

Józef JONAK

Politechnika Lubelska, Lublin

## WYĘŻENIE MATERIAŁU SKALNEGO W STREFIE KONTAKTU Z OSTRZEM URABIAJĄCYM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję badania strefy skrawania skał z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Traktując skałę jako naturalny materiał kruchy, przeanalizowano kształtowanie się obszaru wyężenia materiału w strefie krawędzi skrawającej. Zagadnienie to jest ważne np. z punktu widzenia kształtowania się trajektorii szczeliny towarzyszącej odspajaniu głównego elementu wióra (a konsekwencji jego wielkości), zależnie np. od określonej geometrii ostrza. Jest to z kolei istotne np. dla kształtowania się określonego sortymentu urobku.

## EFFORT OF ROCK MATERIAL IN THE CONTACT ZONE WITH MINING EDGE

**Summary.** The paper presents a concept of studying rock cutting zone using a Finite Element Method. Treating the rock as a natural brittle material, the shape of the material effort zone in the contact area of the cutting edge was analysed. The above problem, is important, among others, from the point of view of formation of the crack trajectory that accompanies cutting off the main chip element (and as a consequence its size) in relation to the cutting edge geometry. This, in turn, is important for the resulting assortment of winning.

### 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój badań strefy skrawania z wykorzystaniem metod numerycznych, pozwalając tym samym na prowadzenie analiz w aspektach, których do tej pory nie poruszano z uwagi na ich złożoność. W technologii skrawania metali postęp jest bardzo duży, dostępna jest duża różnorodność oprogramowania, np. MES, a zbieżność rozwiązań teoretycznych i badań laboratoryjnych, dotyczących prognozowania np. temperatur w strefie skrawania, jest stosunkowo dobra. Z kolei w przypadku materiałów kruchych (w tym zwłaszcza skał) większość systemów MES jest mało przydatna (z wyjątkiem bardzo drogich, np. ABAQUS czy NASTRAN). Zawarte tam moduły, dotyczące analiz wyężenia materiału, oparte są głównie na hipotezach wyężeniowych, np. Hubera-Misesa bądź Treski, które nie są właściwe dla materiałów kruchych (np. z uwagi na

ich dużą asymetrię wytrzymałości). Równania konstytutywne, jakie do tej pory zostały wyprowadzone w mechanice, dotyczą głównie ośrodków ciągłych, jednorodnych. Stąd też trudności w opisie zachowania skał, które charakteryzują się anizotropią właściwości (w tym porowatością). Nie mniej jednak z punktu widzenia możliwości poznawczych, do chwili dopracowania procedur celowe jest prowadzenie analiz metodami przybliżonymi.

W przypadku materiałów kruchych, osiągnięcie stanu granicznego w danym punkcie materiału oznaczać będzie początek niestatecznego rozwoju szczelin i mikrorys. W obszarach, w których jedno z naprężeń głównych (rozciągających) osiąga wartość graniczną, w materiale powstanie pęknięcie prostopadłe do tego naprężenia, w wyniku czego naprężenie rozciągające spada do zera. Z kolei w obszarze naprężeń ściskających granicę plastyczności utożsamia się z wartością naprężenia, przy której rozpoczyna się proces ostatecznego rozwoju szczelin.

Poznanie mechanizmu kształtowania się obszarów wyteżenia materiału kruchego w strefie skrawania, zależnie np. od geometrii ostrza, powinno np. ułatwić prognozowanie generowania określonej wielkości elementów wióra już na etapie projektowania narzędzia.

## 2. Metoda badań, założenia

Analizę zagadnienia przeprowadzono [6, 7] wykorzystując standardowy pakiet oprogramowania ALGOR, opartego na Metodzie Elementów Skończonych, którego możliwości rozszerzono o zagadnienia kontaktowe oraz procedury umożliwiające wyznaczenie wyteżenia materiału, w węzłach siatki MES, według kryterium stanu granicznego, zaproponowanego przez Podgórskiego [1] (istnieją inne, może bardziej znane hipotezy wyteżeniowe, mające zastosowanie dla skał, np. Burzyńskiego, zmodyfikowany liniowy warunek Coulomba, paraboliczny warunek Coulomba czy Druckera-Pragera, jednak zaproponowane kryterium jest łatwiejsze do wykorzystania).

Do celów analizy wykorzystano powszechnie używane pojęcie wyteżenia materiału, określone zależnością:

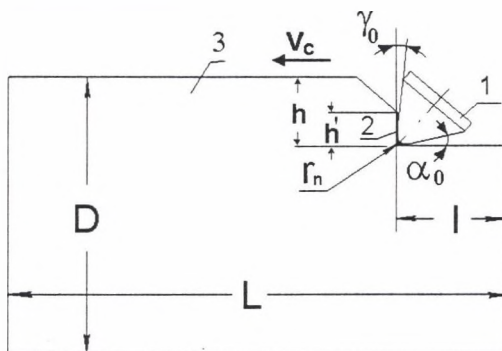
$$W = \tau_0 / \tau_g, \quad (1)$$

gdzie:

$\tau_g$  - krytyczna wartość naprężeń (wynikająca z przyjętej hipotezy wyteżeniowej),

$\tau_0$  - naprężenia oktaedryczne, wyznaczone w danym momencie, z pomocą MES, dla założonych warunków modelu.

Wartość „W” może zmieniać się w granicach od zera do jeden. Im większe „W”, tym wyteżenie większe. Dla „W” = 1 materiał znajduje się już w stanie krytycznym (plastycznym).



Rys.1. Model geometryczny strefy skrawania ( $h$  - grubość warstwy skrawanej,  $h'$  - wysokość kontaktu powierzchni natarcia z materiałem,  $r_n$  - promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej,  $D$ ,  $L$  - wymiary modelu materiału,  $l$  - położenie krawędzi skrawającej względem brzegu próbki,  $\alpha_0$ ,  $\gamma_0$  - kąty: przyłożenia i natarcia ostrza, 1 - ostrze, 2 - warstwa „kontaktowa”, 3 - obszar skrawanego materiału [6, 7, 8])

Fig.1. Mechanical model of the work zone: 1 - cutting wedge, 2 - contact layer, 3 - machined material,  $h$  - thickness of the machined layer,  $h'$  - length of contact between the rake face and the machined material,  $r_n$  - radius of rounding of the cutting edge,  $D$ ,  $L$  - size of the modelling zone,  $l$  - distance between the cutting edge and the edge of the sample,  $\alpha_0$ ,  $\gamma_0$  - rake and clearance angles,  $v_c$  - speed of machining [6, 7, 8]

Poważnym dylematem jest dobór modelu materiału, który jak najlepiej odwzorowywałby zachowanie się materiału urabianego. Wpływa na to duża rozpiętość jego właściwości. Dla materiałów bardzo kruchych, nie przejawiających cech plastyczności, adekwatny, jak się wydaje, byłby model sprężysto-kruchy. W odniesieniu do skał przejawiających właściwości pseudoplastyczności analizy dowodzą, że w niektórych warunkach ich zachowanie się dobrze opisuje model np. sprężysto-idealnieplastyczny, podczas gdy w innych warunkach lepiej je opisuje model np. sprężysto-kruchy. Chodzi tutaj między innymi o zagadnienia ujmujące wpływ czasu oddziaływania obciążenia czy dynamiki procesu.

Bazując na wynikach wcześniejszych badań, np. [2, 3, 4], opracowano szereg procedur umożliwiających określanie wyteżenia materiału w węzłach siatki MES modelu na podstawie wspomnianego kryterium oraz informacji zapisanych w plikach wynikowych dekodera postprocesora SuperView systemu ALGOR (z rozszerzeniem \*.pin oraz \*.out).

Przyjęto założenie, że skrawany materiał skalny charakteryzuje anizotropia wytrzymałości oraz izotropia budowy wewnętrznej.

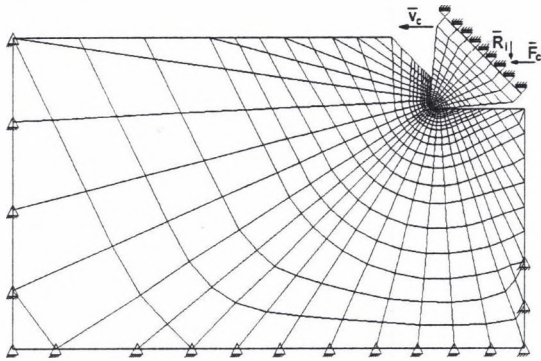
Podstawowym modelem geometrycznym wykorzystywanym do szeregu analiz był model skrawania ortogonalnego, przedstawiony na rys. 1.

Jak wynika z rys. 1, zagadnienie standardowo już przeanalizowano z wykorzystaniem tzw. warstwy „kontaktowej”, wprowadzonej pomiędzy ostrze a skrawany materiał, symulującej zachowanie się warstwy miały, która często występuje w warunkach rzeczywistych pomiędzy ostrzem a skałą. Zagadnienie to było szeroko opisywane w szeregu opracowaniach np. [2, 3, 4, 5, 6].

Przyjęto następujące parametry ostrza (rys. 1) kąty  $\gamma_0 = \alpha_0 = 5^\circ$  oraz promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n = 0,01$  mm. Grubość warstwy skrawanej  $h = 12$  mm.

Sposób utwierdzenia węzłów brzegowych oraz podział modelu na elementy skończone przedstawia rys. 2.

Do analizy przyjęto ostrze z węglika B2, o module Younga  $E = 630$  GPa oraz liczbie Poissona  $\nu = 0,22$ . Dla skrawanego materiału przyjęto  $E = 10^4$  MPa,  $\nu = 0.2$  oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie  $f_c = 40$  MPa i jednoosiowe rozciąganie  $f_t = 2$  MPa. Dla warstwy kontaktowej (model Druckera-Pragera) przyjęto fikcyjne parametry, tj.:  $E = 500$  MPa,  $\nu = 0.2$ , kąt tarcia wewnętrzny  $\phi = 1^\circ$  oraz kohezję  $c = 0,1$  MPa. Grubość warstwy skrawanej ( $h$ ) przyjęto równą 12 mm.

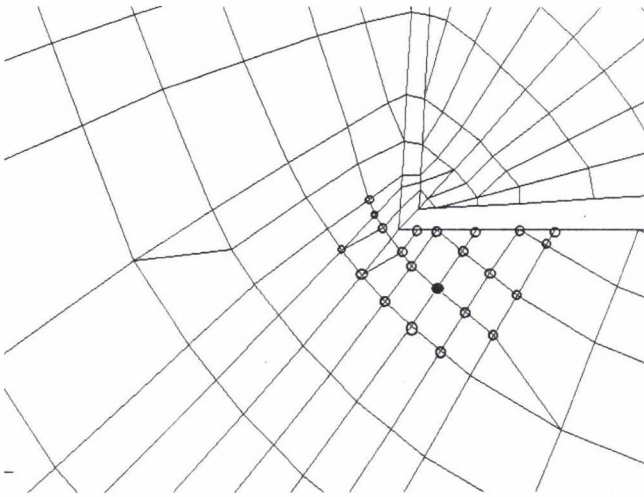


Rys. 2. Dyskretyzacja modelu  
Fig. 2. Digitisation on the mechanical model

Założono przemieszczenie ostrza, pod działaniem siły wymuszającej  $F_c$ , skierowanej zgodnie z wektorem prędkości skrawania  $v_c$  (rys. 2). Węzłom podstawy ostrza pozostawiono jeden stopień swobody, umożliwiając tym samym całemu ostrzu przemieszczanie się jedynie w kierunku działania siły wymuszającej. Wielkość siły wymuszającej zadawano krokowo według założonej charakterystyki, tj. zwiększano jej wartość o 5% w każdym następnym kroku obciążenia. Taką procedurę założono w celu uchwycenia momentu pojawienia się pierwszych symptomów wyciężenia materiału w strefie skrawania, tj. osiągnięcia stanu granicznego w określonych węzłach siatki MES.

### 3. Wyniki analizy

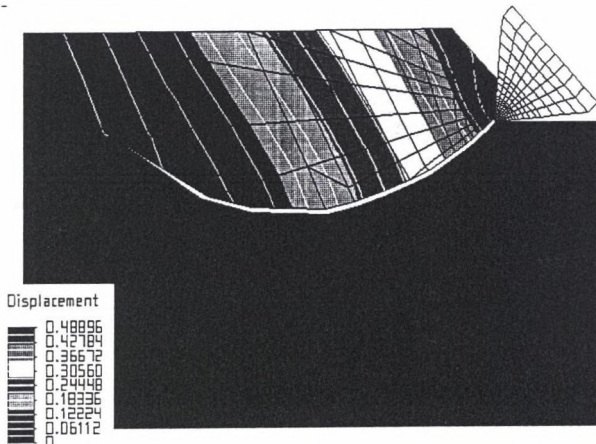
Analiza wykazała, że w przypadku ostrza bardzo ostrego pierwsze objawy wyciężenia materiału pojawiają się już przy pierwszym kroku zadawanego obciążenia. Obszar wyciężenia usytuowany jest nieco za krawędzią skrawającą, tuż pod powierzchnią obrobioną (rys. 3).



Rys. 3. Obszar wyteżenia skrawanego materiału dla pierwszego kroku zadawanego obciążenia

Fig. 3. Effort zone of the cut material for the first step of the applied loading

We wspomnianym obszarze zarejestrowano aż 23 węzły, w których został osiągnięty stan graniczny dla skrawanego materiału. Węzeł największego wyteżenia, oznaczony na rys. 3 czarną kropką, usytuowany był niemal w centrum opisywanego obszaru. Leży on w tym przypadku nieco poniżej powierzchni obrobionej. W węzle tym nastąpi inicjacja szczeliny pierwotnej, której rozwój prowadzi do wytworzenia elementu wióra (rys. 4). Jak łatwo zauważyć, otrzymany w trakcie symulacji, kształt szczeliny towarzyszącej odpajaniu wióra jest zbliżony do obserwowanych przez Evansa lub Nishimatsu, w trakcie wciskania w występ skalny, ostrza w kształcie asymetrycznego klina.



Rys. 4. Trajektoria szczeliny towarzyszącej odpajaniu elementu wióra [6]

Fig. 4. Propagation of the crack generating the main chip element in front of the cutting wedge [6]

#### 4. Podsumowanie

Analiza wykazała, że dla materiałów kruchych, charakteryzujących się silną asymetrią wytrzymałości materiału ( $f_c \gg f_t$ ), oraz dla przyjętego sprężysto-kruchego modelu materiału pierwsze objawy wyteżenia pojawiają się w warstwie wierzchniej, w strefie krawędzi skrawającej, po stronie powierzchni przyłożenia. Tam też należy oczekiwać inicjacji szczeliny pierwotnej, towarzyszącej formowaniu elementu wióra. Inaczej więc niż wynika to z badań przeprowadzonych dla metali.

Uzyskany przebieg rozwoju szczeliny przed ostrzem (rys. 4) jest zbliżony do sugerowanego przez Evansa czy Nishimatsu. Zaobserwowane tendencje, co do kształtowania się obszarów wyteżenia materiału w strefie skrawania, odbiegają nieco od obserwowanych w trakcie skrawania naturalnych materiałów kruchych. Może na to wpływać szereg czynników, takich jak np. przyjęty model materiału, nie ujmujący takich cech materiału rzeczywistego, jak opisywana porowatość i szereg innych. Niezbędne są zatem dalsze badania w celu poszerzenia stanu wiedzy poruszanej tematyki.

#### LITERATURA

1. Podgórski J. : General Failure Criterion For Isotropic Media. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No 2, February, 1985, pp. 188-201
2. Jonak J., Podgórski J.: Wybrane aspekty mechaniki skrawania skał. Mat. Konf. Zagadnienia mechaniki pękania i skrawania materiałów. Red. Z. Mróz, T. Sadowski. Kazimierz Dolny nad Wisłą, 22-24 października 1998. LTN, Lublin 1998
3. Jonak J., Podgórski J.: Stress pattern in the touch area between cutting and rock material edge nad rock material procuring with indirect contact layer use. Kwartalnik PAN: Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, Vol. 22, nr 3, 1998, s.41-51
4. Jonak J.: Analiza warunków pracy obrotowego noża stożkowego w aspekcie poprawy parametrów eksploatacyjnych ciężkich maszyn roboczych. Kwartalnik PAN: Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 4 (116), 1998, s.640-639
5. Jonak J.: Wpływ stopnia i formy zużycia noża stożkowego na wzrost awaryjności maszyn urabiających. Kwartalnik PAN: Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 2 (118) 1999, s.301-314
6. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego KBN nr 7 T07D 028 15, nt: Analiza zjawisk mających wpływ na przebieg mechanizmu formowania wióra w procesie skrawania naturalnych materiałów kruchych” (niepublikowany). Kierownik projektu: Józef Jonak. Grudzień 1999
7. Jonak J., Podgórski J.: Analiza zjawisk mających wpływ na przebieg mechanizmu formowania wióra w procesie skrawania naturalnych materiałów kruchych. Seminarium projektów badawczych finansowanych przez KBN w 1999 r. KBN, Zespół Mechaniki,

Budownictwa i Architektury: Sekcja Technologii, Automatykacji Maszyn i Produkcji. Warszawa, 20.01.1999.

8. Jonak J., Podgórski J.: Wpływ geometrii ostrza na kształtowanie się obszarów wyteżenia materiału kruchego w strefie skrawania. VI Naukowe Warsztaty Profesorskie TM'2000, Koszalin-Unieście, 26-28.06.2000.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Walery Szuścik

### **Abstract**

The paper presents a method for studying rock cutting zone using FEM. In order to extend the scope of application of a typical FEM system (ALGOR), a new software modulus was worked out to enable analysis of issues arising from contact. As a threshold condition for the rock material, a criterion proposed by Podgórski [1] was applied. The results of analysis showed that for sharp tools, the first symptoms of effort appear in the cutting edge zone on the contact side immediately below the machined surface. Initiation of the primary crack development was found there. Its development resulted in the separation of a chip with the shape close to that observed by Evans and Nishimatsu.