

*Jan Zawada**, *Konstanty Chochot**

O NOWYCH ELEMENTACH MECHANIKI PROCESU KRUSZENIA — PROBLEM OBCIĄŻEŃ (NA PRZYKŁADZIE KRUSZARKI DŹWIGNIOWEJ BLAKE'A)

1. Wstęp

Do rozwoju kruszarek szczękowych, jak również innych maszyn rozdrabniających, w niewielkim stopniu przyczyniła się mechanika procesów kruszenia. Znany badacz tych procesów H. Rumpf napisał w [1] „Rozdrabnianie maszynowe zostało zastosowane w praktyce przed naukowym poznaniem procesów i zostało dziś rozbudowane na szeroką skalę bez pełnych podstaw naukowych. Technika rozdrabniania wielu tysięcy spotkanych w praktyce przemysłowej surowców rozwinęła się w sposób empiryczny”.

Należy dodać, że dalszy postęp tej techniki jest związany niewątpliwie z rozwojem mechaniki procesów jako dyscypliny naukowej.

Rozwój ten polega na rozwiązywaniu wielu problemów teoretycznych (modelowanie procesów określanie energii rozdrabniania, obciążeń granicznych, warunków tarcia w przestrzeni roboczej, kształtowanie przestrzeni roboczej itd.), jak również na badaniach doświadczalnych opartych na nowoczesnej technice eksperymentalnej [2]. Istnieje, co prawda, dość bogata wiedza fenomenologiczna na temat kruszarek szczękowych, ale jej miarodajność jest dyskusyjna w wielu wypadkach. Ponadto wiedza ta uwzględnia głównie kontekst technologii, a więc np. jakość produktu czy teorię krzywych uziarnienia. Natomiast kontekst mechaniki jest słabo uwidoczniiony.

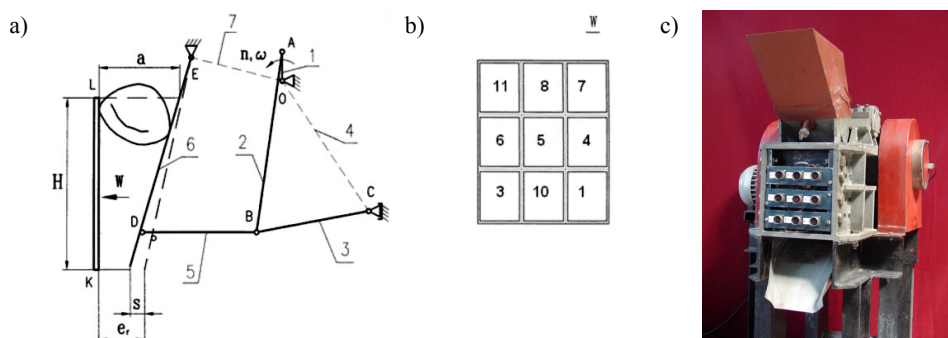
Celem niniejszej pracy jest wykazanie, że:

- dotychczasowy opis procesu kruszenia w kruszarkach dwurozporowych Blake'a dotyczący obciążeń, przedstawiany w literaturze i wykorzystywany w praktyce jest na ogół opisem przybliżonym;
- badania obciążeń, stosujące zaawansowane metody eksperymentalne, stanowią podstawę sformułowania nowych elementów mechanik procesu.

* Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska, Warszawa

2. Laboratoryjna kruszarka dźwigniowa Blake'a

Schemat kinematyczny tej maszyny pokazuje rysunek 1. Stanowi ona typowy przykład wieloboku przegubowego. Człon OA oznacza korbę napędową (w rzeczywistej maszynie jest to wał mimośrodkowy), człón AB — pociągacz, człóny BC i BD — płyty rozporowe, człón DE — szczękę ruchomą. Płyta nieruchoma — szczęka nieruchoma — została oznaczona literami KL.



Rys. 1. Modelowa kruszarka dwurozporowa: a) schemat kinematyczny; b) widok na segmenty drobiące szczęki stałej; c) ogólny widok, zmodyfikowanej modelowej kruszarki szczękowej

Człon nieruchomy OC wraz z członami OA, AB, BC tworzą czworobok przegubowy, człóny zaś OA, AB, BD, DE, EO, tworzą pięciobok przegubowy. Ruch obrotowy korby przesyła się przez pociągacz AB i płytę rozporową BD na szczękę DE. Wykonuje ona proste ruchy wahadłowe cyklicznego zbliżania się i oddalania w stosunku do szczęki nieruchomej KL. Bryły materiału znajdującego się w przestrzeni komory roboczej o przekroju DELK są głównie ściskane i zginane, co powoduje ich pęknięcie, redukcję wymiarów i przesuwanie się do dolnej części komory, w kierunku otworu wylotowego. Powierzchnie robocze płyt DE i KL (są to powierzchnie tzw. płyt drobiących stanowiących oddzielne części) są gładkie lub odpowiednio profilowane, co zmniejsza siły kruszenia.

Prędkości i przyspieszenia punktów leżących na szczęce ruchomej nie są duże. Jeżeli liczba obrotów wału napędowego wynosi $n = 390$ obr./min, to np. maksymalna prędkość punktu D (rys. 1) osiąga wartość $v = 0,1$ m/s, zaś maksymalne przyspieszenie $p = 5,5$ m/s². Obciążanie ośrodka kruchego w przestrzeni roboczej jest to zatem tzw. obciążanie pośrednie, nie zaś, jak zwykle się sądzi, obciążanie dynamiczne, gdy prędkość odkształcania $\dot{\epsilon}$ jest większa niż 10² 1/s [2].

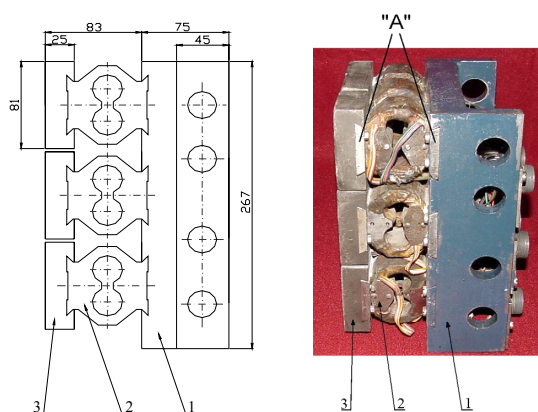
3. Szkic metody pomiarów sił i energii kruszenia

Konstrukcja kruszarki modelowej umożliwia dość dokładne określanie rozkładu i wartości sił kruszenia w przestrzeni roboczej. Nieruchoma płyta rozdrabniająca KL (rys. 1) jest

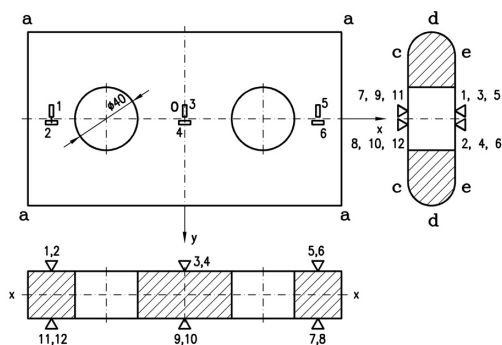
bowiem podzielona na dziewięć niezależnych segmentów (gładkich bądź profilowanych), jak objaśnia to rysunek 1b, każdy zaś z tych segmentów jest odpowiednio podparty na przetwornikach tensometrycznych specjalnej konstrukcji, zaprojektowanych zgodnie z danymi zaczerpniętymi z monografii [4].

Szczegóły połączenia tych przetworników z segmentami rozdrabniającymi oraz płytą w kształcie litery C, związaną na stałe z ramą kruszarki, pokazuje rysunek 2. Przetworniki tensometryczne (z odpowiednio naklejonymi układami tensometrów) umożliwiają pomiary sił normalnych, stycznych i momentów działających na segmenty rozdrabniające.

Energię kruszenia określano w pośredni sposób na podstawie pomiarów siły w przedniej płycie rozporowej kruszarki i przemieszczenia płyty. Zgodnie z rysunkiem 1 siła jest mierzona na płycie DB, a przemieszczenie na drodze punktu D. Płytę DB, przystosowaną do pełnienia funkcji dynamometru siły wzdłużnej, przedstawiono na rysunku 3. Dodajmy, że straty energii w miejscu zawieszenia szczęki ruchomej DE są pomijalnie małe.

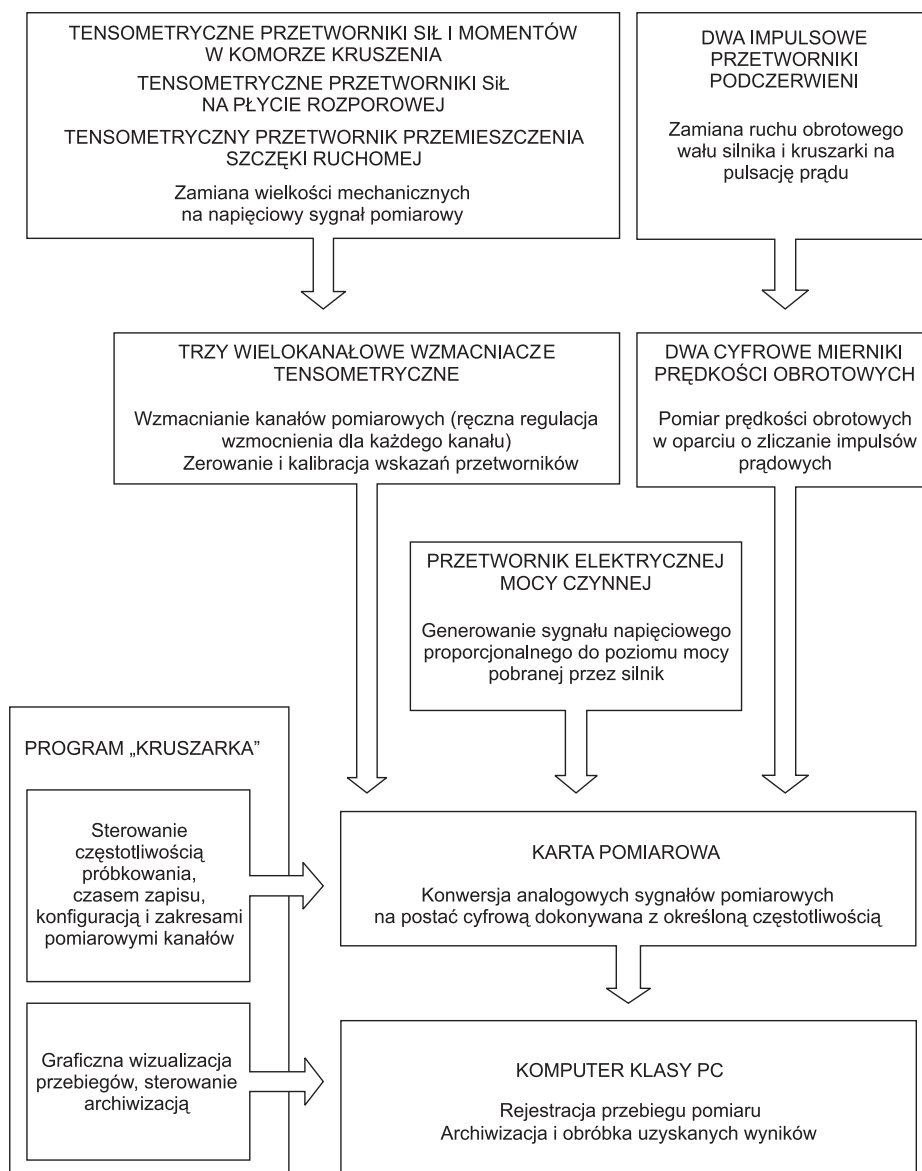


Rys. 2. Szczegóły połączenia przetworników tensometrycznych 2 z segmentami rozdrabniającymi 3 i z płytą 1 będącą częścią korpusu kruszarki



Rys. 3. Przednia płyta rozporowa jako dynamometr sił — rozmieszczenie tensometrów

Przemieszczenie szczęki rejestrowano za pomocą specjalnego przetwornika tensometrycznego zamontowanego w pobliżu punktu D. Układ pomiarowy kruszarki modelowej zawiera wiele innych elementów, których opis tutaj pomijamy. Schemat blokowy tego układu zamieszcza rysunek 4.



Rys. 4. Schemat blokowy działania układu pomiarowego kruszarki modelowej

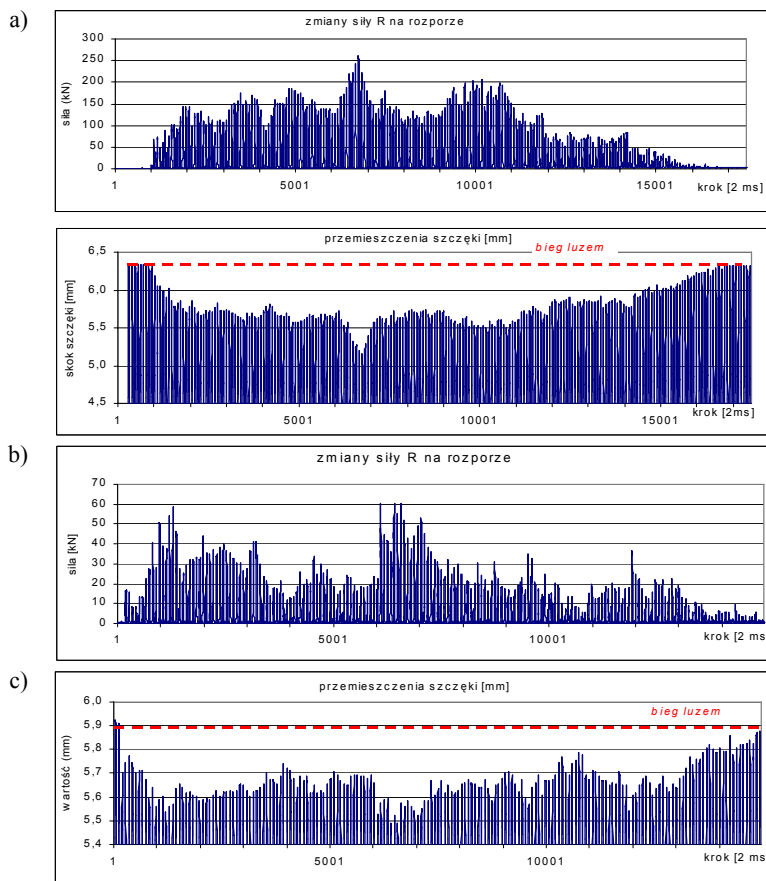
4. Przykładowe wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

4.1. Przebiegi siły R w płycie rozporowej i skoku s szczęki ruchomej w procesie

Surowcem (nadawą) w doświadczeniach na kruszarce modelowej były skały krajowe: marmur średniokrystaliczny — BM (wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $S_c = 50$ MPa, wytrzymałość na jednoosiowe rozrywanie $S_r = -4,9$ MPa) oraz wapień zwarty — WM ($S_c = 80$ MPa, $S_r = -12,2$ MPa).

Na rysunku 5 przedstawiono typowy losowy charakter zmian siły R podczas próby kruszenia w płycie rozporowej i skoku szczęki ruchomej w funkcji czasu dla:

- płyt gładkich — nadawa, marmur BM,
- płyt profilowanych — nadawa, wapień WM.



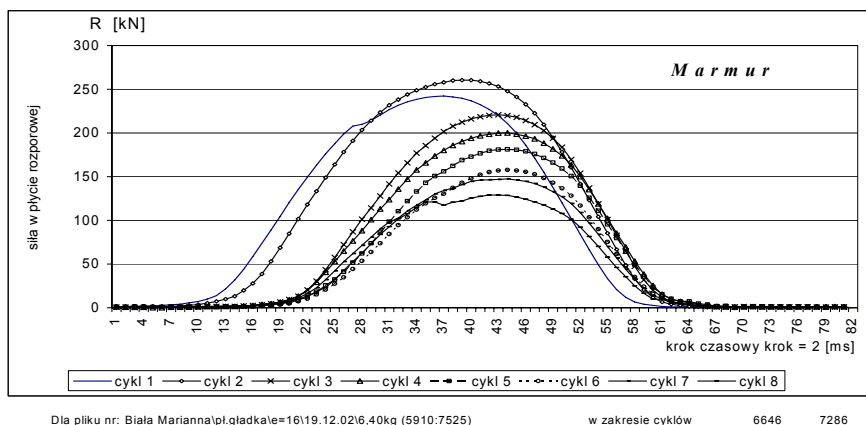
Rys. 5. Zmiany siły R w rozporze i skoku szczęki ruchomej:
a) seria I — BM ($\sigma = 16$); b) seria VIII — WM ($\sigma = 30$) zmiany siły w rozporze;
c) seria VIII — WM ($\sigma = 30$) zmiany skoku szczęki ruchomej

Badania wykazały znaczne skrócenie skoku szczęki w trakcie procesu, dochodzące do 15% skoku nominalnego. Jest to fakt mało znany.

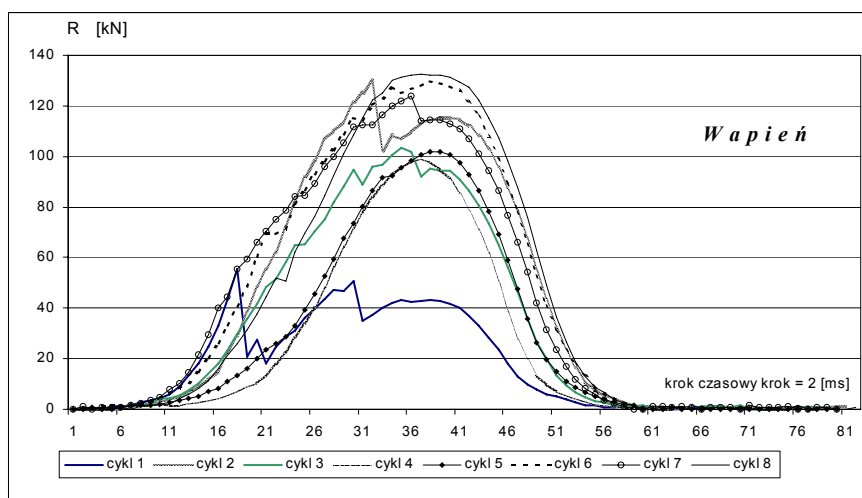
Zarejestrowane przebiegi wyraźnie wykazują zmianę obciążeń szczęki wynikającą ze zmiany powierzchni roboczej szczęki i rodzaju nadawy.

4.2. Pojedyncze cykle pracy: obciążanie–odciążanie

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono analizę przebiegu siły R w pojedynczym cyklu roboczym (obciążenie–odciążenie). Wykazuje ona, że przebieg ten zależy wyraźnie od warunków kruszenia (rodzaj płyty, rodzaj surowca, wielkość szczeliny).



Rys. 6. Przykład zmiany wartości siły w płycie rozporowej w wybranych cyklach roboczych



Rys. 7. Przebieg siły w płycie rozporowej, gdy stosowano płyty rozdrabniające gładkie, surowiec wapień Morawica — IV seria

Widoczny jest odmienny charakter zmian siły w płycie rozporowej dla tych samych płyt rozdrabniających, lecz różnych surowców.

4.3. Przebiegi sił normalnych V , stycznych H , momentów M w przestrzeni roboczej kruszarki

W literaturze nie ma informacji o przebiegach tych wielkości [5]. Przeprowadzone badania jako pierwsze dają pogląd, na ten temat. Wykresy obciążeń działających na 9 segmentów rozdrabniających szczęki stałej są podstawą ilościowej i jakościowej analizy mechaniki procesu (rys. 8–10 — na wklejce).

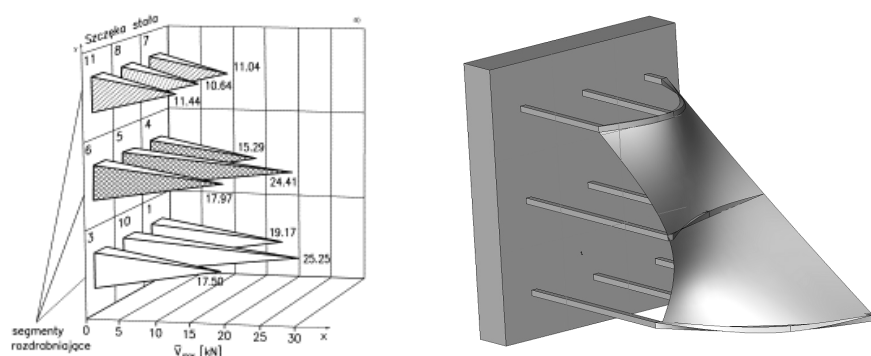
Analiza taka oprócz typowych zagadnień mechaniki kruszenia, może dotyczyć innych aspektów np.:

- rozkładów prawdopodobieństwa występowania obciążeń,
- intensywności obciążania poszczególnych segmentów płyt rozdrabniających,
- doboru płyt rozdrabniających ze względu na optymalne wykorzystanie przestrzeni roboczej itd.

4.4. Rozkłady obciążeń w przestrzeni roboczej

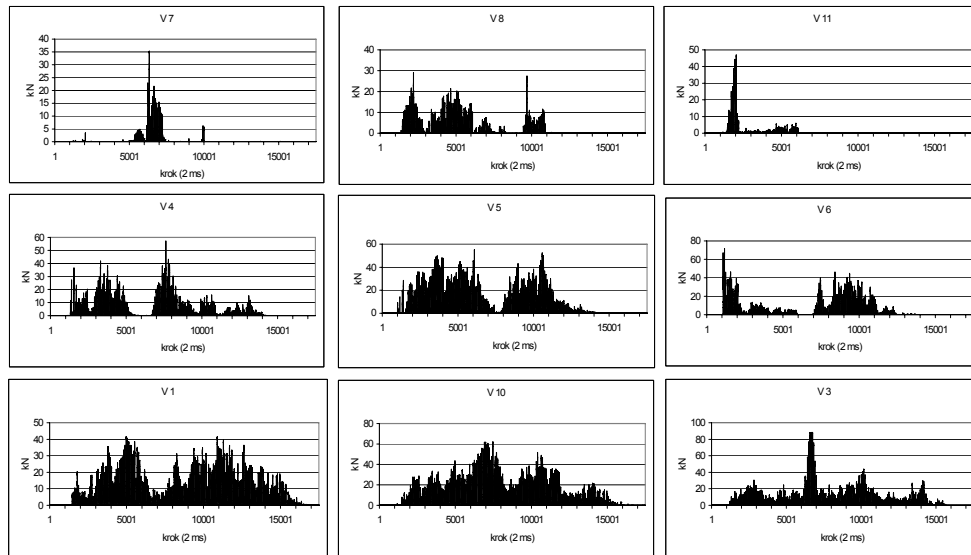
Rejestrowane w procesie kruszenia wielkości mają losowy charakter.

W celu dokonywania różnych analiz konieczne było wyznaczenie wartości średnich tych wielkości, a więc: średnich wartości chwilowych i średnich wartości maksymalnych.

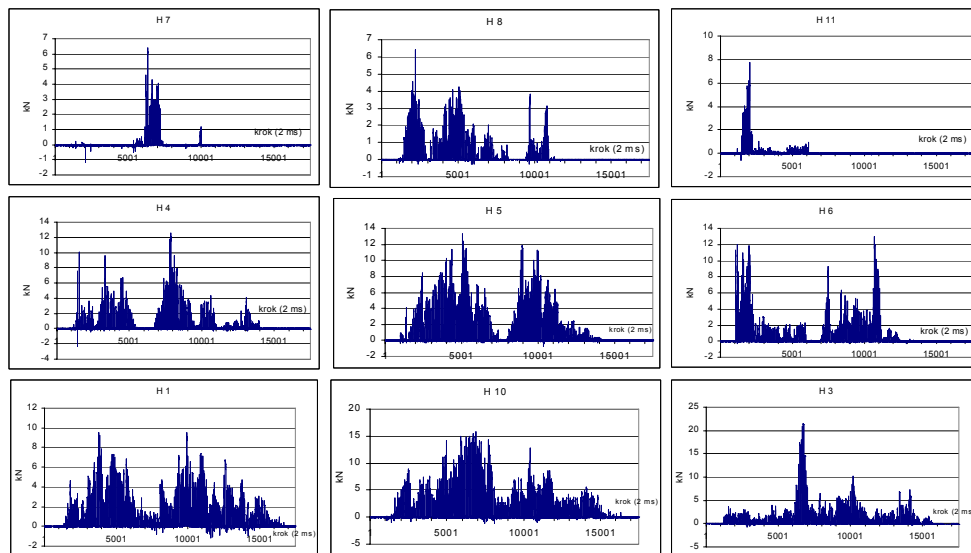


Rys. 11. Rozkład średnich wartości maksymalnych $\overline{V_{\max}}$

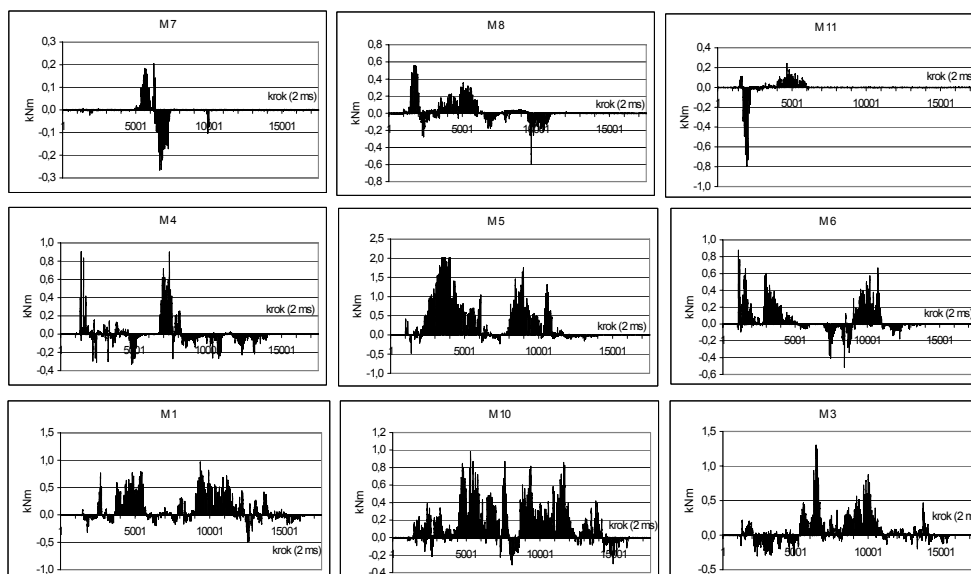
Na rysunku 11a w ujęciu perspektywicznym przedstawiono rozkłady średnich wartości sił normalnych maksymalnych $\overline{V_{\max}}$ działających na dziewięć segmentów (7, 8, 11, 4, 5, 6, 1, 10, 3) szczęki stałej w wybranej próbie I serii (płyty rozdrabniające gładkie), a na rysunku 11b przedstawiono te rozkłady jako przestrzenną powierzchnię, którą można opisać odpowiednią funkcją. Jest to nowy nieznan fakt — fakt doświadczalny Dla przedstawionego wykresu przyjęto oznaczenia y — wysokość komory, x — wartość siły $\overline{V_{\max}}$.



Rys. 8. Wykresy zmian sił normalnych V ($V1$, $V3$, itd.) w funkcji czasu na poszczególnych segmentach rozdrabniających szczęki stałej (I seria badań)

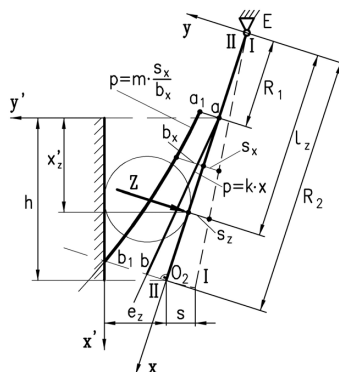


Rys. 9. Wykresy zmian sił stycznych H ($H1$, $H3$, itd.) w funkcji czasu, działających na poszczególne segmenty rozdrabniające szczęki stałej (I seria badań)



Rys. 10. Wykresy zmian momentów M ($M1$, $M2$, $M3$, itd.) w funkcji czasu na poszczególnych segmentach rozdrabniających szczęki stałej (I seria badań)

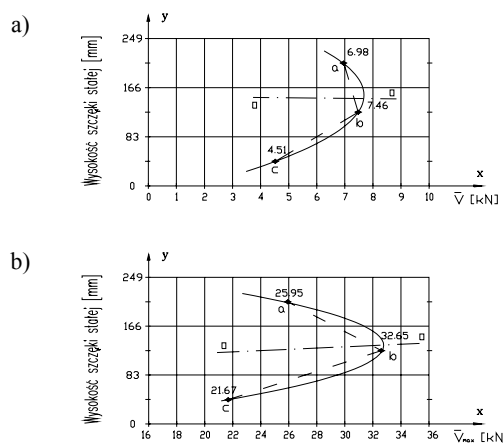
Płytę stanowią trzy strefy: pionowa: lewa to segmenty 3, 6, 11, strefa środkowa 10, 5, 8 oraz strefa prawa 1, 4, 7. Warto zwrócić uwagę na fakt, że literatura dla potrzeb obliczeń zaleca przyjmowanie obciążeń narastających liniowo (linia a–b) lub krzywoliniowo (linia a₁–b₁) wzdłuż wysokości szczęki jak to przedstawia rysunek 12.



Rys. 12. Zalecane przez literaturę schematy obciążania do obliczeń

Można ogólnie stwierdzić, że rozkłady w wypadku stosowania płyt gładkich są rozkładami parabolicznymi. Jest natomiast interesujące, że rozkład obciążeń normalnych zmieni się zupełnie, gdy zastosujemy profilowane płyty rozdrabniające.

Dla innego wypadku doświadczalnego po sprowadzeniu wszystkich wartości średnich (podobnych jak na rys. 11a) do pionowej środkowej strefy kruszenia otrzymano wyniki jak na rysunku 13.



Rys. 13. Punkty doświadczalne a, b, c przedstawiające obciążenia globalne \bar{V} i \bar{V}_{\max} w serii V , i ich aproksymacja funkcjami parabolicznymi (płyty profilowane — marmur BM):
a) przebieg maksymalnych wartości \bar{V} ; b) przebieg maksymalnych wartości \bar{V}_{\max}

5. Sformułowanie niektórych nowych wniosków dotyczących obciążeń

- 1) Charakter rozkładu obciążeń normalnych V i stycznych H w komorze roboczej zależy wyraźnie od ukształtowania płyt rozdrabniających, czego nie rozróżnia literatura.
- 2) W wypadku płyt gładkich rozkład można przybliżyć funkcją paraboliczną (a nie liniową), w wypadku płyt profilowanych rzeczywisty rozkład obciążeń przybliżają także parabole, ale o wierzchołkach znajdujących się w środkowej, poziomej strefie kruszenia.
- 3) Punkty przyłożenia wypadkowych sił normalnych V (dla płyt gładkich) znajdują się mniej więcej w połowie wysokości komory kruszenia (a nie w odległości $2/3 h$ od wlotu do komory o wysokości h , jak stosuje się w praktyce. Gdy stosujemy płyty profilowane, punkty te znajdują się znacznie niżej.
- 4) Tarcie w komorze kruszenia zmniejsza się bardzo w miarę wzrostu obciążenia, a więc pod koniec fazy zbliżania się szczęki ruchomej do szczęki nieruchomej. Obecnie zakłada się, że tarcie jest niezmiennie — przy tym założeniu oblicza się kąt uchwytu α

LITERATURA

- [1] *Rumpf H.*: Struktur der Zerkleinerungswissenschaft. Aufbereitungs-Technik, 8, 1966, 421–435
- [2] *Zawada J. (red.), Buczyński A., Chochol K., Rzeszot J.*: Wprowadzenie do mechaniki maszynowych procesów kruszenia. Warszawa, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji 2005
- [3] *Chochol K.*: Doświadczalne studium mechaniki procesów kruszenia (na przykładzie kruszarki szczękowej). Warszawa, 2005
- [4] *Cook N.H., Rabinowicz E.*: Physical measurement and analysis reading. Addison, Vealej 1963
- [5] *Sobolewski S.*: Przeróbka mechaniczna skał: Rozdrabnianie. Wrocław, Politechnika Wrocławska 1974