

*Zdzisław Naziemiec\*, Daniel Saramak\*\**

## ANALIZA ZMIAN OBCIĄŻENIA MATERIAŁU W STREFIE ZGNIOTU PRAS WALCOWYCH

---

### 1. Wstęp — podstawy procesu rozdrabniania z użyciem pras walcowych

Technologia rozdrabniania przy użyciu wysokociśnieniowych pras walcowych (HPGR) jest znana mniej więcej od lat 80-tych ubiegłego stulecia. Znajduje ona szerokie zastosowanie w przemyśle cementowym (rozdrabnianie klinkieru) i wapienniczym (przemiał wapieni na mączki), a od kilku lat także w przeróbce rud żelaza i metali nieżelaznych oraz diamentów. Jest to technologia konkurencyjna z ekonomicznego punktu widzenia przede wszystkim ze względu na znacznie mniejsze zużycie energii elektrycznej, o 10÷30% [7], niższe koszty eksploatacji i inwestycji [4] oraz wysoką skuteczność procesu, w porównaniu z tradycyjnymi urządzeniami rozdrabniającymi (młyny AG lub SAG).

Zasada działania prasy walcowej jest podobna do działania kruszarki walcowej, jednak główna różnica polega na innym systemie wywierania nacisku przez rolki robocze na rozdrabniany materiał. W kruszarce dwuwalcowej rozdrabnianie dokonywane jest pomiędzy dwoma obracającymi się w przeciwnych kierunkach walcami. Jeden z walców jest ułożyskowany przesuwnie w ten sposób, że jego łożyska oparte są o sprężyny. Sprężyny te działając na łożysko ruchome, a zatem i na ułożyskowany w nich walec, dociskają go w kierunku walca nieprzesuw nego. Działanie to jest ograniczone w ten sposób, że pomiędzy walcami istnieje szczelina, której minimalna szerokość pozostaje stała. Jeżeli siła zgniatająca wzrośnie ponad siłę określoną wstępnym ugięciem sprężyn, wówczas walec przesuwny odsuwa się od nieprzesuw nego, zabezpieczając w ten sposób kruszarkę przed uszkodzeniem. Natomiast w prasie walcowej nacisk na rozdrabniany materiał wywierany jest za pomocą odpowiednich siłowników hydraulicznych, dociskających jedną z rolek — rolę przesuw ną.

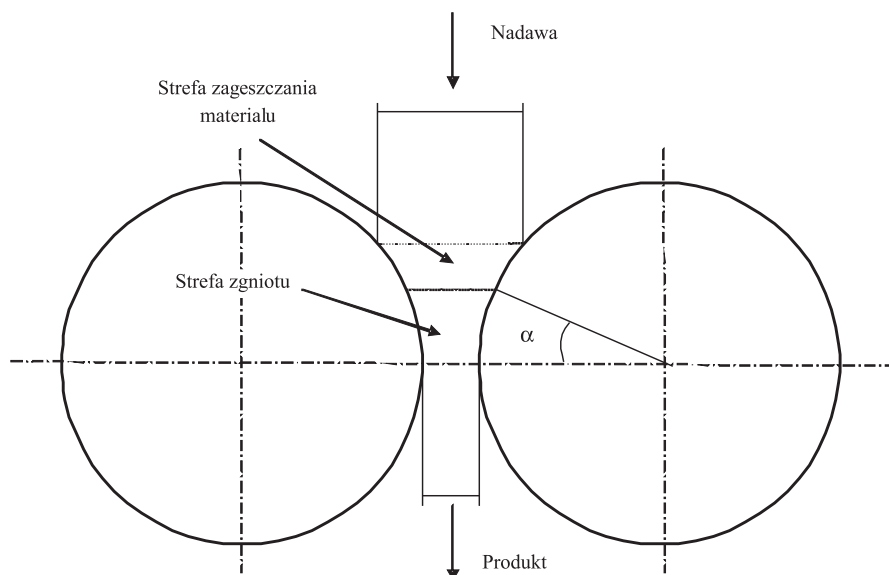
---

\* Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych, Oddział Mineralnych Materiałów Budowlanych, Kraków

\*\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Uzyskuje się w ten sposób o wiele większe naciski. W pierwszych egzemplarzach pras walcowych drugiej generacji, które pojawiły się w roku 1985, ciśnienie prasowania warstwy klinkieru wynosiło  $40\pm 100$  MPa. Już w roku 1989 pojawiła się konstrukcja prasy zdolnej zgniatać warstwę materiału ciśnieniem do 200 MPa.

Obie rolki prasy mają identyczne wymiary i podczas pracy obracają się z identyczną prędkością, co jest osiągnięte poprzez zastosowanie osobnych napędów rolek i odpowiednią synchronizację. Parametrami ustawianymi niezależnie przez operatora są ciśnienie robocze oraz prędkość obrotu rolek. Pozostałe parametry pracy urządzenia (np. szczelina robocza, moment skręcający, skośność rolek, przerób właściwy, energochłonność jednostkowa) oraz główne parametry procesu rozdrabniania z użyciem urządzenia (np. przerób czy wielkość strumienia zawrotu), można w mniej lub bardziej skomplikowany sposób przedstawić jako zależności funkcyjne ciśnienia lub/i prędkości.



**Rys. 1.** Schemat rozdrabniania materiału w prasie walcowej

Niektórzy autorzy [5, 11] w procesie zgniatania materiału w prasie walcowej wyróżniają kilka etapów:

- etap wstępnego zagęszczania warstwy. W etapie tym ziarna przemieszczają się względem siebie, aż do zaniku takiej możliwości. Wówczas warstwa materiału staje się coraz bardziej stabilna i podatna na przenoszenie sił zgniatania od powierzchni wałków do wewnątrz;
- etap deformacji. Ziarno zgniata ziarno w efekcie czego uzyskuje się rozdrobnienie materiału do określonego składu ziarnowego;

- etap prasowania warstwy. Przebiega on w obszarze największego zbliżenia rolek. Nawet jeżeli nie powstają już nowe ziarna wskutek rozdrobnienia, to wysokie ciśnienie wywołuje efekty mikrospękania w ziarnach materiału. Defekty te ujawnią się w młynie domielającym, gdyż sprasowany materiał charakteryzuje się o wiele większą podatnością na rozdrabnianie (niższy wskaźnik Bonda  $W_i$ ).

## 2. Podstawowe parametry oceny efektywności pracy pras walcowych

Znane są podstawowe zależności charakteryzujące proces rozdrabniania w prasach walcowych [1–3, 6]:

- pobierana moc urządzenia  $P$  [W]

$$P = T \cdot \omega = \frac{F \cdot L \cdot v}{R} \quad (1)$$

gdzie:

- $T$  — moment skręcający, kNm,
- $\omega$  — prędkość kątowna,
- $F$  — siła docisku rolki przesuwnej, kN,
- $L$  — długość dźwigni, m,
- $v$  — prędkość obrotu rolek, m/s,
- $R$  — promień rolki, m;

- wydajność urządzenia  $W$  [t/h]

$$W = s \cdot l \cdot v \cdot \rho_p \quad (2)$$

gdzie:

- $s$  — szczelina robocza,
- $l$  — szerokość robocza rolki,
- $\rho_p$  — gęstość produktu rozdrabniania w prasie (materiału sprasowanego);

- wydajność właściwa  $W_{sp}$  [ts/hm<sup>3</sup>]

$$W_{sp} = \frac{W}{D \cdot l \cdot v} \quad (3)$$

gdzie  $D$  oznacza średnicę rolki;

— siła nacisku wywierana przez przesuwą rolę prasy  $F$  [kN]

$$F = \frac{d^2 \pi}{4} n \cdot P_h \quad (4)$$

gdzie:

$d$  — średnica tłoka dociskającego rolę przesuwą, m,

$n$  — liczba tłoków dociskających rolę,

$P_h$  — ciśnienie hydrauliczne wywierane na tłoki siłownika, kPa.

Najważniejszym parametrem pracy prasy jest jednak nacisk właściwy  $F_{sp}$  wywierany przez rolki prasy na rozdrabniany materiał, wyrażony w [N/mm<sup>2</sup>]:

$$F_{sp} = \frac{F}{1000 \cdot D \cdot l} \quad (5)$$

Jest to bardzo wygodny parametr, ponieważ dzięki niemu można porównywać ze sobą różne urządzenia. Zatem im wyższa jego wartość dla danego urządzenia, tym większe siły nacisku można osiągnąć podczas procesu rozdrabniania.

Zauważmy, że we wzorze (5) nacisk właściwy jest obliczany średnio na całą powierzchnię roboczą rolek prasy walcowej. Podczas procesu rozdrabniania natomiast, materiał jest kruszony tylko na pewnej części powierzchni rolek (rys. 1), zatem wzór (5) podaje w pewnym sensie umowną wartość nacisku właściwego. Wynika stąd wniosek, że rzeczywista wartość maksymalnego nacisku wywieranego przez rolki prasy na rozdrabniany materiał nie jest znana, i aby ją obliczyć trzeba skorzystać z innego wzoru. Łatwo to zauważyć dokonując prostych obliczeń. Mianowicie, przemysłowe prasy walcowe osiągają wartości nacisków właściwych średnio od 3 do 5 [N/mm<sup>2</sup>], co odpowiada naciskowi 3 do 5 [MPa]. Wytrzymałość na ściskanie surowców skalnych jest natomiast znacznie wyższa, np. piaskowce posiadają wytrzymałość na ściskanie rzędu 80÷150 MPa, wapienie od 50 do 120 MPa, diabazy od 180 do 200 MPa, porfiry 150÷200 MPa. Natomiast jeżeli we wzorze (5) uwzględnimy tylko tę rzeczywistą część z całkowitej powierzchni roboczej rolek, w kontakcie z którą następuje właściwe zgniatanie materiału, to wartość  $F_{sp}$  będzie odpowiednio większa. Właściwe zgniatanie materiału odbywa się w tzw. strefie zgniotu, którą zaznaczono na rysunku 1, za pomocą kąta  $\alpha$ . Strefa ta zajmuje tylko pewną część przestrzeni pomiędzy obracającymi się rolkami prasy. W odniesieniu do całkowitej powierzchni roboczej rolek stanowi ona tylko niewielką część, z całkowitego obwodu, dlatego została opisana za pomocą wymienionego kąta  $\alpha$ . We wzorze (5) można zatem wprowadzić dodatkowy parametr uszczegółwiający, mianowicie wartość wymienionego kąta alfa, jeśli chcielibyśmy wyznaczyć rzeczywistą wartość siły nacisku.

Rzeczywista wartość nacisku wywieranego przez rolki na rozdrabniany materiał jest ważna nie tylko w aspekcie poznania zachodzących procesów, ale również posiada bardzo istotny aspekt praktyczny. Jak to już wcześniej podawano, z prasy walcowej uzyskuje się rozdrobniony materiał, którego istotną cechą jest większą podatność na rozdrabnianie. Z danych literaturowych oraz materiałów katalogowych producentów pras wynika, że dla

wielu rud następuje zmniejszenie wskaźnika  $W_i$  (*Work Index*) o około 10÷25%. We wcześniejszych badaniach przy przemiale wapieni w prasach walcowych, dla produktu uzyskiwano obniżenie wskaźnika  $W_i$  o 35%. Z uwagi na to, że z prasy walcowej uzyskuje się znaczną ilość ziarn o wymiarach rzędu kilku mm, rozpatrywano możliwość uzyskania z niej drobnych kruszyw, stosowanych w budownictwie. Dla produktu otrzymywanego z prasy walcowej, którym był rozdrobniony wapień dewoński, przeprowadzono ocenę podatności na rozdrabnianie w bębnie Los Angeles. Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań przeprowadzonymi dla kruszyw uzyskiwanych po procesie rozdrabniania w kruszarkach stożkowych. Dla frakcji wapienia 4/8 po kruszarce stożkowej uzyskano wskaźnik  $LA = 28$ . Dla frakcji wapienia 4/8 mm po prasie walcowej wskaźnik  $LA$  wynosił 50. Taka wartość oczywiście przesądziła o nieprzydatności badanego kruszywa do celów budowlanych. Wskazuje ona równocześnie na bardzo wysokie naciski, jakim poddawany jest materiał pomiędzy rolkami prasy.

### 3. Przegląd literatury

W literaturze nie ma wielu badań na temat wyznaczania rzeczywistej maksymalnej siły nacisku w prasach walcowych. Schonert podaje wzór [9]:

$$P_{\max} = \frac{F_{sp}}{k \cdot \alpha} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

gdzie:

- $k$  — stała materiałowa (0,18÷0,23),
- $\alpha$  — kat dla strefy zgniotu (6÷10°).

Autorzy wprowadzają tutaj omawiany wyżej kąt  $\alpha$  oraz pewną wartość determinującą rozdrabniany materiał. Charakterystyka materiału odgrywa tutaj znaczącą rolę, ale trudno ją jednoznacznie określić ze względu na powszechnie znaną jego cechę, jaką jest zmienność i losowość (np. [12])). Skutkuje to także losowym (nieidealnym) sposobem ułożenia materiału w strefie zgniotu urządzenia. Poprzez nie idealne ułożenie rozumieć należy powstawanie znacznych pustych przestrzeni pomiędzy poszczególnymi ziarnami, co powoduje, że wywołana przez prasę siła nacisku jest częściowo rozpraszana na stopniowe upakowywanie ziaren materiału podczas obrotu walców i nie występują dodatkowe efekty rozdrabniania w postaci mikropęknięć pojedynczych ziaren.

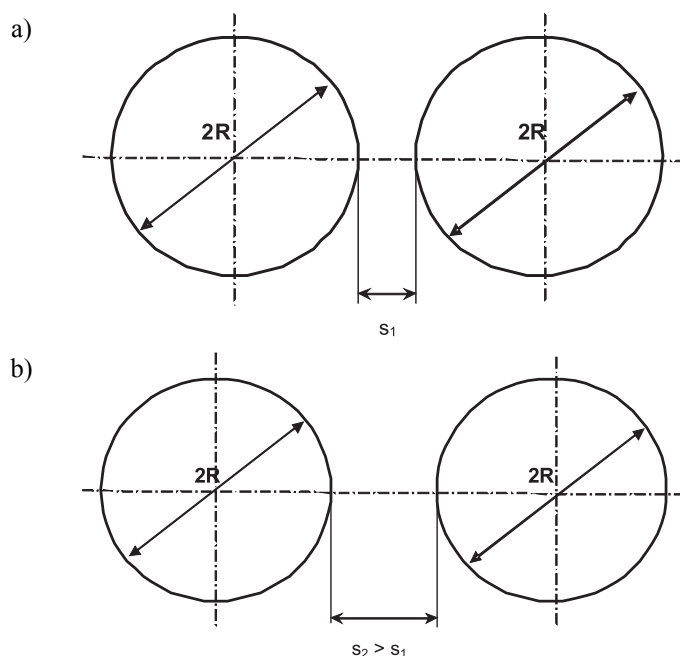
Z kolei Neumann [5] podaje następujący wzór na wartości nacisku maksymalnego:

$$P_{\max} = c \frac{F}{\sqrt{s}} \quad (7)$$

gdzie:

- $c$  — stała zależna od urządzenia oraz właściwości materiału,
- $F$  — siła docisku rolki przesuwnej, kN,
- $s$  — szczelina robocza.

Wzór powyższy nie uwzględnia relacji pomiędzy średnicą rolki a wielkością szczeliny  $s$ . Z rysunku 2 wynika natomiast, że przy zmiennej relacji szczeliny  $s$  do średnicy rolek  $D = 2R$ , zmienia się także stopień upakowania materiału. Stopień upakowania (zagęszczenia) materiału będzie większy dla przypadku pokazanego na rysunku 2a, dla którego stosunek  $\frac{s_1}{2R + s_1}$  jest mniejszy, niż  $\frac{s_2}{2R + s_2}$ . Struga nadawy ulegnie tu większemu sprasowaniu, a tym samym można się spodziewać, że wystąpią tu większe ciśnienia, niż w sytuacji przedstawionej na rysunku 2b.



**Rys. 2.** Wpływ relacji szerokości szczeliny  $s$  do średnicy  $2R$  na stopień upakowania materiału w prasie walcowej

Unland [13] podaje natomiast empiryczny wzór, który po prostych przekształceniach można przedstawić za pomocą równania (8), z którego można oszacować szukaną wartość ciśnienia maksymalnego:

$$P_{\max} = \frac{F_{sp}}{D \cdot l \cdot \sqrt{2 \frac{s}{D} \left( \frac{\rho_p}{\rho_n} - 1 \right)} \cdot c} \quad (8)$$

gdzie:

- $s$  — szczelina, mm,
- $\rho_n$  — gęstość nasykowa nadawy, kg/l,
- $\rho_p$  — gęstość produktu (materiału sprasowanego), kg/l.

Wzór (8) pozwala zdefiniować wartość szukanego nacisku maksymalnego jako funkcję wielkości szczeliny, siły docisku rolki oraz gęstości materiału przed i po rozdrabnianiu w prasie. Dla badanego typu materiału gęstość nadawy będzie stała, zmieniać się natomiast będzie gęstość materiału sprasowanego. Przebadano przykładowo gęstości sprasowanego materiału dla kilku typów surowców i uzyskano dla wapienia gęstość 2,19 kg/l, dla rud miedzi 2,7. Zatem przy stałym ciśnieniu produkt rozdrabniania dla surowców skalnych będzie miał nieco mniejsze gęstości niż analogiczny produkt dla rud.

Inni Autorzy [8, 10] uwzględniają we wzorze na maksymalne ciśnienie parametr  $\varphi$ , opisujący charakterystykę podatności badanego materiału na kompresje. Wzór (8) przyjmuje wtedy postać:

$$P_{\max} = \frac{F_{sp}}{D \cdot l \cdot \varphi \sqrt{\frac{s}{D}}} \quad (9)$$

Feige [2] w swoich badaniach nad siłami nacisku na materiał rozdrabniany w kruszarkach walcowych podaje następujący wzór na nacisk maksymalny:

$$P_{\max} = \frac{2F_r}{l \cdot L} \quad (10)$$

gdzie

$F_r$  — siła nacisku wyrażona wzorem:

$$F_r = l \cdot \frac{D}{2} \int_{\alpha} F_{sp}(\alpha) d\alpha$$

$L$  — głębokość działania siły nacisku w warstwie materiału w przestrzeni między walcami.

Autor długość działania tej siły określa jako funkcje średnic walców  $R$  i rozmiaru ziarna charakterystycznego  $d_k$ :

$$L = f(D, d_k) \cong \frac{\sqrt{d_k(2D + d_k)}}{2} \quad (11)$$

## 4. Próba wyznaczenia rzeczywistego nacisku maksymalnego

### 4.1. Nacisk maksymalny jako funkcja kąta $\alpha$

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że obliczona maksymalna siła nacisku będzie funkcją kąta określającego strefę zgniotu (prasowania) warstwy nadawy oraz charakterystyki rozdrabnianego materiału. Z uwagi na wspomnianą wyżej cechę materiału, jaką jest jego losowość i zmienność, określenie w funkcji opisującej ciśnienie maksymalne zmiennej niezależnej związanej z materiałem jest skomplikowane. Z kolei analiza literatury dokonana w poprzednim paragrafie wskazuje, że w dotychczasowych badaniach szacowania nacisku maksymalnego w strefie zgniotu prasy, we wzorach były wprowadzane współczynniki charakteryzujące materiał. Poniższe rozważania zostały zatem przeprowadzone dla następującego założenia: upakowanie materiału w komorze roboczej jest poprawne, zbliżone do idealnego. W warunkach przemysłowych można to osiągnąć poprzez odpowiednie przygotowanie nadawy a pomijając aspekt upakowania materiału w dalszych rozważaniach, zagadnienie stanie się prostsze, jednocześnie w dalszym ciągu będą poprawnie ujmować przedmiot sprawy.

Analizowana strefa zgniotu materiału zależy od wartości kąta  $\alpha$ . Jak łatwo to zauważyć, im mniejszy kąt, tym większe wartości ciśnienia maksymalnego w prasie otrzymuje się na podstawie obliczeń. W literaturze można spotkać dane mówiące, że wartość owego kąta waha się od  $2\div 4$  do nawet  $8\div 10^\circ$ . Proponuje się następujący wzór opisujący wartość maksymalnego ciśnienia:

$$P_{\max} = \frac{F}{1000 \cdot D \cdot l \cdot \pi \frac{\alpha}{360}} = \frac{F_{sp}}{\pi \frac{\alpha}{360}} \quad (12)$$

gdzie  $\alpha$  jest kątem określającym strefę zgniotu [ $^\circ$ ].

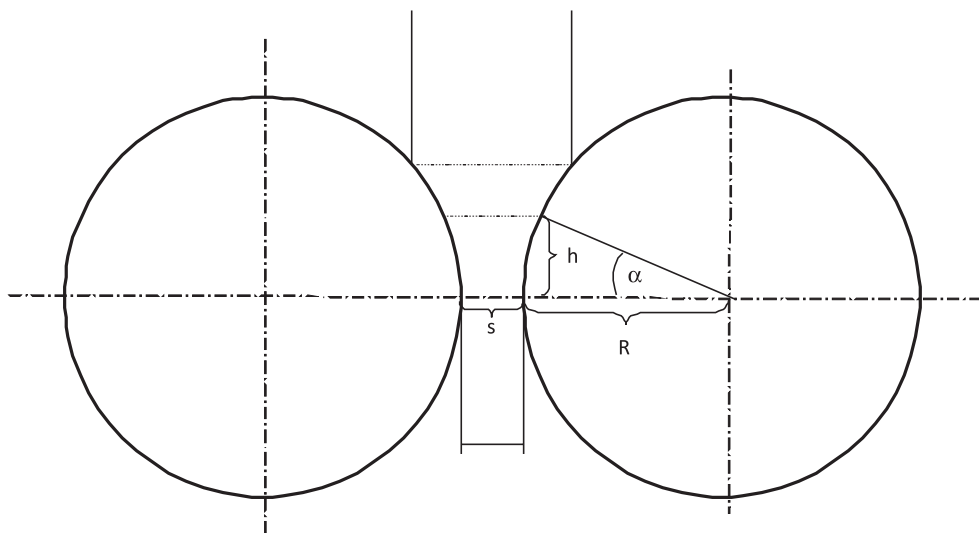
Z punktu widzenia geometrii urządzenia, można stwierdzić, że kąt opisujący strefę zgniotu ma stałą wartość, niezależną od promienia rolek. Dlaczego? Otóż biorąc pod uwagę fakt, że rolki mają przekrój kołowy oraz stała jest relacja szerokości szczeliny do promienia rolki, można na podstawie prostych zależności geometrycznych wywnioskować, że kąt ten nie będzie się zmieniał. Z kolei na podstawie praktycznych zastosowań przemysłowych oraz zaleceń konstrukcyjnych dla walcowych urządzeń rozdrabniających wartość szczeliny stanowi około od 1,5 do 2,5% wartości średnicy rolek. W takim ujęciu zagadnienia, wystarczy wyznaczyć wartość kąta dla strefy zgniotu, aby móc dokładnie określić wartość ciśnienia maksymalnego.

Wiadomo [5] (wyniki różnych testów publikowane przez czołowych producentów pras np. Koepfer, Polysius), że wartość ciśnienia rośnie gwałtownie w strefie zgniotu oraz rów-



nie szybko maleje po przekroczeniu przez materiał strefy dla kąta  $\alpha$  zero stopni. Ciśnienie w strefie zgniotu wywoływane jest przez tłoki dociskające przesuwą rolę oraz przez zmniejszanie się objętości strefy zgniotu w miarę ruchu obrotowego rolek. Z kolei w momencie, w którym zmiany objętości strefy zgniotu będą bliskie zero, wartość ciśnienia osiągnie maksimum. Należałoby zatem wyznaczyć zmiany objętości strefy zgniotu, lub zmiany jej powierzchni w przekroju poprzecznym, aby znaleźć punkt, w którym osiągną one wartości bliskie zero. Jest to rozumowanie zgodne z dotychczasowymi rozważaniami spotykanymi w literaturze, gdzie strefę zgniotu określa się, jako obszar największego zbliżenia do siebie rolek podczas pracy urządzenia. Aby znaleźć dla jakiego kąta  $\alpha > 0$ , minimalne odległości między rolkami ulegają najmniejszym zmianom, prześlędzone zostały zmiany powierzchni w strefie zgniotu, w zależności od wartości tego kąta.

Począwszy od wartości  $\alpha = 0$ , odległość między rolkami jest najmniejsza. W miarę zwiększania się wartości kąta o stałą wartość, pole przekroju poprzecznego będzie się zwiększać, a wartości przyrostów na samym początku będą w przybliżeniu stałe. Przy zwiększaniu wartości kąta o kolejne jednostki warstwa strefy zgniotu będzie wyższa, i zaczynają być widoczne zmiany w odległości między rolkami, co znajdzie swoje odbicie w zwiększaniu się przyrostów pola przekroju poprzecznego (rys. 3). Szukana wartość kąta, od której przyrosty pola zaczną się gwałtownie zwiększać, będzie określała granicę strefy zgniotu. Należy mieć jednak świadomość faktu, iż precyzyjne wyznaczenie granicy strefy zgniotu może się okazać bardzo umowne.



Rys. 3. Powierzchnia przekroju poprzecznego strefy zgniotu jako funkcja kąta  $\alpha$

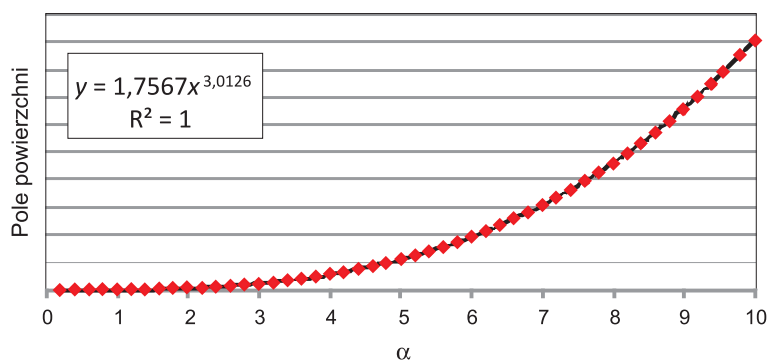
Oznaczenia potrzebne do wykonania obliczeń zostały przedstawione na rysunku 3.

Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń matematycznych pole przekroju poprzecznego strefy zgniotu  $S_p$  można zapisać w następującej postaci:

$$S_p(\alpha) = R^2 \operatorname{tg} \alpha - 2\pi R^2 \frac{\alpha}{360} + s \cdot R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \alpha \quad (13)$$

gdzie  $s$  — szerokość szczeliny.

Na rysunku 4 został przedstawiony graficzny przebieg funkcji opisanej wzorem (13) dla zakresu wartości kąta  $\alpha$  od 0 do 10° (przy stałej wartości  $s$ ). Dla tego samego zakresu została dokonana aproksymacja zależności za pomocą funkcji potęgowej. Błąd dopasowania wynosi zero, co oznacza, że dopasowanie jest idealne.



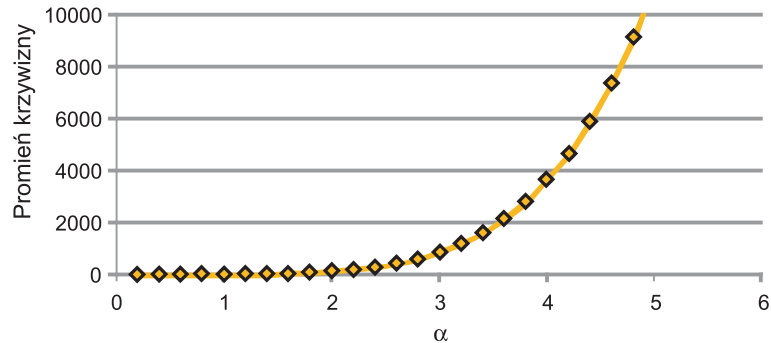
**Rys. 4.** Graficzna ilustracja przebiegu funkcji pola przekroju poprzecznego strefy zgniotu w zależności od wartości kąta  $\alpha$  oraz dopasowanie za pomocą funkcji potęgowej

Analizując rysunek 4 można zauważyć, że dla wartości kąta  $\alpha$  bliskich zero, pole powierzchni wzrasta powoli, i dopiero po przekroczeniu pewnej wartości pole to zwiększa się szybciej. Zmiana charakteru przebiegu funkcji może być opisana poprzez analizę jej promienia krzywizny, można bowiem przypuszczać, że w miejscu, od którego zaczynają się szybsze przyrosty wartości pola będzie także obserwowana zmiana wartości promienia krzywizny krzywej. Promienie krzywizny zostały obliczone empirycznie dla wartości kąta  $\alpha$  od 0 do 10 stopni, co 0,2°. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabeli 1 oraz na rysunku 5.

TABELA 1

**Długości promienia krzywizny funkcji pola strefy zgniotu obliczone dla wybranych wartości kąta  $\alpha$**

Wartość kąta $\alpha$	Długość promienia krzywizny
0,4	0,61 (minimum)
1	4
2	113
3	861

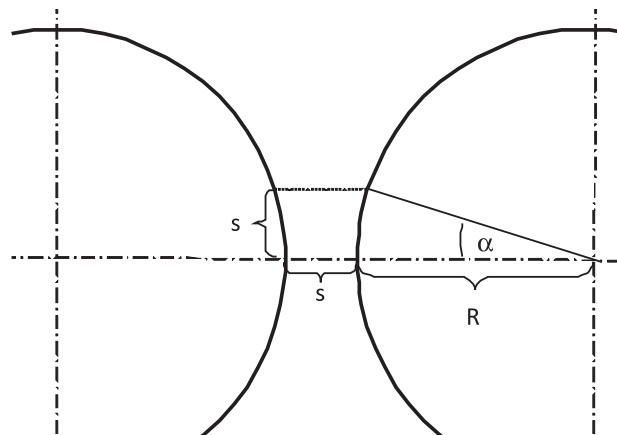


**Rys. 5.** Zmiana wartości promienia krzywizny dla funkcji pola powierzchni przekroju poprzecznego strefy zgniotu w zależności od wartości kąta  $\alpha$

Minimalna wartość promienia krzywizny (rys. 5) wynosi 0,61 dla kąta  $\alpha = 0,4^\circ$ . Na podstawie otrzymanych wyników można zatem stwierdzić, że strefa maksymalnego nacisku występuje dla wartości kąta  $\alpha$  do  $0,4^\circ$ , natomiast analizując przyrosty promienia krzywizny można z dużą dokładnością przyjąć, że granica tej strefy leży w obszarze, dla którego kąt  $\alpha$  wynosi od 1 do  $2^\circ$ .

#### 4.2. Nacisk maksymalny jako funkcja szerokości szczeliny roboczej urządzenia

Jak już podano wcześniej, w prasie walcowej relacja szerokości szczeliny roboczej do średnicy (statycznej) rolki jest w przybliżeniu stała. Niemniej jednak na podstawie danych literaturowych widać, że wielkość szczeliny także pojawia się we wzorach na nacisk maksymalny (np. wzory (7)–(9)). Można zatem następująco określić strefę zgniotu, używając jako zmiennej niezależnej szerokość szczeliny  $s$ : będzie to obszar pomiędzy rolkami prasy o wysokości równej szerokości szczeliny i podstawie leżącej na prostej łączącej środki rolek (rys. 6).



**Rys. 6.** Strefa zgniotu wyznaczona przy uwzględnieniu szerokości szczeliny prasy

Wzór określający kąt strefy maksymalnego nacisku w zależności od szerokości szczeliny będzie miał zatem postać:

$$\sin \alpha = \frac{s}{R}, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{s}{R}\right) \quad (14)$$

Szczelina robocza prasy walcowej wynosi od 2 do 2,5% wartości średnicy rolki. Dla tak przyjętych wartości przeprowadzone zostały poniższe obliczenia:

$$\text{dla } s = 2\% \cdot D, \quad \alpha = 2,29^\circ,$$

$$\text{dla } s = 2,5\% \cdot D, \quad \alpha = 2,87^\circ.$$

Należy pamiętać, że w takim ujęciu zagadnienia istotne są wyniki badań nad relacją szerokości szczeliny prasy do średnicy jej rolek. W przypadku przyjęcia innej wartości dla wymienionej relacji  $s/D$ , wartość kąta  $\alpha$  ulegnie zmianie.

Z powyższych obliczeń wynika, że strefa maksymalnego zgniotu wynosi około  $3^\circ$ . Wyniki te są zbliżone do otrzymanych w podrozdziale 4.1 gdzie strefa maksymalnych nacisków jest określona kątem  $\alpha$  równym niecałe  $2^\circ$ .

Dla przykładu podano obliczenie maksymalnego nacisku wywieranego na materiał przechodzący pomiędzy rolkami prasy walcowej, dla warunków pracy w przemiałowni wapieni. Przyjęto następujące wartości wejściowe według podanych w artykule oznaczeń:

$$D = 1000 \text{ mm},$$

$$l = 1000 \text{ mm},$$

$$d = 0,23 \text{ m},$$

$$n = 4,$$

$$P_h = 195 \text{ bar} = 19\,500 \text{ kPa},$$

$$\alpha = 2,87.$$

Na podstawie wzoru (4) otrzymujemy:

$$F = \frac{(0,23)^2 \pi}{4} 4 \cdot 19\,500 = 3240 \text{ kN}.$$

Dla takiej siły nacisku ciśnienie maksymalne obliczamy na podstawie wzoru (12):

$$P_{\max} = \frac{3240}{1000 \cdot 3,141 \cdot \frac{2,87}{360}} = 129 \text{ MPa}$$

Jest to odpowiednie ciśnienie, zważywszy, że w prasie tej rozdrabniany jest wapień o wytrzymałości na ściskanie nie przekraczającej 120 MPa.

## 5. Podsumowanie

Prasy walcowe są urządzeniami, które znajdują coraz większe zastosowanie w procesach rozdrabniania surowców skalnych i rud. Główną ich zaletą jest mniejsza energochłonność procesu rozdrabniania, niż w innych urządzeniach rozdrabniających. O efektywności ich pracy decyduje bardzo wiele czynników, jak chociażby ciśnienie wywierane przez rolki na materiał, ukształtowanie powierzchni roboczej rolek, sposób podawania materiału, ilość zawracanego materiału i inne. W artykule szczególną uwagę zwrócono na obliczenie maksymalnych rzeczywistych nacisków, jakie są wywierane na materiał rozdrabniany w prasie walcowej. Jakkolwiek przytoczono tutaj różne dane z literatury, stwierdzić należy, że w tym zakresie jest stosunkowo mało badań. Rzeczywiste naciski jakie występują w warstwie prasowanego materiału mają zasadniczy wpływ nie tylko na rozdrobnienie materiału w prasie ale także na poprawę jego podatności na mielenie, co przynosi efekt w urządzeniach domielających, np. młynach kulowych. Ustalenie rzeczywistych nacisków wywieranych na materiał przechodzący między rolnkami prasy może być pomocne przy ustaleniu optymalnych warunków ich pracy. W prasach walcowych rozdrabniane są różne surowce mineralne, poczynając od miękkich wapieni o wytrzymałości na ściskanie rzędu 40 MPa do rud i skał magmowych o wytrzymałości powyżej 200 MPa. Ustalenie optymalnych warunków pracy jest zbieżne z podstawową zasadą przeróbki: nie rozdrabniać niczego nie potrzebnie. Stosowanie zbyt dużych nacisków posiada ujemne strony, z uwagi na trudności w rozbiciu sprasowanego materiału w dezaglomeratorze. Z praktyki przemysłowej znane są przypadki, kiedy zjawisko to utrudniało uzyskanie pożądanej ilości mączek gruboziarnistych w separatorze pracującym za prasą walcową.

W artykule omówiono dwa sposoby ustalenia maksymalnych nacisków występujących w prasie. Pierwszy oparty jest na rozważaniach teoretycznych związanych z zależnościami geometrycznymi opisującymi strefę zgniotu pomiędzy rolnkami prasy. Drugi, bardziej praktyczny (empiryczny) oparty na ustaleniu stopnia upakowania (zagęszczenia) materiału pomiędzy rolnkami prasy. Dla obu zaproponowanych metod otrzymano zbieżne wyniki. Co więcej, wyniki te zgadzają się z danymi literaturowymi.

Prezentowane zagadnienia stanowią wstępny etap prac, których celem jest określenie stopnia zagęszczenia materiału w strefie zgniotu pomiędzy walcami prasy i ustalenie czynników, które mają decydujący wpływ na omawiane zjawiska. Przewiduje się, że ustalenie stopnia zagęszczenia materiału pozwoli na bardziej precyzyjne ustalenie maksymalnych nacisków, jakim poddawany jest materiał w prasie walcowej.

### LITERATURA

- [1] *Bearman R.*: High-Pressure Grinding Rolls — Characterising and defining process performance for engineers. 3rd International Symposium Advances in Comminution, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2006
- [2] *Feige F.*: Measurement of pressure acting on layer of particle between two rollers. *Aufbereitungs-Technik* 30 (1989), nr 10, 1989
- [3] *Morley C.*: High-Pressure Grinding Rolls — A technology review. 3rd International Symposium Advances in Comminution, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2006

- [4] *Morrell S.*: A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilization efficiency. *Minerals Engineering*, vol. 21, issue 3, 2008, pp. 224–233
- [5] *Neumann E.W.*: Some basics on High Pressure Grinding Rolls. 3rd International Symposium Advances in Comminution, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2006
- [6] Polysius Research Centre: High-Pressure grinding tests on Copper/Gold/Molybden ore from the Morrison Project. British Columbia, Canada, 2007
- [7] *Rule C.M., Minnarr D.M., Sauremann*: HPGR — revolution in Platinum? Third International Conference „Platinum in Transformation”, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008
- [8] *Schmitz T.*: Modellierung der Zerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühle und Verknüpfung mit dem Schuttgutverhalten zur Voraussage kritischer Betriebszustände. Dissertation TU Clausthal, 1993
- [9] *Schonert K., Lubjuhn U.*: Throughput of high compression roller mills with plain and corrugated rollers. Proceedings of 7th European Symposium on Comminution, pp 213–217, 1990
- [10] *Schwechten D.*: Trocken-und Nassmahlung sproeder Materialien in der Gutbett-Walzenmühle. Dissertation TU Clausthal, 1987
- [11] *Sjewostjanow W.S., Platonow W.S., Bogdanow W.S., Romanowicz A.A.*: Energobieregajuszczije pomolnyje komplekxy c Press-wałkowymi izmielczitjelioami. *Cjemjent* 1992, nr 1
- [12] *Tumidajski T., Saramak D.*: Metody i modele statystyki matematycznej w przeróbce surowców mineralnych. Wyd. AGH. Kraków, 2009
- [13] *Unland G., Kleeberg J.*: The normal load on roll surfaces of high pressure grinding rolls. Proceedings of XXIII International Mineral Processing Congress, Istanbul, 2006