

BEZBIJAKOWE UKŁADY ROBOCZE MŁOTÓW – NOWE SPOJRZENIE NA EFEKTYWNOŚĆ ROZDRABNIANIA BRYŁ UDAREM MECHANICZNYM

PROJECTILE IMPACTORS – A NEW POINT OF VIEW FOR EFFECTIVENESS OF BREAKING PROCESS OF OVERSIZED ROCK LUMPS BY MEANS OF MECHANICAL STROKE

Marek Sokolski – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

Przedstawiono analizę obciążeń generowanych w bezbijakowych układach roboczych młotów. Wykazano, że w tego typu układach można stosować prędkości uderzenia większe niż w konwencjonalnych układach bijakowych. Stwarza to możliwości zwiększenia efektywności procesu rozdrabniania ponadwymiarowych brył skalnych, w którym wymagana jest duża energia uderzenia.

The analysis of the loads generated in the projectile impactors was presented. It has been proved that in these systems greater impact velocities can be used in comparison to the conventional “beater – tool” impact systems. It offers new possibilities to increase the effectiveness of the breaking process of rock lumps where the great impact energy is required.

Wprowadzenie

We współczesnych młotach, wykorzystywanych szeroko m. in. w górnictwie, inżynierii lądowej, hutnictwie i przeróbce plastycznej metali, stosowane są różne rozwiązania konstrukcyjne układów roboczych generujących uderzenie. Najczęściej są to układy dwumasowe o charakterystycznej strukturze z wyodrębnionym elementem uderzającym (bijakiem) i elementem uderzanym (narzędziem).

Konwencjonalne młoty hydrauliczne – posiadające tego typu układy uderzeniowe, określane mianem bijakowych – wykazują szereg istotnych zalet eksploatacyjnych. W szczególności mają możliwość wywierania siły wstępnego docisku narzędzia do calizny skalnej, dzięki czemu ogranicza się niekorzystne zjawisko odrzutu. Obszerną charakterystykę młotów bijakowych przedstawił autor w pracy [4].

Mimo wielu korzystnych cech młotów bijakowych, daje się jednak dostrzec pewne symptomy wyczerpywania się potencjału rozwojowego młotów tej generacji. Chodzi tu przede wszystkim o występującą barierę prędkości uderzenia $v_{u(max)} = 10 \div 12$ m/s. Jest to wynikiem dążenia, aby w układzie uderzeniowym nie przekraczać poziomu naprężeń $\sigma_{u(max)} \cong 200 \div 250$ MPa [4] – przyjmowanego zwykle jako wartości dopuszczalne wyężenia elementów układu roboczego.

Konsekwencją realizacji tego postulatu staje się ograniczenie maksymalnej energii uderzenia w konwencjonalnych młotach bijakowych. Problem ten omówiono w pracy [4].

Alternatywnym rozwiązaniem – w stosunku do klasycznych układów bijakowych – są jednomasowe układy uderzeniowe, określane mianem bezbijakowych. Podstawową zaletą młotów bezbijakowych jest możliwość stosowania większych energii uderzenia T_{ud} .

Niniejszy artykuł jest próbą analizy obciążeń generowanych w jednomasowych układach uderzeniowych i oceny – na tej podstawie – granic empirycznie sensownego rozwoju tego typu układów w młotach stosowanych do urabiania ośrodków skalnych.

Sformułowanie problemu

Podstawowym parametrem determinującym efektywność urabiania ośrodków skalnych za pomocą młotów jest energia uderzenia. Pozostałe parametry – m. in. częstotliwość uderzeń – mają znaczenie drugorzędne.

W istocie bowiem można przyjąć, że energia U dekohezji struktury skalnej jest proporcjonalna do objętości bryły V i daje się oszacować na podstawie teorii Kicka, zgodnie z którą:

$$U \cong \frac{1}{k_u} \cdot \frac{R_{c(sk)}^2}{2E_{(sk)}} V \quad (1)$$

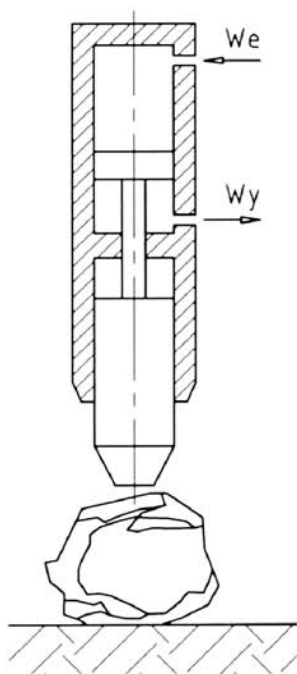
przy czym: $E_{(sk)}$, $R_{c(sk)}$ oznaczają odpowiednio: moduł Younga i wytrzymałość ośrodka skalnego na ściskanie, natomiast $k_u \geq 1$ jest współczynnikiem uwzględniającym uderowy charakter działania obciążenia (A. Bęben proponuje przyjmować $k_u \geq 5$ [1]). Ze wzoru (1) wynika, że np. dla skał dolomitowych o wytrzymałości $R_{c(sk)} \cong 80$ MPa i module Younga $E_{(sk)} = 40$ GPa energia defragmentacji brył o objętości $V = 1$ m³ wynosi $U \cong 16$ kJ.

Mając to na uwadze, producenci młotów dążą do stosowania możliwie największych energii, co jest realizowane na ogół poprzez zwiększanie prędkości uderzenia. W młotach bijakowych – z przyczyn uprzednio objaśnionych – prędkość uderzenia nie przekracza jednak na ogół wartości $v_{u(max)} = 10 \div 12$ m/s.

W niektórych przypadkach – na przykład w górnictwie skalnym do rozbijania brył ponadwymiarowych – korzystne jest stosowanie dużych energii, o poziomie przekraczającym wartości osiągalne w konwencjonalnych młotach z układami roboczymi „bijak – narzędzie”.

Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie układów roboczych typu bezbijakowego – tj. zarówno układów wolnospadowych (typu kafarowego), jak i układów z uderzeniem wymuszonym (hydraulicznie lub pneumatycznie) (rys. 1).

Koncepcję rozdrabniania brył za pomocą jednomasowego układu uderzeniowego w postaci swobodnie opadającej kuli stalowej analizował np. A. Bęben [1].



Rys. 1. Idea młota bezbijakowego z uderzeniem wymuszonym
Fig. 1. Idea of projectile impactor with forced impact

Pomyślne wyniki eksperymentów eksploatacyjnych, uzyskane w procesie rozdrabniania brył uderem mechanicznym generowanym w układach bezbijakowych, są wystarczającą – zdaniem autora – przesłanką do podjęcia tej tematyki.

Podstawowym celem – przyjętym przez autora – jest oszacowanie empirycznie sensownej prędkości uderzenia $v_{u(max)}$ w układzie bezbijakowym, uwarunkowanej wytrzymałością materiału konstrukcyjnego układu roboczego.

Punktem wyjścia jest analiza procesu uderzenia i wyznaczenie relacji $\sigma_{u(max)} = \Phi(v_u)$ między poziomem maksymalnych naprężeń $\sigma_{u(max)}$ a prędkością uderzenia v_u . W tym celu przeprowadzono analizy teoretyczne i symulacje numeryczne procesu uderzenia w układach bezbijakowych o różnej konfiguracji narzędzia roboczego.

Analiza teoretyczna procesu uderzenia

Analizę teoretyczną procesu uderzenia w układzie bezbijakowym oparto na modelu fizycznym o konfiguracji przedstawionej na rysunku 2. Przyjęto założenie, że układ roboczy (1) ma strukturę prętową o równomiernie rozłożonej masie, a interakcja narzędzia z ośrodkiem skalnym (2) ma charakter liniowo – sprężystego oddziaływania, co symbolizuje sprężyna (3) charakterystyce k .

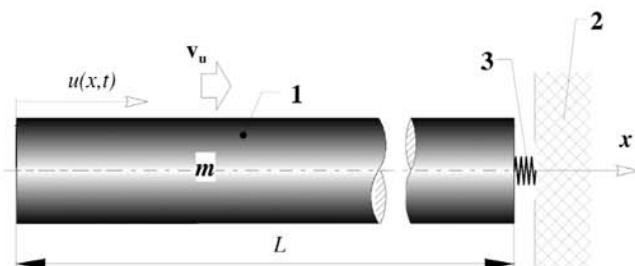
Modelem matematycznym procesu uderzenia, generowanego w układzie roboczym (rys. 2), jest równanie falowe:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (0 \leq x \leq L) \quad (2)$$

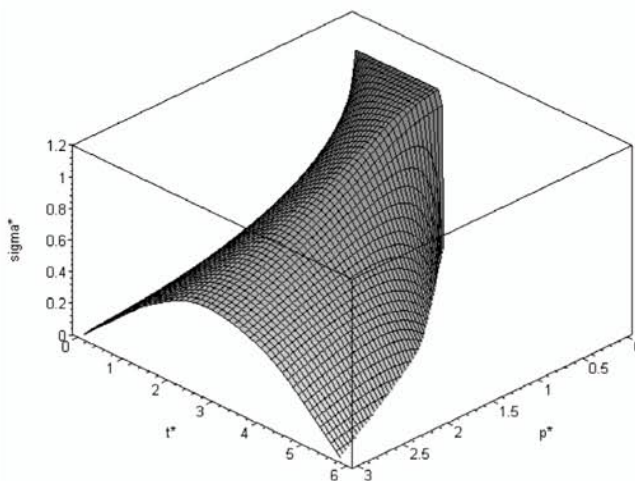
Warunki brzegowe dla równania (1) są następujące:

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = -ku(x,t) \quad (3)$$

Przykładowe rozwiązania – przebiegi czasowe naprężeń unormowanych σ^* , generowanych w układzie uderzeniowym – przedstawiono na rysunku 3. W analizach przyjęto następujące oznaczenia:



Rys. 2. Model fizyczny układu uderzeniowego (objaśnienia w tekście)
Fig. 2. Physical model of impact system (explanation in the text)



Rys. 3. Naprężenia unormowane w uderzeniowym układzie bezbijakowym
Fig. 3. Normalized stresses in impact system

- $\sigma^* = \sigma / \sigma_{max}$ - naprężenie unormowane, tj. naprężenie rzeczywiste odniesione do wartości naprężenia maksymalnego σ_{max}
- $t^* = t/T$ - czas bezwymiarowy, tj. czas rzeczywisty wyrażony w jednostkach okresu falowego $T = L/c$ (L - długość narzędzia),
- $p^* = (EA/L)/k$ - podatność jednostkowa dla miejsca styku narzędzia z ośrodkiem skalnym (E , A - moduł Younga i pole przekroju poprzecznego narzędzia).

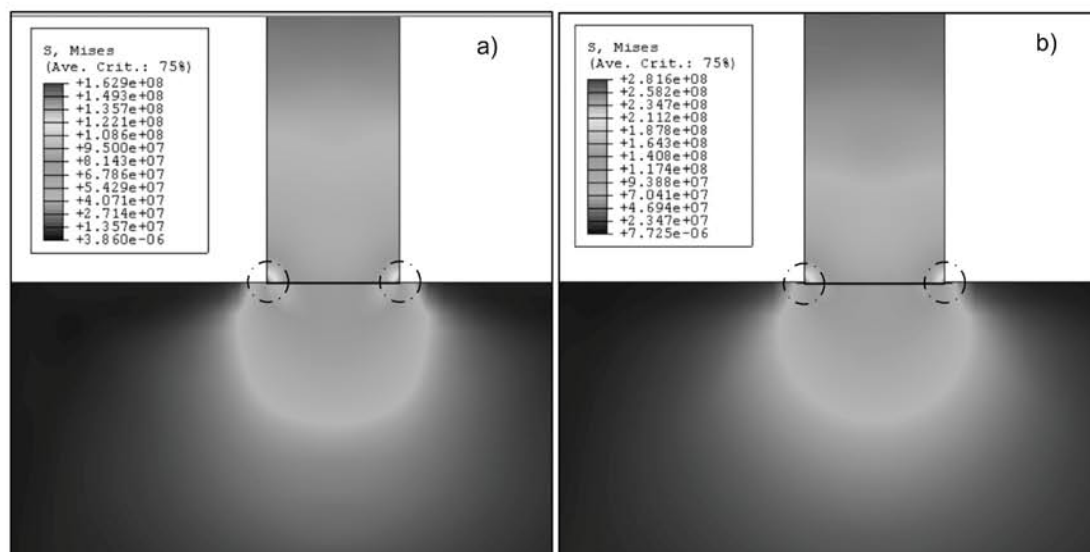
Z obliczeń wynika między innymi, że w układach bezbijakowych występuje na ogół niewielka liczba przebiegów falowych, a proces uderzenia kończy się w przedziale czasu $t^* = 0 \div 6$ - w zależności od podatności jednostkowej p^* styku narzędzia z ośrodkiem skalnym (rys. 3). Maksymalna wartość naprężeń unormowanych wynosi $\sigma^*_{(max)} = 1 - \exp(-2/p^*)$.

Analiza numeryczna procesu uderzenia

Analizy numeryczne procesu uderzenia w układzie bezbijakowym przeprowadzono metodą elementów skończonych [3]. Parametry geometryczne układów roboczych przyjmowano w nawiązaniu do wymiarów narzędzi, stosowanych w młotach hydraulicznych typu „Roxon 602”. W szczególności uwzględniono narzędzie w formie grota płaskiego oraz narzędzie o strukturze tzw. grota – punktaka. Oba te rozwiązania są bowiem najczęściej stosowane do rozbijania brył ponadwymiarowych.

Symulacje przeprowadzono dla procesu rozdrabniania bloków betonowych, przyjmując do obliczeń parametry materiałowe (betonu klasy B50) na podstawie pracy [2]. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4.

Z analiz wynika, że w układzie bezbijakowym z narzędziem w formie grota płaskiego – możliwe jest stosowanie prędkości uderzenia rzędu $v_{u(max)} = 20$ m/s, bez obawy przekroczenia wytrzymałości materiału układu roboczego. Obliczenia



Rys. 4. Warstwy naprężeń w układzie bezbijakowym dla prędkości uderzenia: a) $v_u = 10$ m/s, b) $v_u = 20$ m/s

Fig. 4. Contour lines of stresses in projectile impactors, impact velocity a) $v_u = 10$ m/s, b) $v_u = 20$ m/s

wykazują bowiem, że – przy tej wartości prędkości – naprężenia generowane w narzędziu są na poziomie $\sigma_{(max)} = 180 \div 200$ MPa. Jedynie na konturach powierzchni styku końcówki roboczej narzędzia z urabianym ośrodkiem (obszary zaznaczone na rys. 4) pojawiają się większe naprężenia lokalne rzędu $\sigma_{(max)} \approx 280$ MPa.

Wypływa stąd istotny wniosek ogólny, że w układach bezbijakowych można stosować prędkości uderzenia v_u większe niż w konwencjonalnych układach typu „bijak – narzędzie”. Jest to cenna zaleta – zwłaszcza w kontekście rozdrabniania brył ponadwymiarowych, kiedy stosowanie dużej energii wydawnie przyczynia się do wzrostu efektywności procesu roboczego.

Przykładem wdrożenia koncepcji układów bezbijakowych jest młot hydrauliczny D500 firmy „Arrow” (rys. 5) dysponujący energią uderzenia $E_{u(max)} \approx 18,5$ kJ, tj. wartością około 10 – krotnie większą niż np. bijakowy młot hydrauliczny „Roxon 602”.

Podsumowanie

W młotach hydraulicznych stosowane są alternatywnie dwa rodzaje układów roboczych, tj. układy bezbijakowe oraz układy typu „bijak – narzędzie”. W układach bijakowych występuje granica prędkości uderzenia $v_{u(max)} \approx 10 \div 12$ m/s, uwarunkowywana dopuszczalnym poziomem naprężeń w bijaku i narzędziu.

Na podstawie analizy teoretycznej oraz symulacji numerycznych procesu rozdrabniania bloków betonowych wykazano, że w układach bijakowych możliwe jest zastosowanie prędkości uderzenia rzędu $v_{u(max)} \approx 20$ m/s.

Dowodni to możliwości zwiększenia efektywności proce-



Rys. 5. Młot D 500 z bezbijakowym układem roboczym (Arrow Construction Equipment Ltd.)

Fig. 5. D 500 hammer with projectile impactors (Arrow Construction Equipment Ltd.)

sów mechanicznego rozdrabniania brył ponadwymiarowych związanych z zastosowaniem wysokoenergetycznych układów bezbijakowych.

Artykuł powstał w ramach Projektu Rozwojowego Nr 03 0039 06.

Literatura

- [1] Bęben A., Nowe kierunki w rozdrabnianiu brył skalnych mechanicznymi sposobami udarowymi, *Problemy Maszyn Roboczych*, Z.17, 2001
- [2] Jankowiak T., Łodygowski T., Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundation of Civil and Environmental Engineering*, No. 6, 2005
- [3] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [4] Sokolski M., *Młoty hydrauliczne – tendencje rozwojowe w minionym ćwierćwieczu*. *Górnictwo Odkrywkowe*, nr 4-5, 2009

Artykuł recenzowali dr hab. inż. Franciszek W. Przysupa, prof. PWr
dr inż. Krzysztof Dudek

Rękopis otrzymano 11.08.2011 r. * 2227