy), drewno i papier (przybitka strzelnicza). Zanieczyszczenia te są separowane przez różne urządzenia znajdujące się w ciągu technologicznym w kopalni oraz w zakładzie przerobczym na powierzchni [3]. Okazuje się jednak, że pomimo tych zabiegów w produkcie końcowym pojawiają się zanieczyszczenia, co skutkuje reklamacjami i stratami finansowymi dla kopalni. Stwierdzono konieczność rozwiązania tego problemu poprzez analizę obecnego ciągu technologicznego i zaproponowanie stosownych zmian.

SÓL KAMIENNA I WYMAGANIA DOTYCZĄCE JEJ JAKOŚCI

Surowcem kierowanym do przeróbki mechanicznej jest sól kamienna biała, sól kamienna różowa oraz sól potasowo-magnezowa. Sól kamienna biała średnio i gruboziarnista,

czysta, zawiera do kilku procent anhydrytu. W nieznacznych ilościach występuje też substancja ilasta w formie nieregularnych skupień. Jako zanieczyszczenia akcesoryczne stwierdza się obecność polihalitu, ziaren kwarcu i pirytu, sporadycznie śladów karnalitu i sylwinu. Sól kamienna różowa średnioziarnista ma barwę białą, różową, pomarańczową bądź miodową. Głównym zanieczyszczeniem jest anhydryt oraz w niewielkich ilościach substancja ilasta. Czynnikiem powodującym różowe zabarwienie są chemicznie związki żelaza (karnalitowiec kizerytowy).

Urobek dostarczany do zakładu przerobczego charakteryzuje się różnym składem ziarnowym. Zawartość poszczególnych klas ziarnowych zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład ziarnowy wydobytej soli [4]

Table 1. Grain size distribution of mined salt [4]

Klasa ziarnowa [mm]	% udział frakcji (szyb „Michał”)	% udział frakcji (szyb „Barbara”)
> 150	3,6	2,9
150 – 100	2,8	2,9
100 – 50	7,8	5,7
50 – 10	22,2	15,7
10 – 5	9,5	6,7
5 – 1	20,5	46,3
1 – 0,2	23,6	15,5
< 0,2	10,0	4,4

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Tabela 2. Wymagane parametry soli spożywczej [11]

Table 2. Required parameters of food salt [11]

Parametr	Wartość lub wymóg
Barwa	Biała lub biała o naturalnym odcieniu szarym lub różowym
Zapach	Bez obcego zapachu
Smak	Słony bez obcego smaku zwłaszcza gorzkiego
Wygląd	Produkt krystaliczny
Zanieczyszczenia mechaniczne [%]	Brak
pH 1% roztworu wodnego	6-8
Woda H ₂ O najwyżej [%]	0,5
Substancje nierozpuszczalne w H ₂ O najwyżej w [%]	1,5
Chlorek sodu NaCl co najmniej %	97,0
Zawartość metali ciężkich	Aktualne zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej w sprawie wykazu substancji dodatkowych
Zawartość jodu	Aktualne zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej w sprawie jodowania soli spożywczej

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Produktem przeróbki mechanicznej jest sól kamienna, odpowiadająca wymaganiom ujętym w obowiązującej normie PN-C-84081-2. Natomiast sól potasowo-magnezowa (karnalit) winna spełniać wymagania określone w ZN-KSK-3-2004 [11]. W Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. produkuje

się sól kamienną spożywczą dopuszczoną do sprzedaży na podstawie wyżej wymienionych norm oraz sól przemysłową, paszową, kruchy solne, sól drogową, lizawki solne, sól kąpielową, których parametry chemiczne i fizyczne określone są w normach zakładowych. Zakłada się również sprzedaż soli na podstawie ustaleń kontraktowych.

Sól spożywcza winna spełniać wymagane normą parametry podane w tabeli 2.

PRZERÓBKA MECHANICZNA SOLI KAMIENNEJ I JEJ PRODUKTY KOŃCOWE

Przeróbkę soli w Kopalni Soli „Kłodawa” można podzielić na dwa etapy:

- przygotowanie nadawy do transportu na powierzchnię poprzez wstępne kruszenie i separację zanieczyszczeń w tzw. komorze kruszenia,
- przeróbka właściwa na powierzchni w dwóch zakładach.

Zadaniem maszyn w komorze kruszenia jest wstępne skruszenie soli dostarczonej z pól eksploatacyjnych. Posiada ona dwa bliźniacze ciągi technologiczne: ciąg soli różowej i ciąg soli białej. Obydwa ciągi pracują analogicznie, więc poniżej opisano proces technologiczny tylko jednego ciągu.

Urobek z pól eksploatacyjnych dostarczany jest do komory w wozach kopalnianych o pojemności 2,8 m³ i dalej transportowany jest przy pomocy łańcuchowych układów napędowych do wywrotnicy. Po opróżnieniu wozu urobek przemieszcza się zsuwnią na przenośnik zgrzeblowy typu Samson 67B. W ciągu tego przenośnika wbudowana jest wraz z fragmentem rynny kruszarka I stopnia. Po przejściu przez kruszarkę urobek ten przemieszczany jest tym przenośnikiem na zsuwnię i dalej do kruszarki II stopnia (rys. 4) zabudowanej nad przenośnikiem taśmowym B-1000.



Rys. 4. Wnętrze kruszarki Brieden z widocznymi zanieczyszczeniami.

Fig. 4. The crushing chamber of Brieden crusher with visible contaminations.

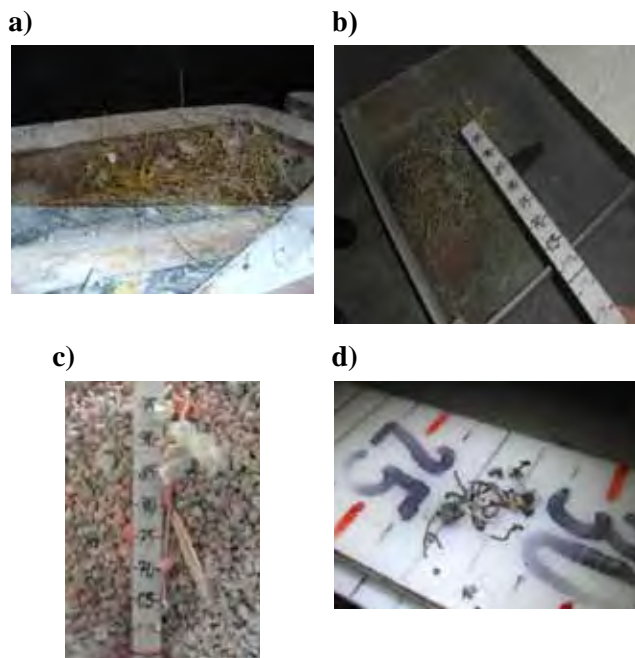
Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Urobek z kruszarki I stopnia o granulacji 0 – 150 mm przemieszczany jest na przenośnik taśmowy B-1000 i transportowany w kierunku zbiornika buforowego. Urobek na

przesypie tego przenośnika natrafia nad bęben separatora elektromagnetycznego.

W trakcie pozyskiwania soli kamiennej powstają znaczne ilości zanieczyszczeń, których głównym źródłem jest sposób eksploatacji. Efektem użycia materiału wybuchowego jest przedostawanie się do urobku fragmentów przewodów strzałowych, kawałów papieru i drewna z przybitki otworów strzelniczych (rys. 5).



Rys. 5. Zanieczyszczenia wydzielane z soli: a) na dole kopalni, b) przez separator nadtaśmowy, c) na przesiewaczu, d) przez prototypowy układ na przenośniku 600.

Fig. 5. Contaminations separated from salt: a) underground in the mine, b) by over-belt separator, c) by screen, d) by a prototype device in conveyor 600.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 6. Widok stanowiska laboratoryjnego wibracyjnej kruszarki szczękowej KWbD o bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego szczęk oraz jej podstawowe parametry.

Fig. 6. Laboratory test standing of vibratory jaw crusher type KWbD with inertial actuation of jaws and its basic parameters.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

W chwili obecnej kopalnia na swoim wyposażeniu ma kilka układów separacji. Pierwszy znajduje się na przesypie przenośnika B-1000 przed zbiornikami buforowymi. Pozostałe układy znajdują się na powierzchni w zakładach przerobczych. Są to separatory nadtaśmowe, separatory magnetyczne rusztowe, rolki magnetyczne, oddzielacze magnetyczne kaskadowe, separatory neodymowe oraz detektory metali [3].

PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ PROCESU KRUSZENIA SOLI

Badania rozdrabniania soli z Kopalni „Kłodawa” zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym wibracyjnej kruszarki szczękowej KWbD (rys. 6) [1, 2, 10]. W skład stanowiska laboratoryjnego wchodzi następujące elementy: zespół zasilania i regulacji prędkości obrotowej silników kruszarek – przetwornik częstotliwości, układ pomiaru poboru mocy – watomierz rejestrujący, układ pomiaru częstotliwości drgań, układ odpylania i oczyszczania powietrza oraz przesiewacz wibracyjny z kompletem sit, waga laboratoryjna, stoper i komplet szczelinomierzy.

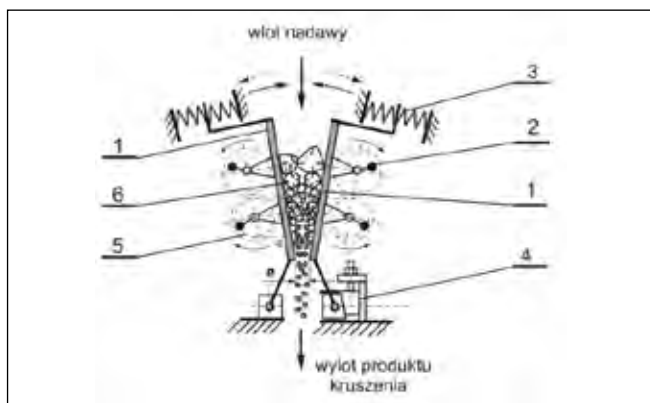
Schemat wibracyjnej kruszarki szczękowej KWbD przedstawiono na rys. 7.

Zespół roboczy kruszarki przedstawionej na rys. 7 stanowi dwie ruchome szczęki 1 zamocowane wahliwie u dołu. Układy sprężyste 3 umożliwiają ruch drgający szczęk [9]. Jedna ze szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej 4. Wały wibratorów sprzężone są przekładnią pasową z pasem zębatym. Ruch obu szczęk zachodzi w sposób przeciwny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub od siebie oddalają. Szczęki kruszarki posiadają wymienną gładką wykładzinę stalową, jednakże istnieje możliwość zamocowania wykładzin ceramicznych. Układ zasilania silnika elektrycznego zapewnia bezstopniową regulację prędkości obrotowej wałów wibratorów, a tym samym częstotliwości drgań szczęk kruszarki. Poprzez zastosowanie wibratorów bezwładnościowych kruszarka nie wymaga

żadnych zabezpieczeń w razie dostania się niekruszalnego materiału do przestrzeni roboczej maszyny. Siła wymuszająca drgania nie zależy bowiem od reakcji rozdrabnianego materiału. Jest to bardzo istotne, gdy materiał kruszony posiada zanieczyszczenia drewniane, metaliczne itp., jak w przypadku soli kamiennej.

Program badań przewidywał przeprowadzenie badań, mających na celu określenie możliwości selektywnego rozdrabniania soli kamiennej. W tym celu przeprowadzono próby kruszenia zanieczyszczonej soli o uziarnieniu powyżej 20 mm – odpad z Kopalni „Kłodawa”. Następnie produkt kruszenia został przesiany przez zestaw sit laboratoryjnych. Na rys. 8 przedstawiono krzywe składu ziarnowego nadawy i produktu kruszenia.

Po przeprowadzeniu analiz sitowych określono wybrane stopnie rozdrobnienia: $i_{50} = 14,5$ oraz $i_{90} = 6,1$. Dodatkowo zauważono, że prawie 100% masy soli zawartej w produkcie kruszenia przechodzi przez sito o wymiarach oczka 10 mm, natomiast na tym sicie zostają odsiane praktycznie wszystkie

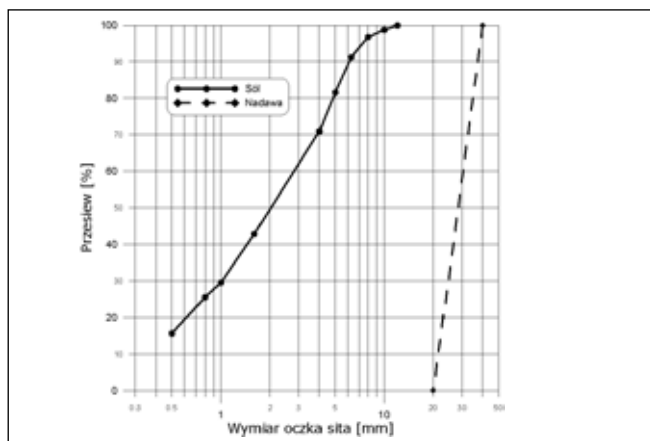


Rys. 7. Schemat wibracyjnej kruszarki szczękowej KWBd o bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego [8].

Fig. 7. Construction diagram of vibratory jaw crusher type KWBd with inertial actuation of jaws [8].

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 8. Wyniki analizy sitowej kruszonej soli przy szczelinie wylotowej $e = 10,0$ mm i częstotliwości drgań szczęk $f = 32$ Hz.

Fig. 8. Results of crushed salt sieve analysis. Crusher parameters: outlet gap $e = 10,0$ mm, jaws oscillation frequency $f = 32$ Hz.

Źródło: Badania własne

Source: The own study



Rys. 9. Poszczególne klasy ziarnowe oraz odseparowane zanieczyszczenia po próbach rozdrabniania soli w kruszarce KWBd.

Fig. 9. Particular grain classes and separated contaminations after crushing rock salt in vibratory jaw crusher KWBd.

Źródło: Badania własne

Source: The own study

zanieczyszczenia. Widok poszczególnych klas ziarnowych po kruszeniu oraz odseparowanych zanieczyszczeń przedstawiono na rys. 9.

PODSUMOWANIE

Badania przeprowadzone w Katedrze Maszyn Górniczych Przeróbczych i Transportowych Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie wykazały pełną przydatność wibracyjnej kruszarki szczękowej do rozdrabniania soli kamiennej. Cechą charakterystyczną tej kruszarki jest konstrukcyjne zabezpieczenie przed uszkodzeniem materiałem niekruszalnym, np. kawałkiem metalu czy drewna. Jest to niewątpliwa zaleta podczas rozdrabniania materiałów z dużą ilością zanieczyszczeń. Analiza sitowa produktu kruszenia wykazała, że 98,7% masy soli przechodzi przez sito o oczkach 10,0 mm. Równocześnie na tym sicie odsiewana jest praktycznie całość zanieczyszczeń. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ciągu technologicznego wydobycia soli w KS Kłodawa wysunięto następujący wniosek: poprzez zastąpienie kruszarki OWD 700 Brieden wibracyjną kruszarką szczękową o bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego oraz odpowiednim układem separacji (przesiewaczem) możliwe jest zmniejszenie ilości zanieczyszczonego odpadu do 1,3% obecnej wartości.

LITERATURA

- [1] BANASZEWSKI T., R. KOBIAŁKA, J. BŁASZKE. 1974. „Badania nad możliwością wykorzystania wibracyjnej kruszarki szczękowej do celów przemysłowych”. Zeszyty Naukowe AGH Kraków, Górniczo, nr 63: 77-86.
- [2] BANASZEWSKI T. Wibracyjna kruszarka szczękowa, Patent PRL nr 69785, 1974.
- [3] FELIKS J., M. MAZUR. 2017. “Safety systems against metallic contaminations in feed material”, Geology and mineral processing, Sofia, Vol. 17 iss. 11: 1043–1050.
- [4] <http://www.sol-klodawa.com.pl>.
- [5] <http://www.mortonsalt.com/salt-production-and-processing>.
- [6] KOŁODZIEJCZYK J. 2011. „Wielkość produkcji i importu soli kamiennej w Polsce w okresie ostatnich pięciu lat (2005-2009)”. Geologia. T. 37, Z. 2: 307-311.
- [7] SIDOR J., J. FELIKS, M. MAZUR. 2013. „Kruszarki do rozdrabniania węgla w warunkach kopalń podziemnych”. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze: przenośniki, dźwignice, pojazdy, maszyny robocze, napędy i sterowanie, urządzenia pomocnicze. Transport Przemysłowy. nr 3: 71–74.
- [8] SIDOR J., M. MAZUR. 2013. „Badania eksperymentalne procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w kruszarkach szczękowych”, Inżynieria i Aparatura Chemiczna. R.523: 235-237.
- [9] SIDOR J. 1997. „Rozwój konstrukcji kruszarek wibracyjnych”. Maszyny Górnicze, Kraków, nr 77: 30–37.
- [10] WOLNY S. 2013. “Dynamic behaviour of a vibrating jaw crusher for disintegration of hard materials”. Archives of metallurgy and materials, vol. 58 iss. 3: 883-886.
- [11] ZN-KSK-3-2004.