

Jarosław ZUBRZYCKI
Józef JONAK

**NUMERYCZNO – EKSPERYMENTALNE BADANIA
WPŁYWU KSZTAŁTU POWIERZCHNI NATARCIA
OSTRZA NA OBCIĄŻENIE NOŻA SKRAWAJĄCEGO
NATURALNY MATERIAŁ KRUCHY**

Lubelskie Towarzystwo Naukowe
Lublin 2003r.

SPIS TREŚCI:

Wykaz ważniejszych oznaczeń	4
1. Wprowadzenie	5
2. Stan wiedzy	6
2.1 Najistotniejsze czynniki mające wpływ na kształtowanie się siły skrawania	11
2.1.1 Kąt natarcia γ	11
2.1.2 Kąt przyłożenia	12
2.1.3 Kształt powierzchni przyłożenia	12
2.1.4. Szerokość noża	14
2.1.5 Głębokość skrawania	15
2.1.6 Teoria strefy sprasowania	16
2.1.7 Skrawanie materiałów kruchych pochodzenia naturalnego	19
2.1.8. Wpływ kształtu powierzchni natarcia	23
2.2. Podsumowanie dokonanego przeglądu literatury	30
3. Uzasadnienie podjęcia tematu	31
4. Cel i zakres badań	32
4.1. Wybór rodzaju noży	32
4.2. Wybór skał	34
5. Badania numeryczne wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza na siłę skrawania, z wykorzystaniem MES	34
5.1 Założenia do analizy numerycznej	34
5.2. Wpływ formy geometrycznej powierzchni natarcia na kształtowanie się naprężeń w strefie skrawania	36
5.3. Rozkład przemieszczeń materiału w strefie skrawania	44
5.4. Wpływ kształtu powierzchni natarcia ostrza, na kształtowanie się siły skrawania	50
5.5. Podsumowanie i wnioski z analizy MES	52
6. Badania laboratoryjne wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza na obciążenie noża skrawającego naturalny materiał kruchy	52
6.1 Stanowisko o prostoliniowej trajektorii skrawania	53
6.2. Stanowisko badawcze o łukowej trajektorii skrawania	55
6.3 Badania zasadnicze	59
6.3.1. Przebieg badań prowadzonych na stanowisku o prostoliniowej trajektorii skrawania	59

6.3.1.1. Wyniki badań siły skrawania charakterystycznej dla skrawania po trajektorii prostoliniowej	64
6.3.2. Przebieg i wyniki badań uzyskanych na stanowisku o łukowej trajektorii skrawania	66
6.4. Wnioski z badań laboratoryjnych	75
7. Wnioski końcowe	76
8. Wytyczne do dalszych badań	77
8.1. Propozycja wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do badania wpływu parametrów geometrycznych powierzchni natarcia na kształtowanie się obciążenia ostrza	77
8.1.1. Przykładowa struktura sieci neuronowej, służącej do badania wpływu parametrów geometrycznych powierzchni natarcia na obciążenie ostrza	80
8.2. Propozycja wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do kompleksowej identyfikacji procesu urabiania	82
Literatura	84

Wykaz ważniejszych oznaczeń

b	– szerokość ostrza, [mm]
b_s	– szerokość powstałej bruzdy, [mm]
c	– kohezja skały, [MPa]
D	– wysokość próbki, [mm]
E	– moduł Younga, [MPa]
e_c	– energia całkowita, [kJ]
F_b	– siła boczna, [N]
F_c	– siła skrawania, [N]
f_c	– wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie, [MPa]
F_{cr}	– resztkowa siła skrawania, [N]
F_n	– siła docisku, [N]
F_s	– pole powierzchni skrawu, [mm ²]
f_t	– wytrzymałość skały na jednoosiowe rozciąganie, [MPa]
h	– głębokość skrawania, [mm]
h'	– głębokość wniknięcia narzędzia w skałę, [mm]
l	– droga skrawania, [mm]
L	– szerokość próbki, [mm]
n	– porowatość,
r	– promień krzywizny owalu narzędzia, [mm]
R_c	– doraźna wytrzymałość skały na ściskanie, [MPa]
R_r	– doraźna wytrzymałość skały na rozciąganie, [MPa]
s	– szczelinowatość skały,
t	– podziałka skrawania, [mm]
U_z	– przemieszczenia poziome, [mm]
v_c	– prędkość skrawania, [m/s]
v_f	– prędkość posuwu, [m/s]
ΔF_c	– użyteczna siła skrawania, [N]
Σ	– kąt klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia, [°]
α_b	– boczny kąt przyłożenia (pomocniczy), [°]
α	– kąt przyłożenia, [°]
β	– kąt ostrza, [°]
δ	– kąt klinowo ukształtowanej powierzchni przyłożenia, [°]
ε	– kąt rozwarcia powierzchni przyłożenia, [°]
ϕ	– kąt tarcia wewnętrznego skały, [°]
γ	– kąt natarcia, [°]
φ	– kąt klina na powierzchni natarcia, [°]
κ	– wskaźnik asymetrii wytrzymałości skały = f_c/f_t ,
μ	– współczynnik tarcia,
ν	– liczba Poissona,
σ_{max}	– naprężenia maksymalne, [MPa]
σ_{min}	– naprężenia minimalne, [MPa]
ψ	– kąt bocznego rozkruszania, [°]

1. Wprowadzenie

Od kiedy człowiek na szerszą skalę zaczął eksploatować kopaliny naturalne, najczęściej wykorzystywał do tego celu proces skrawania skał. Z upływem czasu pojawiały się coraz nowsze i doskonalsze metody, ale nie udało się wyprzeć mechanicznego sposobu pozyskiwania kopalin. Szeroko zakrojone badania laboratoryjne i eksploatacyjne nad wykorzystaniem fizykalnych metod urabiania nie znalazły przemysłowych zastosowań. Przyczyn tego zjawiska należy upatrywać w wielu dziedzinach życia ludzkiego i osobliwości samego zjawiska. Wiele z tych rozwiązań (na pewno doskonałych) nie znalazło i w najbliższej przyszłości nie znajdzie zastosowań ze względu na stan techniki i uwarunkowania ekonomiczne. Wydaje się być słusznym, by oprócz poszukiwania nowych metod urabiania materiałów kruchych (skał), prowadzić dalsze badania nad doskonaleniem obecnie stosowanych metod ich skrawania.

Z całego ogromu zagadnień związanych z klasycznymi metodami skrawania skał bardzo ważnym zagadnieniem, a może najważniejszym, jest doskonalenie narzędzi skrawających, które mają bezpośredni kontakt z calizną. Kierunek tych badań powinien iść w stronę poszukiwania najefektywniejszych rozwiązań.

Za badaniem i doskonaleniem procesów skrawania przemawia bardzo wiele powodów. Podnoszenie skuteczności skrawania oznacza oszczędzanie energii dostarczanej do narzędzia przy jednoczesnym uniknięciu zbytniego rozdrobnienia urobku. Nadmierne przekazywanie mocy do urządzeń napędowych narzędzi przy jednoczesnej niskiej efektywności procesu skrawania wiąże się z wieloma niepożądanymi efektami ubocznymi takimi jak: nadmierne zużycie części maszyn, wysokie zużycie ostrza narzędzia, zwiększona emisja pyłów w związku z dużym rozdrobnieniem urobku, wysoka energochłonność procesu, mały postęp prac i wydajność skrawania. Wielu autorów prac naukowych z zakresu skrawania skał (np. Bieron [3]) sugeruje, że udział energii potrzebnej do odspojenia urobku od calizny może kształtować się na poziomie $67\div 75\%$ całkowitej energii niezbędnej do drażenia wyrobiska bądź urobienia określonej masy urobku. Zapobiec temu zjawisku można, poszukując optymalnych konstrukcji noży urabiających mogących zapewnić: względnie małą siłę skrawania i docisku, małą energię całkowitą, minimalne zapylenie, wysoką wydajność procesu, dużą trwałość ostrza, łatwość wymiany, współzamiennność i uniwersalność.

Ciekawymi rozwiązaniami, mającymi na celu polepszenie warunków skrawania, są próby zastosowania wkładek diamentowych do zbrojenia noży urabiających. Uzyskano w ten sposób wysoką trwałość narzędzi skrawających, oraz mniejszą dynamikę pracy. Niestety, narzędzi tych nie można było wykorzystać w procesach skrawania udarowego. Innym interesującym rozwiązaniem było zastosowanie narzędzi dyskowych, które również nie znalazły szerokiego zastosowania z przyczyn technologicznych.

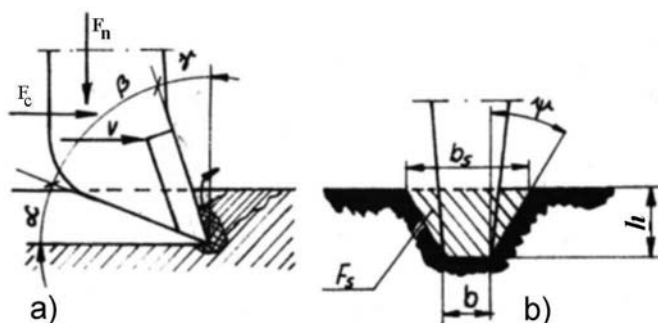
Mimo opracowania wielu różnorodnych konstrukcji noży, najbardziej rozpowszechniły się noże klinowe (promieniowe i styczne) oraz noże styczne o ostrzach stożkowych (często mocowanych obrotowo). Ostrza tych noży w zdecydowany sposób różnią się między sobą. Przede wszystkim różnią ich

kształty powierzchni natarcia i przyłożenia a także ilość krawędzi skrawających. Optymalizacja konstrukcji noży dała asumpt do prowadzenia szeregu badań porównawczych. Prowadzone one były pod kątem określenia wpływu: parametrów skrawania, parametrów konstrukcyjnych noży (głównie kształtu powierzchni natarcia i przyłożenia ostrza) na kształtowanie się siły skrawania i docisku, wartość energii całkowitej procesu skrawania oraz zużywania się ostrzy.

2. Stan wiedzy

Skrawanie materiałów kruchych można opisać jako prawie równoległe do powierzchni materiału oddziaływanie narzędziem, najczęściej w kształcie klina. Narzędzie takie można opisać za pomocą następujących podstawowych parametrów (rys. 2.1a) :

1. kąt przyłożenia - α ,
2. kąt ostrza - β ,
3. kąt natarcia - γ ,
4. szerokość ostrza - b .

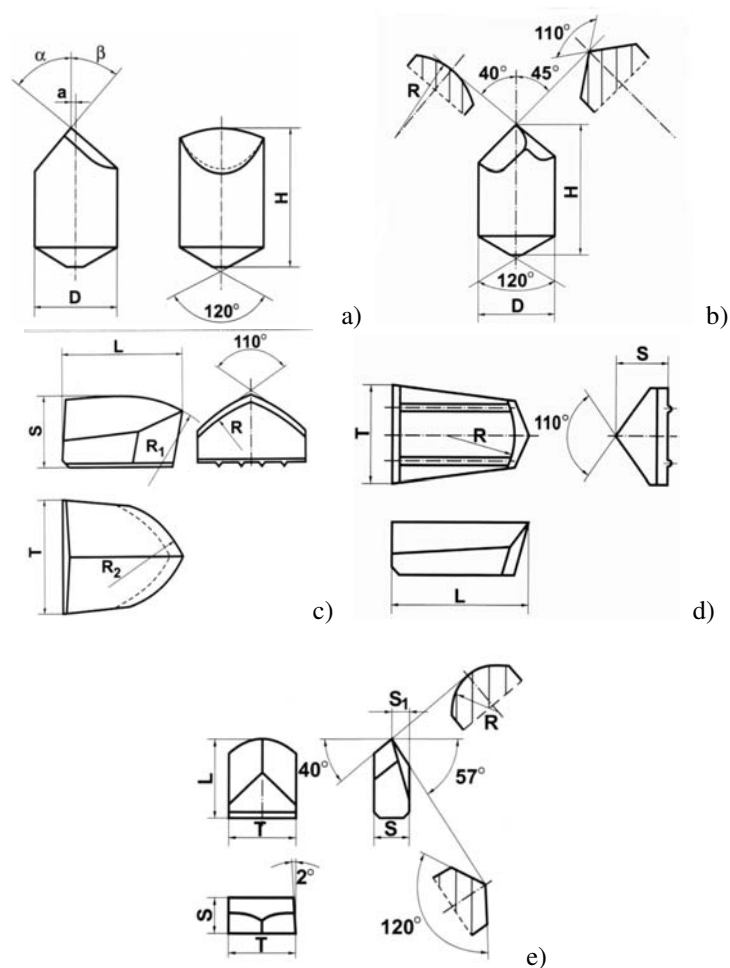


Rys.2.1. Parametry charakterystyczne dla skrawającego noża (a) i uzyskiwanej bruzdy (b) [68]

Jak wynika z danych katalogowych firm wytwarzających płytki do noży, najczęściej stosowane ich formy geometryczne, zilustrować można jak na rys. 2.2. Jak można zauważyć, nie wszystkie, istotne dla badań parametry, podawane są przez producentów. Często należy je wyznaczać w warunkach warsztatowych.

Z rys. 2.2 wynika także, że istnieje cały szereg parametrów geometrycznych, charakterystycznych dla wytwarzanych płytek. Są to parametry charakteryzujące średnicę wałka D czy maksymalną szerokość płytki T , kąty pochylenia elementarnych powierzchni tworzących powierzchnię natarcia lub

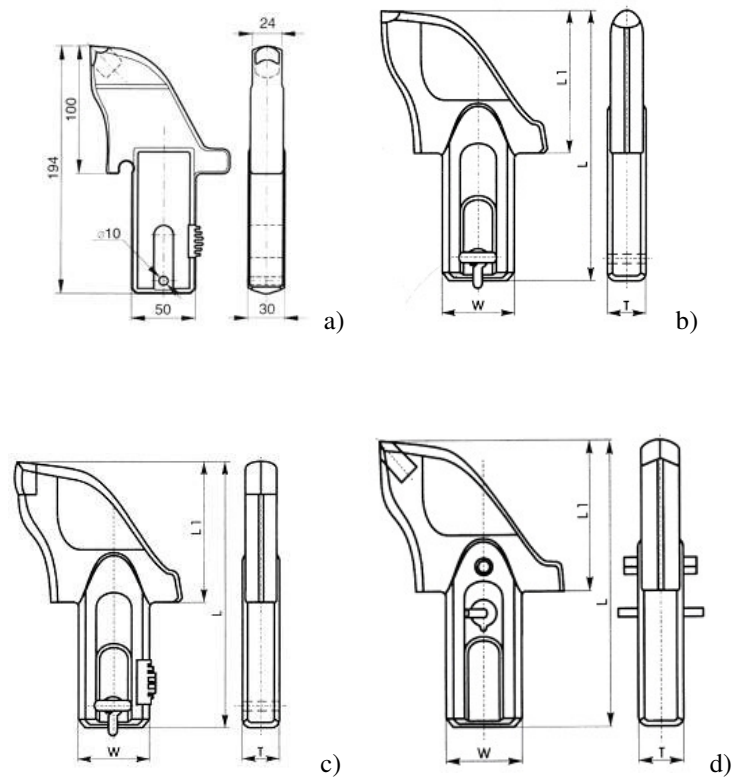
przyłożenia (ε , $\varphi = 110^\circ$, 120° , itp.), promienie krzywizn elementarnych powierzchni R , promienie krawędzi przecięcia tych powierzchni R_1 , R_2 , itd.



Rys. 2.2. Parametry geometryczne płytek najczęściej stosowanych do zbrojenia noży urabiających skały. Płytki wg katalogu firmy Baildonit: a) nr 635, b) nr 638, c) nr 636, d) nr 639. [47]

Odpowiednie osadzenie płytki danego typu w korpusie noża powoduje, że ostrze uzyskuje (w układzie narzędzia) wymagane parametry geometryczne (np. określoną wartość kąta natarcia, przyłożenia itp.) oraz charakterystyczne, przestrzenne formy powierzchni natarcia i przyłożenia, co z kolei ilustruje rys. 2.3. Stąd też wyróżnia się noże o powierzchniach natarcia lub przyłożenia

płaskich oraz przestrzennych, w tym klinowych, owalnych lub jeszcze bardziej złożonych typu ostrze „soczewkowe” (jak na rys. 2.3c).



Rys. 2.3. Najczęściej stosowane konstrukcje noży urabiających, z powszechnie stosowanymi typami płytek z węgla spiekane. Nóż typu : a) Boart hwf-100s, b) Rapid 87 ϕ 15z, c) Rapid 89-63-20wz, d) Rapid 84-27.

Podstawowe parametry płytek przedstawionych na rys. 2.2, produkowanych przez firmę Baildonit, przedstawia tabela nr 1. Parametrów płytek innych firm nie udało się ustalić w katalogach firmowych.

Tab.1 . Podstawowe parametry wybranych płytek firmy Baildonit [47].

KSZTAŁT	D	H	A	α	β	
635-10	10,0	18,0	1,0	51°	39°	
635-12	12,0 ^{+0,8}	25,0	1,2	51°	39°	
635-14	14,0 ^{+0,4}	24,0 ^{+0,6}	-	45°	39°	
635-15	15 ^{+0,8}	24,0 ^{+0,8}	1,2	51°	39°	
635-15A	15 ^{-0,3}	24,0 ^{+0,4}	1,2	51°	39°	
KSZTAŁT	L	T	S	R	R ₁	R ₂
636-20	20	21,3	13	30	29	20
636-24	24	22,0	13	30	29	20
KSZTAŁT	D		H		R	
638-15	15 ^{+0,8}		26		13	
KSZTAŁT	L	T	S	S ₁	R	
639-24	24	23,0	12,0 ^{-0,2}	6	15	
639-27	27	23,0	12,0 ^{-0,2}	6	15	

W końcowym efekcie określonego, przestrzennego usytuowania płytki względem korpusu ostrza, tak w układzie narzędzia jak i w układzie roboczym, uzyskuje się określone wartości np. promieni zaokrąglenia krawędzi skrawającej (w płaszczyźnie normalnej do kierunku ruchu głównego), skąd często mówi się o prostoliniowej lub np. owalnej krawędzi skrawającej.

Śladem przejścia narzędzia w skrawanym materiale jest bruzda. Jej geometria jest zależna od geometrii użytego noża i można ją opisać następującymi parametrami (rys. 2.1b):

- szerokość bruzdy (przejścia) – b_s ,
- głębokość – h ,
- szerokość dna bruzdy (jest równa szerokości noża b).

Powierzchnie boczne bruzdy są pochylone w stosunku do normalnej do dna bruzdy pod kątem ψ (w literaturze kąt ten nazywany jest kątem bocznego rozkruszania). Pole przekroju poprzecznego F_s powstałej bruzdy jest także parametrem ją opisującym (rys. 2.1b).

W wyniku zagłębienia się ostrza w skrawany materiał działa na niego siła, którą można rozłożyć na trzy składowe. Składowa działająca prostopadle do dna bruzdy, odpowiedzialna jest za docisk narzędzia do skrawanego materiału i określana jest jako siła docisku – F_n . W kierunku równoległym do dna bruzdy i zgodnym z kierunkiem ruchu narzędzia działa siła powodująca odpajanie skały – siła skrawania F_c , ma ona podstawowe znaczenie w procesie skrawania. Siła prostopadła do dwóch poprzednich jest skierowana na boki narzędzia, stąd też nazywana jest siłą boczną F_b . Działanie tej siły powoduje w głównej mierze powstawanie naprężeń wtórnych w skale, jak również odpajanie materiału w kierunkach bocznych noży. Niestety wprowadza ona dodatkowe opory skrawania.

Analiza dotychczasowych prac teoretycznych i badań doświadczalnych wykazuje, że opór urabiania skały F zależy od szeregu czynników podstawowych, co można zapisać:

$$F = f(S, N, , T_e) \quad (1)$$

S - czynnik charakteryzujący rodzaj i właściwości skały:

$$S = f(f_c, f_t, f_c/f_t, w, s, n, u, ..) \quad (2)$$

f_c, f_t – wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie, rozciąganie

$f_c/f_t = \kappa$ - wskaźnik asymetrii wytrzymałości skały,

w – wilgotność skały,

s – szczelinowatość skały,

n – porowatość skały,

u – uwarstwienie.

N - czynnik charakteryzujący cechy konstrukcyjne narzędzia:

$$N = f(k, b, \alpha, \beta, \gamma, VB, ...) \quad (3)$$

b – średnia szerokość ostrza,

α, β, γ - kąt przyłożenia, ostrza oraz natarcia,

VB – stępienie ostrza.

k - kształt ostrza narzędzia (powierzchni natarcia i przyłożenia)

$$k \approx f(R, R_1, R_2, \varphi, \varepsilon, D, T ...) \quad (4)$$

R, R_1, R_2 – promienie krzywizn lub krawędzi (jak na rys. 2),

D, T – średnica wkładki oraz maksymalna szerokość płytki (jak na rys. 2.2),

φ, ε - kąty rozwarcia elementarnych pow. natarcia i przyłożenia (rys. 2.2).

T_e - czynnik charakteryzujący parametry technologiczne procesu skrawania:

$$T_e = f(A, z, t, h, t/h, v_c, v_f) \quad (5)$$

A – przekrój skrawu,

t, h – podziałka, głębokość skrawania,

t/h – proporcja podziałki do głębokości skrawania,

v_c – prędkość skrawania,

v_f – prędkość posuwu,

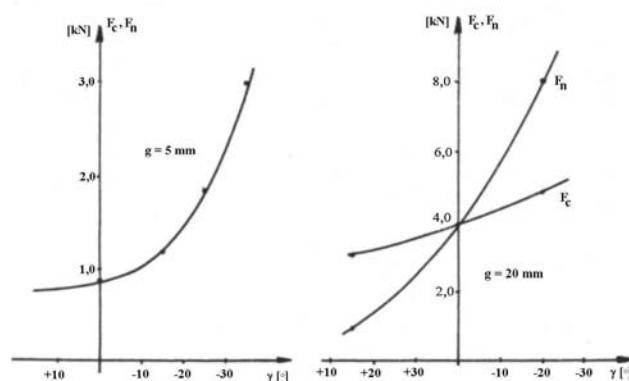
z – zabiór głowicy.

Analizując powyższe czynniki można zauważyć, jak duża ich liczba wpływa na kształtowanie się obciążenia ostrza. Wpływ każdego z nich jest często bardzo złożony, nie do końca poznany i jak już wspomniano, z wielu powodów trudny do oszacowania.

2.1 Najistotniejsze czynniki mające wpływ na kształtowanie się siły skrawania

2.1.1 Kąt natarcia γ

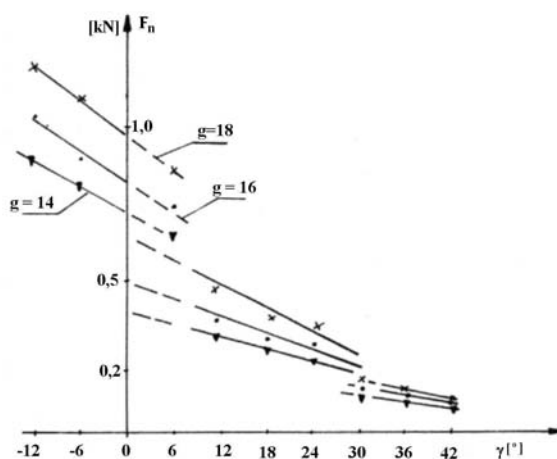
Wartość siły skrawania F_c materiałów kruchych pochodzenia naturalnego jest silnie skorelowana z wartością kąta natarcia γ . Przeprowadzone w świecie i w Polsce badania wykazują, że wraz ze wzrostem kąta natarcia siły skrawania F_c i F_n maleją. W pracach Valantina np. [90] można znaleźć analizy wpływu kąta natarcia na wartość i charakter tychże sił w odniesieniu do różnego rodzaju materiałów skalnych. I tak dla materiałów zwięzłych przy głębokości skrawania do 5 mm i dla kątów $\gamma > -5^\circ$ zmiany omawianych sił są minimalne. Ale dla kątów $\gamma < -5^\circ$ siły rosną gwałtownie i proporcjonalnie. Polega to na tym, że w jednakowym stopniu rośnie siła skrawania i docisku. Skrawając materiały słabo zwięzłe, dopiero przy dużych głębokościach skrawania ($h=20\text{mm}$), przyrosty siły są większe i to zdecydowanie (dla ujemnych kątów natarcia). Zaobserwowano natomiast, że stosunek siły skrawania F_c do siły docisku F_n był odwrotny niż poprzednio (rys. 2.4).



Rys. 2.4. Wpływ zmian kąta natarcia γ na siłę skrawania i docisku dla skał zwięzłych (a) i słabo zwięzłych (b) [90].

W dalszych badaniach Valantin [90] zaobserwował, że nie odnotowuje się istotnych zmian w ilości zeskrwanego materiału kruchego przypadającego na 1mb skrawu. Skąd wynika, że energia całkowita e_c jest zależnością malejącą w funkcji zmian kąta natarcia γ . Zbliżone wyniki otrzymał również Pomeroy [73]. Zaobserwował on bardzo interesujące zmiany siły docisku w zależności od zmian kąta γ przy skrawaniu węgla ostrymi nożami. Dla kątów $\gamma > 25^\circ$ siła ta miała

ujemną wartość. Inną osobliwością jest przebieg siły docisku w funkcji kąta natarcia przy skrawaniu wapieni. Dla kątów $\gamma = 0^\circ$ i $\gamma = \rho$ (kąt tarcia wewnętrznego skrawanego materiału) krzywe przebiegu posiadają dwa uskoki (rys. 2.5)



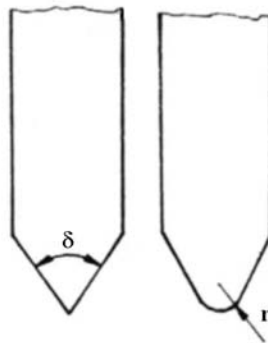
Rys.2.5. Zależność siły docisku od kąta natarcia γ [64,65].

2.1.2 Kąt przyłożenia

Kąt przyłożenia α wpływa na powierzchnię styku noża z dnem bruzdy. Wielkość tej powierzchni decyduje o szybkości narastania i powierzchni stępienia ostrzy. Małe kąty przyłożenia powodują szybkie tępienie się ostrzy, a zbyt duże wartości kąta tego zmniejszają trwałość narzędzi poprzez zmniejszenie kąta ostrza β ($\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$). W badaniach [71,73,90] stwierdzono, że jeżeli kąt α jest większy od $6 \div 7^\circ$ to nie wpływa on już na wartość siły skrawania F_c ani siły docisku F_n . Tak więc, na podstawie literatury można przyjąć, że kąt przyłożenia powinien wynosić $8 \div 12^\circ$ [5]. Wykonanie noży z kątem przyłożenia poniżej tych wartości znacznie obniży trwałość ich ostrzy co spowoduje szybkie ich stępienie się.

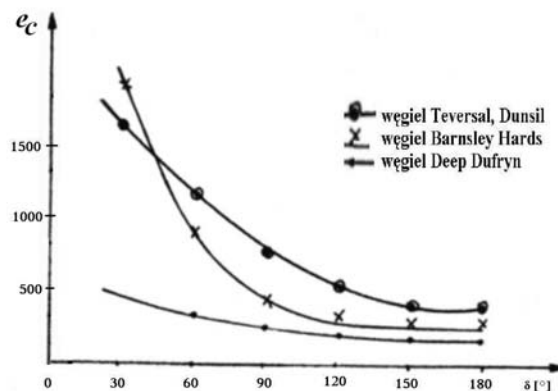
2.1.3 Kształt powierzchni przyłożenia

Kształt powierzchni przyłożenia odgrywa istotną rolę w kształtowaniu się siły skrawania F_c . Powierzchnia przyłożenia, podobnie jak powierzchnia natarcia, może przybierać różne formy: od owalnej o nieznacznym promieniu krzywizny, do form o ostrych krawędziach (klin). W literaturze kąt rozwarcia powierzchni przyłożenia często oznacza się symbolem ε (rys. 2.6).



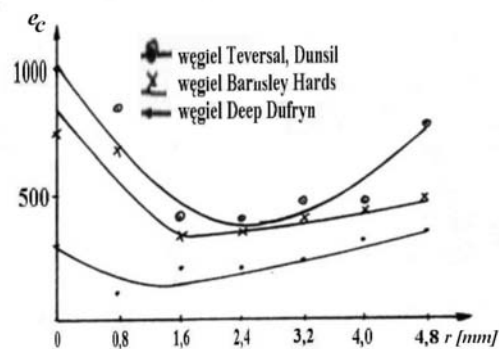
Rys. 2.6. Stosowane kształty powierzchni przyłożenia (widok od strony powierzchni natarcia) [68].

Publikowane w literaturze badania wykazują, że zmieniając kąt ε od wartości $\varepsilon = 180^\circ$ (powierzchnia płaska) do $\varepsilon = 60^\circ$ (powierzchnia klinowa) przy zachowaniu tej samej głębokości skrawania np. $h = 15\text{mm}$, siły skrawania maleją aż o ok. 64% [82]. Niestety pociąga to za sobą spadek efektywności skrawania – spada ilość odspojonego materiału, wzrasta energia całkowita procesu. Narzędziom o ostrych krawędziach na powierzchni przyłożenia towarzyszy także inne bardzo niekorzystne zjawisko, a mianowicie koncentracja naprężeń na narożach ostrzy. W efekcie, intensywniej się one zużywają. Wg autorów badań [68,73,82] optymalnym kątem rozwarcia powierzchni przyłożenia jest kąt $\varepsilon = 120^\circ$ (kąt rozwarcia powierzchni przyłożenia nie powinien być mniejszy od $\varepsilon = 120^\circ$ rys. 2.7). Przy takim kącie, zużywanie się noży jest najmniejsze.



Rys. 2.7. Wpływ kąta klina ε , ostrza klinowego, na energię właściwą e_c dla różnych materiałów [73].

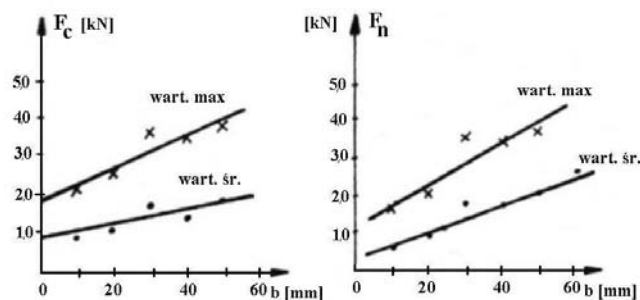
Owalnie ukształtowana powierzchnia przyłożenia rację swego bytu zawdzięcza temu, że taki kształt, w stosunku do innych, jest najbardziej optymalny z punktu widzenia odporności na zużycie. Spowodowane jest to tym, że na owalnie ukształtowanym ostrzu nie obserwuje się koncentracji naprężeń (brak naroży) przez co nie jest ono tak narażone na zwiększone zużycie. Dla tak ukształtowanych noży najkorzystniej jest, kiedy promień krzywizny owalu zawiera się w przedziale $1,6 \div 3,2\text{mm}$. Wtedy energia właściwa e_c jest najmniejsza (rys. 2.8) [73].



Rys. 2.8. Zmiana energii właściwej e_c w zależności od promienia krzywizny owalu narzędzia dla różnych skrawanych materiałów [73].

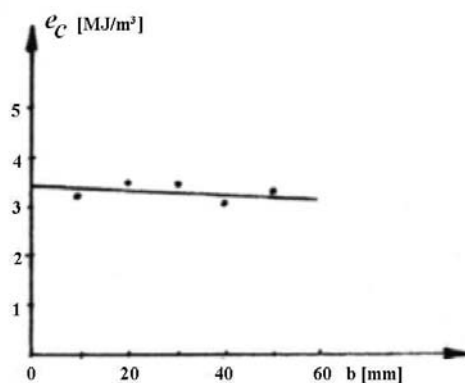
2.1.4. Szerokość noża

Skrawając materiał kruchy nożem o prostej głównej krawędzi skrawającej, siły docisku i skrawania a także ilość zeskrwanego materiału wzrastają liniowo (niewiele odbiegają od liniowego) razem z szerokością noża b (rys. 2.9) [67,84,90]



Rys. 2.9. Zależność sił skrawania i docisku od zmian szerokości noża b (pozostałe parametry niezmiennie) [84]

W konsekwencji powyższych zależności Roxborough [84] stwierdza, że energia właściwa pozostaje w zasadzie niezmienna. Jednakże daje się zauważyć pewne tendencje zniżkowe wraz ze wzrostem szerokości noża (rys. 2.10) [84]. Inni autorzy [4,5] przytaczając wyniki badań skrawania węgla sugerują, iż skrawanie węgla kruchych o dużych kątach bocznego rozkruszania, narzędziami o zwiększającej się szerokości ostrza, powinien towarzyszyć wzrost energii całkowitej. Natomiast dla węgla zwięzłych (o większej spoistości) o małych kątach bocznego rozkruszania tendencja jest odwrotna – wzrostowi szerokości ostrza towarzyszy spadek energii właściwej e_c .

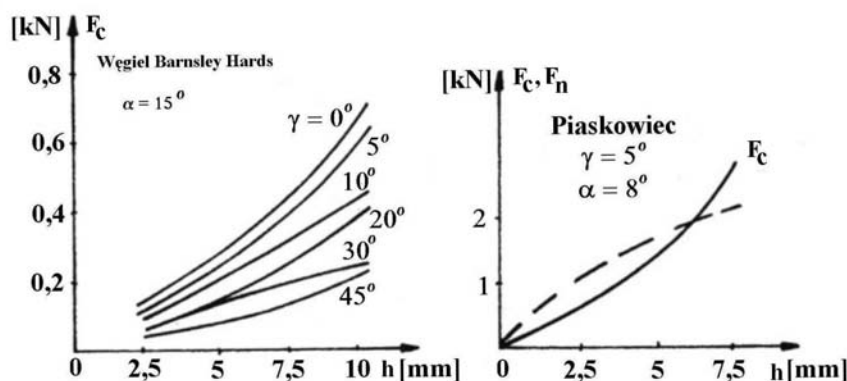


Rys. 2.10. Zależność energii właściwej od zmian szerokości noża [84].

2.1.5 Głębokość skrawania

Powszechnie znaną rzeczą z literatury i z doświadczeń jest to, iż wraz ze wzrostem głębokości skrawania h siły działające na nóż wzrastają [4,52,63,67,91]. Jednakże charakter przebiegu zmian jest bardzo zróżnicowany. Zależny jest on w głównej mierze od typu skrawu, rodzaju skrawanego materiału a także kształtu noża i zakresu badanych głębokości (rys. 2.11). W pracy Lebruna [60] podano, że prawo zmienności siły skrawania w funkcji głębokości skrawania h jest funkcją paraboliczną. Jednakże do celów eksperymentalnych dopuszcza on pewnego rodzaju uproszczenie. Polega ono na tym, że można przyjąć, iż siła skrawania jest proporcjonalna do głębokości skrawania. Również wg zależności parabolicznej wzrasta ilość uzyskiwanego urobku z 1mb skrawu wraz z większą głębokością skrawania [84,91]. Na tej podstawie autorzy podają, że kąt bocznego rozkruszania pozostaje stały. Z kolei [68] przedstawia odmienny pogląd i twierdzi, że kąt

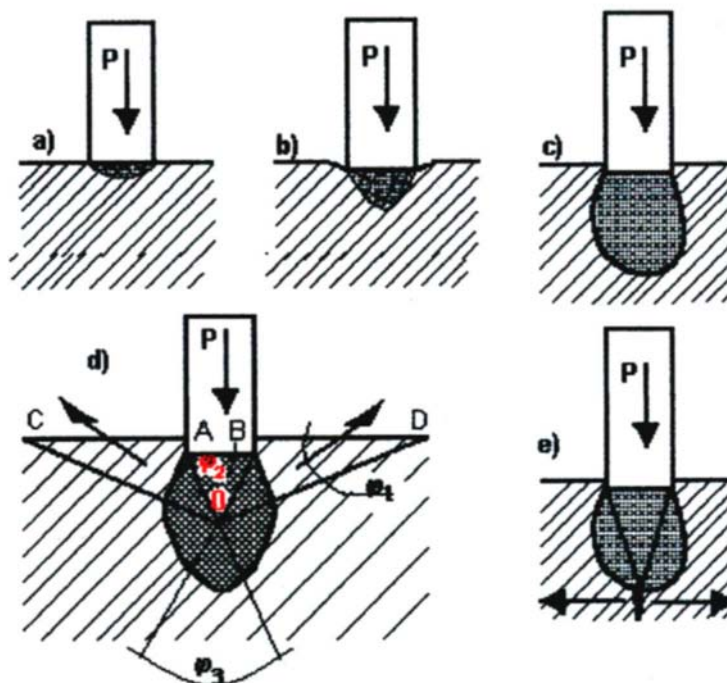
bocznego rozkruszania w funkcji głębokości skrawania ma wyraźnie tendencję malejącą.



Rys. 2.11. Zależność siły skrawania i docisku od głębokości skrawu dla węgla i piaskowca [63, 91].

2.1.6 Teoria strefy sprasowania

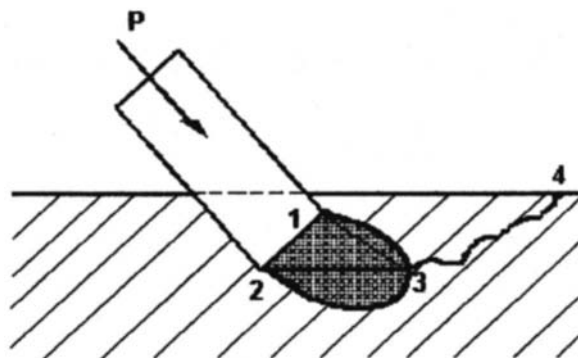
W teorii skrawania materiałów kruchych pochodzenia naturalnego ugruntowaną pozycję zajmuje tzw. *teoria strefy sprasowania*. Teoria ta umożliwia przejście od zewnętrznych obserwacji procesów skrawania i ich interpretowania do badania wewnętrznych zjawisk zachodzących w samym procesie. Rozpatruje ona zjawiska zachodzące przy działaniu narzędzi o różnych kształtach na materiał o różnych twardościach np. beton, alabaster, parafina aż do metali. Teorię strefy sprasowania najwygodniej przybliżyć jest na przykładzie wciskanego w skałę sworznia walcowego. Wciskaniu narzędzia w materiał skalny towarzyszy bezpośrednio pod nim powstawanie strefy znacznych naprężeń ściskających (rys. 2.12a). Wielkość i kształt tej strefy jest ściśle powiązana z kształtem i rozmiarami narzędzia. Dalsze wciskanie sworznia powoduje powiększanie się strefy naprężeń. W strefie tej występuje zmniejszenie się porów w skrawanym materiale, w pewnym zakresie objętości (adekwatnie do zwięzłości skały rys. 2.16), w której następuje zagęszczenie się ziaren skały. Nazywamy ją strefą sprasowania.



Rys. 2.12. Teoria strefy sprasowania [68].

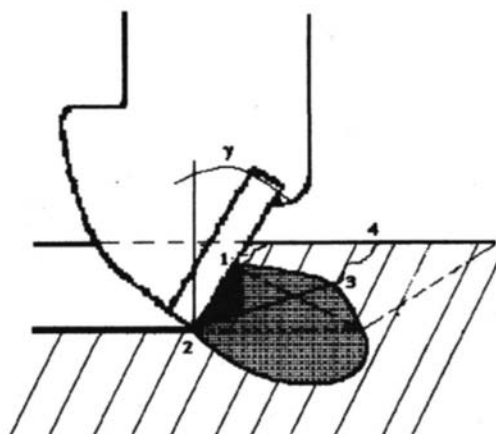
Ze wzrostem siły docisku głębokość strefy sprasowania zwiększa się (rys. 2.12b) pomimo, że początkowe zmniejszenie objętości skały kompensowane jest elastycznymi odkształceniami na jej powierzchni. Zwiększając nacisk na sworzeń, pokonana zostanie wytrzymałość skały na ścinanie, wzdłuż jego obwodu. W efekcie sworzeń zagłębi się a strefa sprasowania sięgnie głębiej co spowoduje, że pęknięcia wokół sworznia znikną. Przy dalszym wroście nacisku powstające wokół strefy sprasowania naprężenia rozciągające wywołają w najslabszych punktach skały początkowe wewnętrzne pęknięcia (rys. 2.12d). Pęknięcia te zaczynają penetrować skałę kierując się ku swobodnej powierzchni materiału. W ten to sposób następuje odspojenie wióra od calizny.

Bliższy rzeczywistego procesu skrawania jest przykład wciskania sworznia w materiał pod pewnym kątem (rys. 2.13).



Rys. 2.13. Kształt strefy sprasowania w skośnym wciskaniu sworznia w skałę: 1-2-3 powstały klin w strefie sprasowania, 1-3-4 odpajany fragment skały w wyniku działania strefy sprasowania [68].

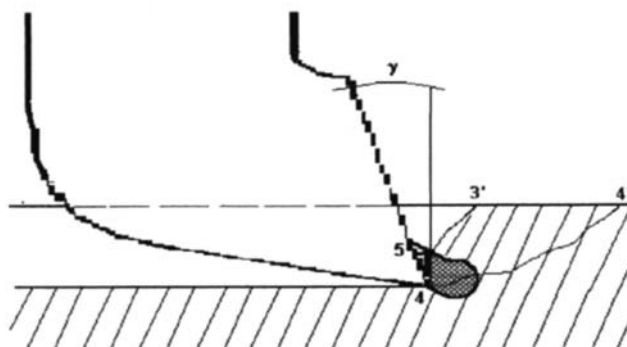
W powyższym przypadku strefa sprasowania była symetryczna. W układzie, gdy sworzeń jest wciskany pod pewnym kątem, strefa sprasowania jest asymetryczna. Odpajanie wióra następuje na granicy strefy sprasowania od strony swobodnej powierzchni (rys. 2.13 1-3-4). Przypomina to skrawanie skały nożem o dużym ujemnym kącie natarcia (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Strefa sprasowania przy skrawaniu nożem o dużym ujemnym kącie natarcia γ : (1-2 strefa miażdżonego materiału, 1-2-3 wydzielony klin, 1-3-4 odspojony fragment skrawanego materiału [68]).

Przy skrawaniu nożem, pomiędzy narzędziem a strefą sprasowania znajduje się jeszcze strefa miażdżonego materiału. Przy sprzyjających warunkach, zmiażdżony

materiał może być wyciśnięty w stronę swobodnej powierzchni. Oderwanie wióra następuje wówczas, gdy strefa sprasowania osiągnie odpowiednie rozmiary, czyli będzie w stanie pokonać siły wewnętrzne skrawanego materiału. Dla noży o dodatnich kątach natarcia wielkość strefy sprasowania jest znacznie mniejsza (rys. 2.15) ale nie ma to większego wpływu na rozmiary elementów wióra. Natomiast mniejsze są za to siły skrawania i docisku oraz oscylacje siły skrawania.

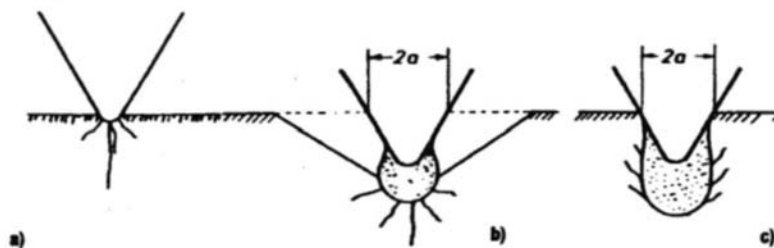


Rys. 2.15. Strefa sprasowania przy skrawaniu nożem o dodatnim kącie natarcia γ . 5-4 strefa miażdżonego materiału, 3'-4' odrywany wiór [68].

2.1.7 Skrawanie materiałów kruchych pochodzenia naturalnego

Skrawanie materiałów kruchych pochodzenia naturalnego przebiega bardzo osobiście w stosunku do skrawania metali, drewna czy tworzyw sztucznych. O ile samo zainicjowanie skrawania w metalach jest bardzo zbliżone dla wszystkich rodzajów (stal, żeliwo, metale nieżelazne) to dla skał jest ono zróżnicowane. Podstawową przyczyną różnic w zainicjowaniu skrawania jest porowatość skał. Mechanizm niszczenia struktury wewnętrznej materiału skalnego przebiega odmiennie dla materiałów spoistych (np. granit, bazalt, antracyt) i dla materiałów porowatych (np. wapień, sól, węgiel). Wciskając ostrze w materiał zwięzły (np. granit) zaobserwujemy natychmiastowe powstawanie szczelin promieniowo rozchodzących się od niego (rys. 2.16 a).

Odmienne procesy obserwuje się przy wnikaniu ostrza w materiał o małej porowatości (rys. 2.16b). W początkowej fazie wciskania ostrza w skałę obserwuje się tuż przed ostrzem strefę sprasowanego materiału. Dopiero po pewnej chwili, potrzebnej do wypełnienia porów, wokół tej strefy pojawiają się szczeliny pęknięć. Proces niszczenia struktury wewnętrznej materiałów o dużej porowatości wymaga znacznych przemieszczeń narzędzia (rys. 2.16c).



Rys. 2.16. Wielkość strefy sprasowania przy wciskaniu klinowego narzędzia w materiał kruchy o różnych stopniach porowatości, a) materiał zwięzły, b) lekko porowaty, c) o dużej porowatości [38].

Strefa sprasowanego materiału jest bardzo duża. Narzędzie wciskane jest na duże głębokości bez większych, zauważalnych zmian na swobodnej powierzchni materiału. Dopiero powstanie odpowiednio dużej strefy sprasowania wywołuje pęknięcia i odspojenie materiału.

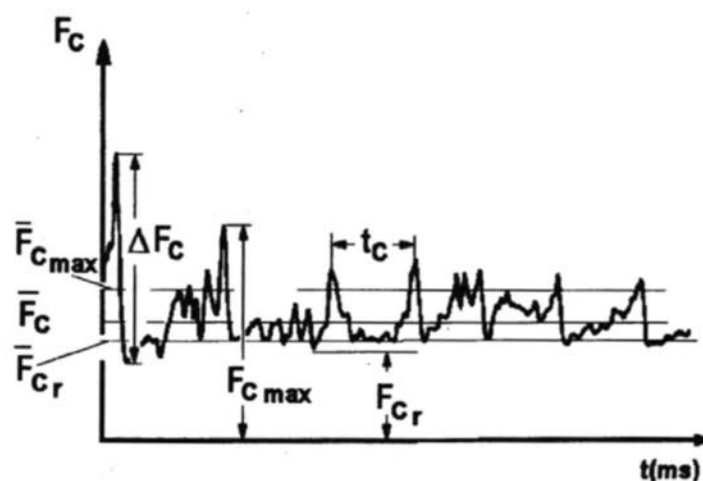
Drugą zasadniczą różnicą w skrawaniu materiałów skalnych jest zjawisko wióra. W przypadku metali wiór jest zazwyczaj regularny i ciągły, bardzo często rozgrzany. Efektem skrawania materiałów skalnych nie jest wiór w takim samym znaczeniu jak dla metali. Przede wszystkim nie jest on ciągły ale korpuskularny, bardzo często o dużych rozmiarach. Odrywa się on od całizny i rozprzestrzenia się w różnych kierunkach i na duże odległości w sposób losowy. Elementy wióra materiałów kruchych bywają często tak małe, że dopiero ich ogromne nagromadzenie w jednym miejscu pozwala je zlokalizować (jest to pył). Zjawisko powstawania pyłu jest ze wszech miar niepożądane. Niestety, jest ono nierozdzielnie związane z procesem skrawania tych materiałów.

Trzecia zasadnicza różnica w skrawaniu materiałów kruchych, to siła skrawania, a właściwie jej oscylacje. Oscylacje sił skrawania są ściśle powiązane z budową wewnętrzną materiałów. Im materiał bardziej zwięzły, tym większe oscylacje sił. Związane jest to z tym, że dla skał zwięzłych różnica sił pomiędzy początkiem skrawania a momentem kiedy zostaje odspojony wiór jest dość znaczna i proporcjonalna do właściwości mechanicznych skały (f_c i f_t). Spotykane najczęściej w literaturze przebiegi czasowe siły skrawania materiałów kruchych mają charakter przebiegów piłokształtnych (rys. 2.17).



Rys. 2.17. Wyidealizowany przebieg czasowy siły skrawania F_c w funkcji drogi l dla skał [59].

Przedstawiony w ten sposób przebieg czasowy jest bardzo wyidealizowany. Niemniej jednak, można zauważyć na nim poszczególne etapy skrawania (punkty 1,2,3 i 4) gdzie: 1 wejście narzędzia w skrawany materiał, 2,3 i 4 narastanie siły skrawania z chwilowymi jej spadkami wywołanymi pokonywaniem oporów skrawania do chwili 4. W tym punkcie następuje zakończenie cyklu odspojenia wióra i ponowne wejście narzędzia w skrawany materiał. Wielkość oscylacji siły zależy również od parametrów konstrukcyjnych narzędzia skrawającego (zostanie to omówione dokładniej w dalszej części pracy). Ilość poszczególnych etapów skrawania (punkty 1 ... 4) jest uzależniona głównie od geometrii ostrza, prędkości skrawania i porowatości skały. Rzeczywiste przebiegi czasowe różnią się od powyższego. Zasadnicza różnica polega na tym, że siła w procesie skrawania nie spada do zera jak to przedstawia rys. 2.17, ale do pewnej, minimalnej wartości, zwanej resztkową siłą skrawania F_{cr} (rys. 2.18) [59]



Rys. 2.18. Rzeczywisty przebieg czasowy siły skrawania F_c . F_{cr} – resztkowa siła skrawania, ΔF_c – użyteczna siła skrawania (wywołuje odspojenie wióra), $\bar{F}_c$ – średnia siła skrawania, $\bar{F}_{cr}$ – średnia siła resztkowa, $\bar{F}_{cmax}$ – średnia maksymalna siła skrawania, t_c – czas elementarnego cyklu skrawania [59].

Na wartość resztkowej siły skrawania F_{cr} wpływa wiele czynników. Jednakże największy i najczęściej podkreślany w literaturze wpływ mają: właściwość skrawanego materiału (porowatość, uławicenie, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie) oraz parametry geometryczne skrawającego narzędzia (kąty przyłożenia, natarcia itd., kształt powierzchni natarcia, przyłożenia). Na wartość resztkowej siły skrawania F_{cr} duży wpływ ma również wielkość strefy kontaktu krawędzi bocznych narzędzia i pozostałej, nienaruszonej calizny skalnej. Im mniejszy kąt bocznego rozkruszania, tym większa siła resztkowa i vice versa. Jak się przypuszcza, związane jest to z tym, że narzędzie przemieszczające się w bruzdzie jest dodatkowo powstrzymywane przez ściany boczne skrawanego

materiału nie mogąc swobodnie przemieszczać się po zakończeniu elementarnego cyklu pracy.

Z przebiegu czasowego z rys. 2.18 można odczytać szereg informacji dotyczących samego procesu jak i właściwości skrawanego materiału. O rozmiarach odspojonego elementu wióra decyduje wartość tzw. użytecznej siły skrawania ΔF_c . Wartość sygnału na przebiegu czasowym informuje o rozmiarze odspojonego wióra – im większa wartość sygnału, tym większy wiór.

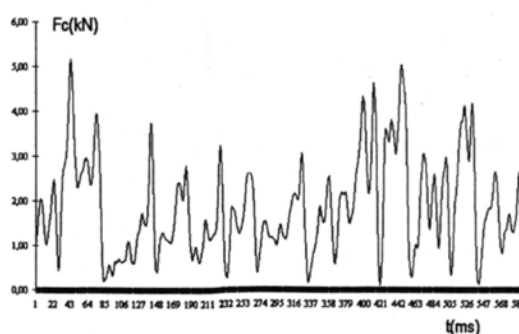
Wartość sił $\Delta F_{c\dot{s}r}$ jak i również $F_{c\dot{s}r}$ posłużyły do podania klasyfikacji procesów skrawania. W pracach Gehringha [22] można znaleźć pojęcie *efektywności procesu skrawania* zdefiniowane jako stosunek użytecznej siły skrawania $\Delta F_{c\dot{s}r}$ do średniej siły skrawania $F_{c\dot{s}r}$, tj.

$$\Delta F_{c\dot{s}r} / F_{c\dot{s}r}. \quad (6)$$

Wg [22] efektywność skrawania można podzielić w zależności od powyższej formuły na :

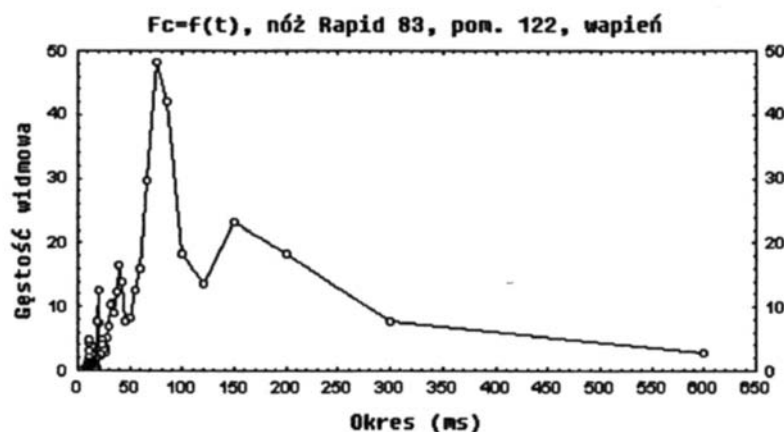
- * <1 – bardzo zła,
- * 1 ÷ 2 – zła,
- * 2 ÷ 3 – średnia,
- * 3 ÷ 4 – dobra,
- * 4 ÷ 5 – bardzo dobra,
- * > 5 – nadzwyczaj dobra.

Czasowy przebieg siły skrawania $F_c = f(t)$ zarejestrowany na rejestratorach można traktować jako szereg czasowy o charakterystycznych parametrach dla konkretnej konstrukcji narzędzia i cykliczności procesów odspajania. Takie potraktowanie przebiegów czasowych siły skrawania daje możliwość wykorzystania aparatu matematycznego stosowanego do analizy szeregów czasowych – Analizy Widmowej Fouriera. Wykorzystanie do analizy przebiegów czasowych siły skrawania, Szybkiej Transformy Fouriera (FFT), dało możliwość zaobserwowania związków zachodzących pomiędzy geometrią ostrza, właściwościami fizycznymi skrawanego materiału a cyklicznością odspajania fragmentów wióra (rys. 2.19) [43].



Rys. 2.19. Przebieg czasowy siły skrawania wapienia nożem Rapid 83 [43].

Poddany analizie FFT przedstawiony przebieg czasowy dał zaskakującą odpowiedź w postaci jednoznacznego widma charakterystycznego dla kilku cykli okresowych o różnych długościach (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Wykres gęstości widmowej dla przebiegu z rys.2.19 [43].

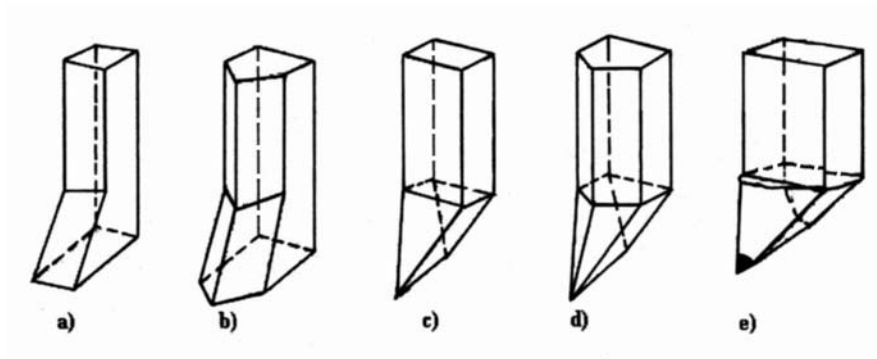
Zmiana geometrii ostrza narzędzia powodowała natychmiastową zmianę gęstości widmowej. Dało się zaobserwować, że gęstości widmowe były skorelowane z geometrią narzędzia. Miały one nieco inne rozkłady dla różnych skrawanych materiałów, ale cechy charakterystyczne rozkładu dla danej konstrukcji narzędzia były takie same. Tak więc stosując aparat matematyczny w postaci analizy szeregów czasowych można poszerzyć i zgłębić obserwacje procesu a także otrzymać dodatkowe dane do analiz numerycznych.

2.1.8. Wpływ kształtu powierzchni natarcia

Najczęściej spotykane kształty ostrzy narzędzi skrawających, przedstawionych na rysunku 2.3, można sprowadzić do form podstawowych, które ilustruje

rys. 2.21, tj. :

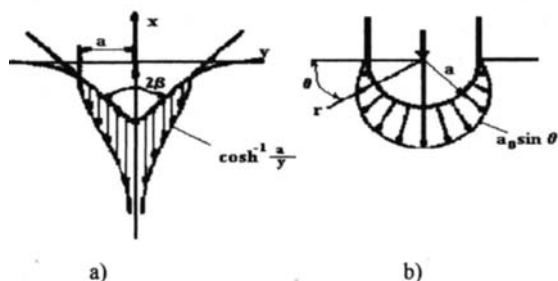
- ostrza o płaskiej powierzchni natarcia i przyłożenia (rys. 2.21a),
- ostrza o klinowej powierzchni natarcia i płaskiej powierzchni przyłożenia (rys. 2.21b),
- ostrza o płaskiej powierzchni natarcia i klinowej powierzchni przyłożenia (rys. 2.21c),
- ostrza o klinowej powierzchni natarcia i przyłożenia (rys. 2.21d),
- ostrze o owalnej powierzchni natarcia lub stożkowe (rys. 2.21e).



Rys. 2.21. Stosowane formy geometryczne ostrzy do skrawania skał : a) o płaskiej powierzchni natarcia i przyłożenia, b) o klinowej powierzchni natarcia i płaskiej powierzchni przyłożenia, c) o płaskiej powierzchni natarcia i klinowej powierzchni przyłożenia, d) o klinowej powierzchni natarcia i przyłożenia, e) ostrza o owalnej pow. natarcia lub stożkowe.

Wraz z rozwojem badań laboratoryjnych i przemysłowych nad obniżeniem wartości siły skrawania i docisku, rozwijały się teorie opisujące wpływ kształtu powierzchni natarcia np. na wskaźniki siłowe procesu. Najstarsze historycznie narzędzia miały płaski kształt powierzchni natarcia. Z upływem lat jej kształt zaczął przybierać formy przestrzenne. Wiele badań, które istnieją w literaturze przedmiotu potwierdza, że przejście z płaskiej powierzchni natarcia w przestrzenną – np. klinową o kącie wierzchołkowym Σ zmienia warunki skrawania. Spowodowane jest to tym, że skrawając materiał nożem o płaskiej powierzchni natarcia $\Sigma=180^\circ$, skrawanie następuje na drodze pokonywania tylko naprężeń ściskających w skale. Z uwagi na to, że wytrzymałość skały na ściskanie ma najwyższą wartość, taki model skrawania jest niekorzystny. Natomiast, gdy kąt wierzchołkowy $\Sigma \neq 180^\circ$ skrawanie materiału kruchego odbywa się na bardziej złożonej drodze. Niszczenie struktury wewnętrznej materiału jest dokonywane nie tylko poprzez wywoływanie naprężeń ściskających ale i rozciągających (rozrywających) [4]. Wytrzymałość skał na rozrywanie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie jest mała. W udziale naprężeń rozrywających, wywoływanych w skale podczas skrawania, należy upatrywać obniżenia wskaźników siłowych samego procesu [8].

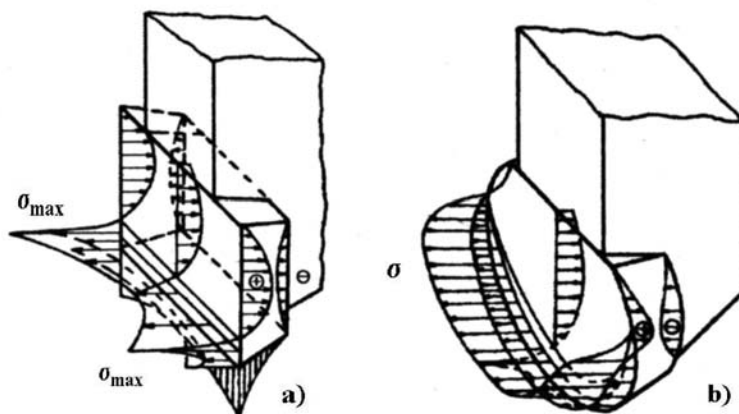
Aby móc łatwiej zrozumieć złożoność tematu, należy zacząć od stanu naprężeń w skale jak i skrawającym narzędziu. Hipotetyczne rozkłady naprężeń jakie powstają przy wnikaniu narzędzi o odmiennych kształtach powierzchni natarcia w półpłaszczyznę skalną są zdecydowanie różne, odwzorowując w dużej mierze kształt tej powierzchni (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Hipotetyczne rozkłady naprężeń w skale wywołane przez ostrza o różnych kształtach powierzchni natarcia a) klinowym, b) owalnym [59].

Powyższe rozkłady naprężeń są najczęściej podstawą do dalszej analizy teoretycznej i wytycznych do badań stanowiskowych. Z rysunku 2.22 widać, że dla ostrza klinowego, pod jego krawędzią występuje nieciągłość rozkładu nacisków. Z kolei na rysunku 2.23 przedstawiono hipotetyczne rozkłady naprężeń, jakie powstają w skale podczas wnikania w nią narzędzi o płaskiej powierzchni natarcia i o różnych jej zarysach. Zgodnie z klasyczną teorią mechaniki ośrodków ciągłych, na ostrych krawędziach występuje koncentracja naprężeń a wobec tego trudno jest określić ich wartość.

Należałoby się spodziewać, że takie zjawisko powinno sprzyjać obniżaniu wskaźników energetycznych i siłowych procesu skrawania w porównaniu do narzędzi podobnych do narzędzia z rys. 2.22b. Niestety, w świetle publikowanej literatury, nie jest to takie oczywiste. Kształt powierzchni natarcia ostrza wywołuje największe rozbieżności opinii co do wpływu na proces skrawania skał.



Rys. 2.23. Rozkłady naprężeń na ostrzu noża o płaskiej powierzchni natarcia, a) o prostoliniowej krawędzi skrawającej, b) o owalnej krawędzi skrawającej [39].

Przedstawione na rys. 2.23, rozkłady naprężeń, pokazują tylko stan na ostrzach o płaskiej powierzchni natarcia, różniących się zarysem a już można zauważyć istotne różnice w rozkładzie tych naprężeń. Powstające naciski na powierzchni narzędzia wywołane reakcją otoczenia na pracujące narzędzie są podstawą do wyznaczenia siły działającej na nią. Dokładniej mówiąc, siła działająca na narzędzie jest sumą tych nacisków. Naciski normalne i jednostkowe siły tarcia rozkładają się nierównomiernie. Największa ich koncentracja występuje w pobliżu krawędzi skrawających. Jak można zauważyć (rys. 2.23), kształt i wielkość pola naprężeń jest zależna głównie od parametrów geometrycznych ostrza. Dla prostoliniowej krawędzi obserwuje się znaczne spiętrzenie naprężeń w narożach ostrza. Wartość tych naprężeń w stosunku do naprężeń w środkowej części krawędzi skrawającej jest wielokrotnie większa. Zjawisko koncentracji naprężeń na narożach ostrza zdecydowanie wpływa na proces jego zużywania się. W miejscach tych następuje intensywne tępienie się noży. Ponadto, miejsca o zwiększonej koncentracji naprężeń zużywając się, powodują zmianę kształtu krawędzi skrawającej z prostoliniowej na owalną. Zmienia się promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

Polemika jaka toczy się na łamach czasopism nie daje zatem jednoznacznych odpowiedzi głównie co do tego, jaki kształt powierzchni natarcia ostrza jest najkorzystniejszy. Pociąga to za sobą ciągłe opracowywanie nowych konstrukcji narzędzi do skrawania materiałów kruchych, co wprowadza kolejne rozmycie problemu.

Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy wyróżnić można właściwie trzy grupy poglądów dotyczących wpływu ukształtowania powierzchni natarcia ostrza na przebieg i efekty skrawania naturalnych materiałów kruchych:

I grupa poglądów dotyczy sugestii, że przestrzenne, ostrokrawędziowe formy powierzchni natarcia sprzyjają obniżaniu wskaźników siłowych i energetycznych procesu skrawania.

II grupa, to poglądy mówiące, że przestrzenne, ostrokrawędziowe formy powierzchni natarcia powodują pogorszenie wspomnianych wskaźników. Sugerują tym samym, że lepszymi są narzędzia o płasko ukształtowanej powierzchni natarcia.

III grupa, to poglądy, z których wynika, że przestrzenne formy powierzchni natarcia ostrza nie mają wpływu na rozpatrywane wskaźniki.

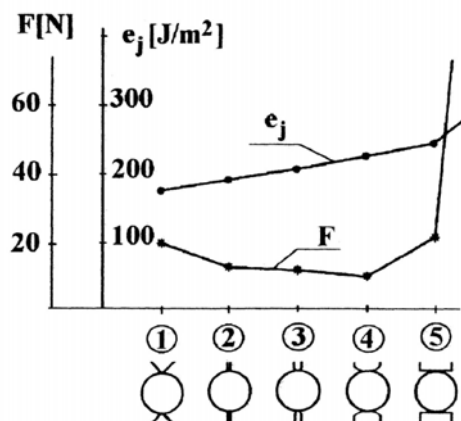
Pierwsza grupa poglądów jest dość szeroko reprezentowana przez naukowców badających tę tematykę. Zagadnieniom porównania procesów skrawania nożami o różnych kształtach zajął się np. Niestierow [62]. Analizował on oddziaływanie na skałę narzędzi o różnych kształtach powierzchni natarcia : płaskiej, owalnej, klinowej i o kształcie niesymetrycznego klina. Analizy porównawcze dokonał na podstawie pomiarów stanowiskowych i symulacji komputerowych z wykorzystaniem systemu MES. Jako punkt odniesienia przyjął on w swojej pracy parametry skrawania dla ostrza o płaskiej powierzchni natarcia. Wg jego badań siła skrawania dla ostrza o płaskiej powierzchni natarcia była o 60% większa od siły dla ostrza o owalnej powierzchni natarcia, o 73% większa od ostrza o klinowej powierzchni natarcia i aż o 164% większa dla ostrza o powierzchni w kształcie niesymetrycznego klina. Porównanie sił dla ostrza

o klinowej powierzchni natarcia: klin symetryczny i niesymetryczny, dało niespodziewany efekt w takiej postaci, że siła na nożu z klinem symetrycznym była o 52% większa niż siła dla ostrza o klinie niesymetrycznym. Otrzymane przez autora publikacji wyniki badań numerycznych potwierdziły jego badania stanowiskowe. Pokazały one, że największe siły są w przypadku noża o płaskiej powierzchni natarcia a najmniejsze dla noży o klinowej powierzchni natarcia, dokładniej dla klina niesymetrycznego. Porównanie wyników badań stanowiskowych i numerycznych pokazało, że wartości sił skrawania otrzymanych doświadczalnie są o 12 do 30% większe od wyników numerycznych. Badania różniły się między sobą ilościowo, ale były zgodne jakościowo. Powstałe różnice sam autor tłumaczy dokonanymi przez niego uproszczeniami w fazie formułowania zadania dla symulacji numerycznych.

Zbliżone wyniki badań otrzymał również Bieron [3,4,5]. Analizie poddał trzy formy powierzchni natarcia : płaską, klinową i owalną. Za wielkość wyjściową przyjął on parametry skrawania ostrzem o płaskiej powierzchni natarcia. Podobnie jak u Niestierowa, największe siły skrawania były dla noży o płaskiej powierzchni natarcia. Siły skrawania narzędziami o owalnej powierzchni natarcia kształtowały się na poziomie 90 – 95% wartości siły dla płaskiej powierzchni natarcia i 85 – 90% dla powierzchni klinowej, w stosunku do powierzchni płaskiej.

U Roxborough'a również znajdujemy potwierdzenie powyższych wyników badań [82,84]. Stwierdza on, że klinowo ukształtowana powierzchnia natarcia nie zmienia stosunku siły skrawania F_c do siły normalnej F_n . Wraz ze zmniejszaniem się kąta klina zauważalnie maleje wartość siły skrawania, a charakterystyka zmniejszania się siły ma przebieg prostoliniowy. Niestety wraz ze spadkiem siły maleje również ilość urobku uzyskiwanego z 1mb skrawu. Skutkiem tego jest zmiana jednostkowej energii skrawania. Jeśli porównać ze sobą siły skrawania narzędziem o płaskiej powierzchni natarcia i narzędziem o klinowej powierzchni natarcia o kącie klina równym 90^0 to otrzyma się 30% spadek siły skrawania F_c i normalnej F_n . Odbywa się to niestety przy 14% wzroście energii jednostkowej.

W polskojęzycznej literaturze także można znaleźć potwierdzenie takiego stanu rzeczy. W pracy Zawady [96] zostały przytoczone wyniki badań dla kształtowania się siły i energii kruszenia materiałów skalnych. Kruszeniu mechanicznemu, w wyniku ściskania pomiędzy szczękami kruszarek o różnych kształtach elementów roboczych, poddane zostały próbki skalne wykonane z tego samego materiału i o tym samym kształcie. Wyniki tych badań przedstawia rys. 2.24.



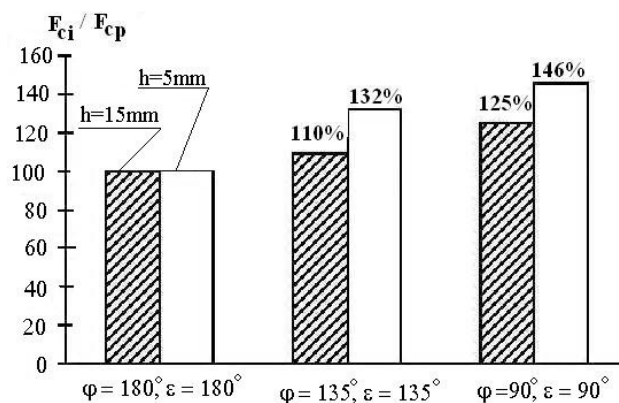
Rys. 2.24. Geometria elementu roboczego kruszarki w świetle kształtowania się siły i jednostkowej energii kruszenia. [96].

Zniszczenie próbki skalnej przez narzędzie o owalnej powierzchni natarcia i promieniu krzywizny 6 mm charakteryzowało się najmniejszą wartością siły. Wartość ta jest nieco niższa od sił dla narzędzi o bardzo małej szerokości ostrza (0,5mm i 2mm, poz. 2 i 3), od których to kształtów należało się spodziewać najmniejszych sił. Większej siły należało użyć w przypadku ostrza o klinowej powierzchni roboczej o kącie klina 90° (poz. 1). Kruszenie z największą siłą przebiegało dla narzędzia o płaskiej powierzchni roboczej. Natomiast energia jednostkowa zmieniała się liniowo od najmniejszej wartości dla ostrza o klinowym kształcie powierzchni roboczej poprzez narzędzia o owalnej powierzchni natarcia (o zróżnicowanym promieniu krzywizny) po narzędzie o płaskiej powierzchni natarcia.

Przeciwstawieniem powyższych teorii są wyniki badań należących do drugiej grupy. Tak np. badania Pomeroya [73,74], nad wpływem kształtu powierzchni natarcia na proces skrawania materiałów kruchych prowadzone były pod kątem porównania noży o płaskiej i klinowej powierzchni natarcia. Według wspomnianych badań jednostkowa energia skrawania dla noża o klinowych powierzchniach natarcia i przyłożenia była większa, a ilość urobku z 1mb skrawu była mniejsza niż przy skrawaniu nożem o płaskich powierzchniach natarcia i przyłożenia. Zaobserwowano także, że wprowadzenie do użycia noży o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia powodowało znaczny wzrost siły skrawania a także spadek ilości uzyskiwanego materiału skalnego z 1mb skrawu. Konkludując, Pomeroy dowodzi, że krawędź na czołowej powierzchni noża nie daje spodziewanych efektów w obniżeniu energochłonności skrawania, w stosunku do noży o płaskich powierzchniach roboczych. Może natomiast mieć ujemny wpływ na energochłonność skrawania zwłaszcza w przypadku skrawania twardych skał i węgla. Wniosek jaki postawił Pomeroy na podstawie swoich badań jest taki, że dalsze komplikowanie kształtu powierzchni natarcia i przyłożenia

powoduje znaczny wzrost jednostkowej energii skrawania. Najgorsze efekty procesu skrawania otrzymał on dla noży o ostrzu stożkowym. Stąd też Pomeroy zaleca w swoich pracach stosowanie do skrawania materiałów kruchych noży o płaskiej powierzchni natarcia.

Również do tej grupy poglądów zaliczyć można badania Sakaloglou [85]. Wynika z nich, że klasyczne narzędzie klinowe o płaskiej powierzchni natarcia ($\varphi = 180^\circ$) i płaskiej powierzchni przyłożenia ($\varepsilon = 180^\circ$) pracuje z najmniejszymi oporami skrawania. Siła skrawania potrzebna do wykonania pracy jest również najmniejsza w stosunku do narzędzi o klinowych powierzchniach (rys. 2.25). Autor tych badań również sugeruje, że dalsze modyfikowanie w kierunku skomplikowania geometrii ostrza spowoduje spadek efektów skrawania. Analiza (rys. 2.24) pozwala stwierdzić, że: najmniejsza efektywność pracy noży jest dla konstrukcji ostrzy o klinowo ukształtowanych powierzchniach natarcia, tj. dla małych kątów klina powierzchni natarcia ($\varphi = 90^\circ$ lub $\varphi = 135^\circ$) oraz dla małych kątów klina pow. przyłożenia ($\varepsilon = 90^\circ$). Najgorsze efekty skrawania uzyska się przy użyciu noży o równocześnie małych kątach klina powierzchni natarcia i przyłożenia ($\varphi = 90^\circ$ i $\varepsilon = 90^\circ$) oraz dla przypadku $\varphi = 135^\circ$ i $\varepsilon = 90^\circ$.



Rys. 2.25. Względna zmiana siły skrawania w zależności od kształtu powierzchni natarcia i przyłożenia (φ - kąt klina na powierzchni natarcia, ε - kąt klina na powierzchni przyłożenia) [23] (F_{ci} - siła skrawania i -tym ostrzem, F_{cp} - siła skrawania nożem o płaskich pow. natarcia i przyłożenia).

Trzecią grupę poglądów dotyczących wpływu kształtu powierzchni natarcia na wielość obciążenia noża skrawającego naturalny materiał kruchy, reprezentuje np. Wilhelm [93], który w swoich badaniach nad skrawaniem soli kamiennej używał noży „daszkowych” (noże o klinowej powierzchni natarcia i przyłożenia) oraz klasycznych klinowych. Wg niego proces skrawania nożami „daszkowymi” przebiega z nieco mniejszą energią skrawania, ale jest ona porównywalna z energią skrawania nożami o płaskiej powierzchni natarcia. Autor podaje, że jego rozważania teoretyczne pokrywają się z wynikami badań stanowiskowych. Jest to

zupełnie w opozycji, do również teoretycznych rozważań nad kształtowaniem się siły skrawania, przeprowadzonymi przez Evansa [18], popartymi badaniami doświadczalnymi Pomeroy'a [73,74].

2.2. Podsumowanie dokonanego przeglądu literatury

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury można stwierdzić, że ze względu na dużą rozpiętość i właściwości skrawanych materiałów, różnorodność stosowanych metod skrawania skał (różna kinematyka pracy ostrza) oraz parametrów skrawania, opracowanie idealnego modelu noża skrawającego materiał kruchy jest bardzo trudne. Chcąc sprostać wszystkim wymaganiom technologiczno – ekonomicznym stawianym skrawającym narzędziom nie można rozwiązać tego problemu w sposób jednoznaczny. Wynika to stąd, że wiele czynników, które należałoby przyjąć za wzorcowe, stoi często w opozycji do siebie. Spełnienie jednego warunku pociąga za sobą niespełnienie innego warunku. Przedstawione w przeglądzie literatury badania dowodzą, że idealne parametry konstrukcyjne, z uwagi na wartość działających na ostrze sił jak i wartość jednostkowej energii skrawania, bardzo często niekorzystnie wpływają na trwałość ostrza. Zestawiając ze sobą przedstawione w literaturze wyniki badań można zauważyć, że urabiające narzędzie powinny charakteryzować następujące parametry [4,8,37,59,62,65,73,74,82]:

- kąt natarcia – biorąc jako parametry podstawowe siły skrawania F_c i normalną F_n powinien być maksymalnie duży. Z uwagi na wartość energii jednostkowej – nie mniejszy niż 25^0 . Przy takim kącie energia jednostkowa przyjmuje minimalne wartości. Ale kąt ten nie może być również zbyt duży z uwagi na zużywanie się i wytrzymałość ostrza.
- kąt przyłożenia – autorzy publikacji są zgodni co do tego, że powinien on wynosić $6^0 \div 7^0$. Wzrost jego wartości powyżej tych wartości zasadniczo nie wpływa na zmianę siły skrawania i normalnej, powoduje jednak spadek wytrzymałości narzędzia. Mniejsze wartości kąta przyłożenia sprzyjają nadmiernie szybkiemu tępieniu się ostrza.
- kształt powierzchni przyłożenia – powierzchnia ta może przybierać różne formy: płaską lub przestrzenną (klinową lub owalną). Przestrzennie ukształtowana powierzchnia przyłożenia korzystnie wpływa na spadek wartości siły skrawania, stąd też powinien on być jak najmniejszy. Z uwagi na energię jednostkową nie powinien on być jednak mniejszy od 120^0 . Inne sugestie mówią, że z punktu widzenia odporności na zużycie, najkorzystniejszym rozwiązaniem jest owalny kształt powierzchni przyłożenia.
- szerokość noża – wartość tego parametru jest ściśle związana ze skrawanym materiałem. Generalnie, liniowe zwiększenie szerokości narzędzia powoduje również liniowy (lub niewiele odbiegający od tego) wzrost siły skrawania i siły normalnej jak również ilości uzyskiwanego urobku z 1mb skrawu. Dla materiałów o dużych kątach bocznego rozkruszania, zwiększenie szerokości noża powoduje wzrost energii jednostkowej. W przypadku materiałów

spoistych, o małych kątach bocznego rozkruszania, wraz ze wzrostem szerokości ostrza możliwe jest zmniejszenie energii jednostkowej.

- głębokość skrawania – generalnie przyjmuje się, że ze wzrostem głębokości skrawania wzrastają siły działające na nóż. Charakter tych zmian jest różny dla różnych materiałów.
- kształt powierzchni natarcia – jej kształt i parametry geometryczne budzą jak do tej pory najwięcej kontrowersji. Wyraźny podział wśród badaczy, na trzy grupy poglądów dotyczących wpływu jej kształtu na wielkość obciążenia noża jest faktem. Wszystkie te poglądy wykluczają się wzajemnie. Jedna grupa opinii podaje, że najkorzystniejsze są zarysy przestrzenne, druga grupa, że komplikowanie kształtu powierzchni natarcia obniża wskaźniki energetyczne i siłowe procesu skrawania. Trzecia grupa opinii podaje, że przestrzenne kształty powierzchni natarcia w zasadzie nie wpływają na proces skrawania. Badacze są prawie zgodni co do wpływu kształtu powierzchni natarcia na zużycie narzędzi. Narzędzia o przestrzennie ukształtowanych powierzchniach natarcia charakteryzują się większą trwałością niż narzędzia o płaskich powierzchniach natarcia. Większość badaczy postuluje również, że kąt klinowo ukształtowanej powierzchni powinien wynosić ok. 120° . Z literatury nie wynika jednoznacznie, która z form przestrzennego ukształtowania ostrza (klinowa czy owalna) w stosunku do siebie lub do płaskiej powierzchni natarcia jest korzystniejsza z uwagi na wskaźniki energetyczno – siłowe procesu skrawania. Nie ma też wyraźnej odpowiedzi co jest przyczyną takiego stanu rzeczy.

3. Uzasadnienie podjęcia tematu

Z przedstawionego w rozdziale 2 przeglądu literatury wynika, że istnieje wiele nieścisłości a wręcz kontrowersji co do wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza skrawającego naturalny materiał kruchy, na obciążenie ostrza. W głównej mierze istota problemu tkwi w tym, że :

1) są trzy rozbieżne opinie o wpływie przestrzennie ukształtowanych powierzchni natarcia na obciążenie skrawającego ostrza,

2) tym samym brak jest jednoznacznych odpowiedzi, czy określony kształt powierzchni natarcia wpływa w sposób istotny na obciążenie noża, wpływając tym samym na wskaźniki energetyczne i siłowe procesu skrawania naturalnych materiałów kruchych,

3) opublikowane wyniki badań porównawczych należy uznać za niewystarczające z uwagi na rozbieżności w stosowanych metodach badawczych, uzyskanych wynikach jak i w świetle prezentowanych ich interpretacji.

Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy należy zatem stwierdzić, że istnieje szereg nieścisłości, wręcz kontrowersji głównie dotyczących wpływu przestrzennych form powierzchni natarcia, na przebieg i efekty skrawania naturalnych materiałów kruchych. W szczególności dotyczy to kształtowania się siły skrawania zależnie od kształtu powierzchni natarcia ostrza. Dlatego też należy uznać za uzasadnione prowadzenie dalszych badań i analiz w poruszonym temacie.

4. Cel i zakres badań

Celem badań była jakościowa ocena wpływu wybranych form powierzchni natarcia ostrza płaskiego noża promieniowego, na kształtowanie się siły skrawania.

Temat zrealizowano wieloetapowo. W pierwszym etapie, metodą elementów skończonych (MES) przebadano wpływ oddziaływań wybranych form geometrycznych powierzchni natarcia (w określonych warunkach oddziaływania) na rozkład generowanych naprężeń, kształtowanie się przemieszczeń ostrza pod wpływem założonej siły obciążającej oraz wartość siły generowanej na ostrzu zależnie od jego przemieszczenia w skrawanym materiale.

W drugim etapie dokonano doświadczalnej weryfikacji analiz numerycznych. Badań dokonano z wykorzystaniem tensometrycznej metody pomiaru siły skrawania na skomputeryzowanych stanowiskach laboratoryjnych i przy wykorzystaniu odpowiednio dobranych noży laboratoryjnych oraz produkowanych i używanych we współczesnym przemyśle wydobywczym.

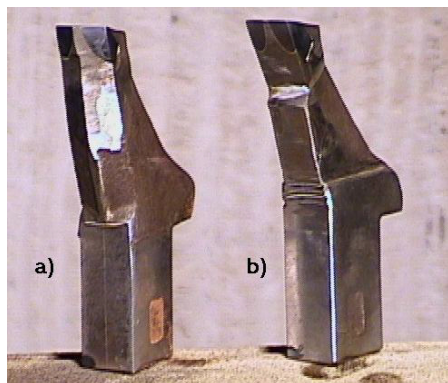
Założono, że uzyskane wyniki badań pozwolą określić, które z przyjętych form geometrycznych powierzchni natarcia noża płaskiego są bardziej korzystne z uwagi na wartość siły skrawania, co w konsekwencji pozwoli na doskonalenie narzędzi i głowic urabiających.

4.1. Wybór rodzaju noży

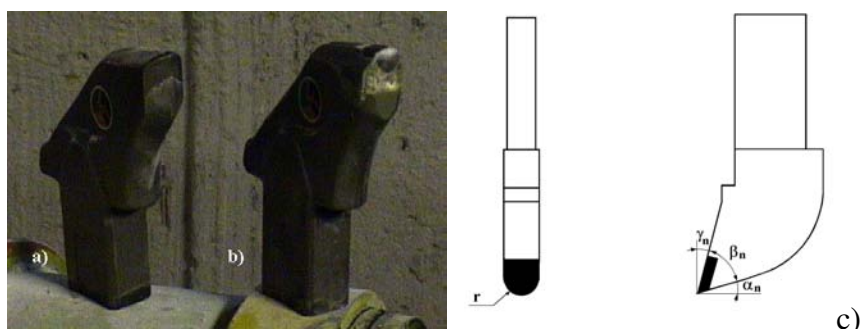
Z uwagi na temat i zakres analizy oraz w oparciu na rozważania przedstawione w rozdziale 2, wybierając noże do badań, kierowano się następującymi kryteriami:

- noże powinny posiadać przestrzenne i płaskie kształty powierzchni natarcia takie, jakie są stosowane w przemyśle, a które budzą kontrowersje co do wartości sił generowanych na ostrzu,
- wymiary geometryczne (zwłaszcza szerokość) powinny być w miarę możliwości identyczne, a przynajmniej porównywalne po to, aby nie powstawały dodatkowe efekty zależne od tych wymiarów (np. czynny przekrój ostrza),
- wartości kątów natarcia dla wszystkich noży powinny być zbliżone,
- zarys ostrzy w kierunku skrawania powinien być jak najbardziej zbliżony,
- noże powinny być ostre, w miarę możliwości o fabrycznym stopniu zaostrenia.

Na podstawie tak przyjętych kryteriów, do badań wybrane zostały noże przedstawione na rys. 4.1 oraz rys. 4.2.



Rys. 4.1. Użyte do badań noże: a) nóż nr 2 – nóż o płaskiej powierzchni przyłożenia i o klinowej powierzchni natarcia; b) nóż nr 1 – nóż o płaskiej powierzchni przyłożenia i natarcia.



Rys. 4.2. Użyte do badań noże, cd.: a) nóż nr 3 – nóż o owalnej powierzchni przyłożenia i o klinowej powierzchni natarcia; b) nóż nr 4 – nóż o owalnej powierzchni przyłożenia i owalnej pow. natarcia, c) nóż nr 5 – nóż o płaskiej powierzchni natarcia i owalnej pow. przyłożenia.

Noże te miały identyczną, maksymalną szerokość ostrza (w strefie skrawania) $b = 22\text{mm}$ oraz zbliżone wartości kątów natarcia i przyłożenia tj.: $\alpha = \gamma = 10^\circ$. Nóż nr 2 (rys. 4.1a) miał powierzchnię natarcia w formie klina, o kącie rozwarcia 120° , oraz płaską powierzchnię przyłożenia. Nóż nr 1 (rys. 4.1b) miał płaskie powierzchnie natarcia i przyłożenia. Nóż nr 3 (rys. 4.2a) był nożem w wykonaniu fabrycznym typu Rapid 89. Charakteryzowała go klinowa powierzchnia natarcia o kącie klina 120° oraz owalna powierzchnia przyłożenia. Nóż nr 4 (rys. 4.2b) posiadał owalną powierzchnię natarcia oraz owalną powierzchnię przyłożenia (promień zaokrąglenia powierzchni natarcia około 10mm). Powierzchnia natarcia noża nr 5 (rys. 4.2c) była płaska, natomiast powierzchnia przyłożenia była owalna (nóż w wykonaniu fabrycznym typu NKP2w, firmy FASING).

4.2. Wybór skał

Aby uzyskać powtarzalność wyników, które nadawały by się do jednoznacznego wnioskowania, należało użyć skały o strukturze możliwie jednorodnej. Skały, która pozbawiona jest wyraźnej łupliwości i uławicenia, które uniemożliwiają miarodajne porównanie wyników badań i ich analizę. Pod względem parametrów fizyko – mechanicznych powinny odpowiadać skałom najczęściej spotykanym w Polsce poddawanych eksploatacji.

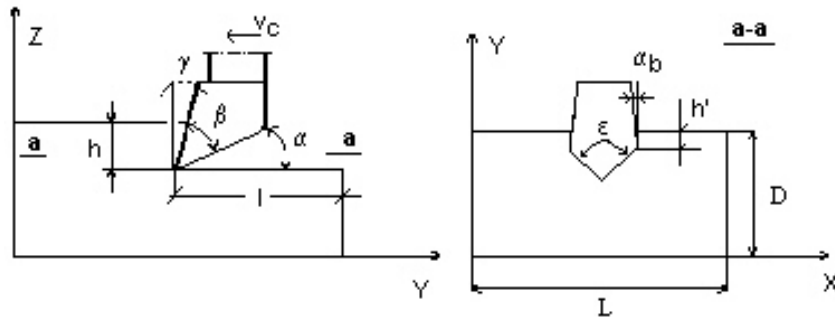
5. Badania numeryczne wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza na siłę skrawania, z wykorzystaniem MES

Do analizy numerycznej wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza na kształtowanie się siły skrawania, użyto systemu elementów skończonych MES. Do badań porównawczych użyte zostały dwa podstawowe rodzaje ostrzy o płaskim i przestrzennym zarysie kształtu powierzchni natarcia. W obrębie przestrzennych zarysów kształtu powierzchni natarcia wybrane zostały zarysy: klinowy i owalny (jak na rys. 4.2a, 4.2b). Tak więc dla przyjętych form geometrycznych powierzchni natarcia, badania przeprowadzone zostały pod kątem określenia rozkładów odpowiednich naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie skrawania oraz wartości siły wymuszającej ruch ostrza (równoważnej sile skrawania), zależnie od jego przemieszczenia na określoną odległość, zgodnie z wektorem prędkości skrawania.

5.1 Założenia do analizy numerycznej

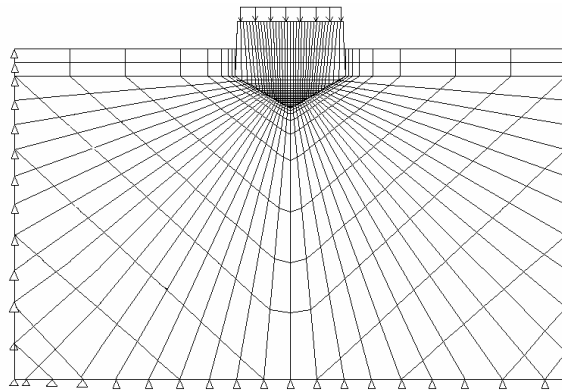
Analizie poddano przypadek skrawów otwierających, odpowiadający skrawaniu ortogonalnemu, co ilustruje rys. 5.1. Stąd też przyjęto oddziaływanie ostrza na próg skalny wysokości h (głębokość skrawania) w odległości l od brzegu próbki o wymiarach $L \times D$ (rys. 5.1a). Analizę przeprowadzono dla przekroju ostrza i skały poprowadzonego w strefie, gdzie skała nie ulega bocznemu rozkruszaniu (rys. 5.1b). W przybliżeniu, taki stan (rys. 5.1b) odpowiada płaskiemu zadaniu kontaktowemu, w płaskim stanie odkształcenia.

Sposób dyskretyzacji modeli ostrzy o rozpatrywanych formach geometrycznych powierzchni natarcia, siatką elementów skończonych przedstawiono na kolejnych rysunkach rys. 5.2, 5.3 i 5.4. Węzłom brzegowym odebrano odpowiednie stopnie swobody.

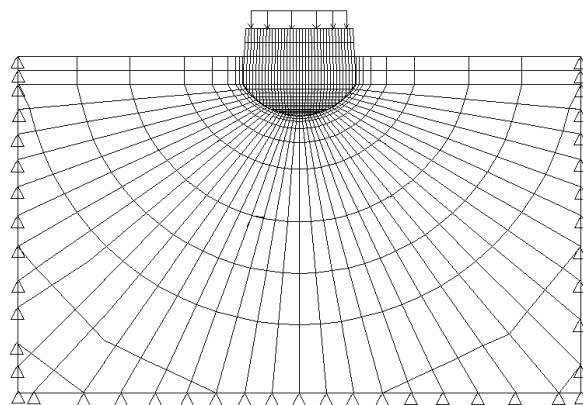


Rys. 5.1. Schemat procesu skrawania ostrzem o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia: v_c – prędkość skrawania, h – głębokość skrawania, D – wysokość próbki, L – szerokość próbki, l – odległość ostrza od brzegu próbki, h' – głębokość wniknięcia ostrza w skałę, w najszerszym miejscu ostrza, α , β , γ , ϵ , α_b – odpowiednio kąt: przyłożenia, ostrza, natarcia, klina na pow. natarcia, boczny przyłożenia (pomocniczy kąt przyłożenia).

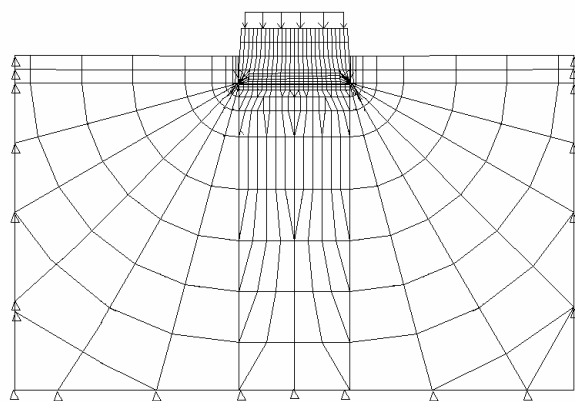
Węzłom podstawy ostrza pozostawiono tylko jeden stopień swobody tj. możliwość przemieszczania się w płaszczyźnie (rys. 28b), zgodnie z wektorem prędkości skrawania. Ruch ostrza w założonym kierunku odbywał się pod wpływem działania sumarycznej siły wymuszającej, składającej się z elementarnych sił przyłożonych w każdym z węzłów podstawy ostrza (oprócz węzłów skrajnych). Jako materiału ostrza przyjęto węgiel B2 o parametrach: moduł Younga $E = 6,3 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, liczba Poissona $\nu = 0,22$. Parametry modelowanej skały zostały odpowiednio przyjęte jako: moduł Younga $E = 10^4 \text{ MPa}$, $\nu = 0,2$; kąt tarcia wewnętrznego $\phi = 30^\circ$ oraz kohezja $c = 0,1 \text{ MPa}$ (jak dla typowego piaskowca szarego).



Rys. 5.2. Dyskretyzacja modelu oraz utwierdzenia węzłów brzegowych dla ostrza o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia.



Rys. 5.3. Dyskretyzacja modelu oraz utwierdzenia węzłów brzegowych dla ostrza o owalnie ukształtowanej powierzchni natarcia.

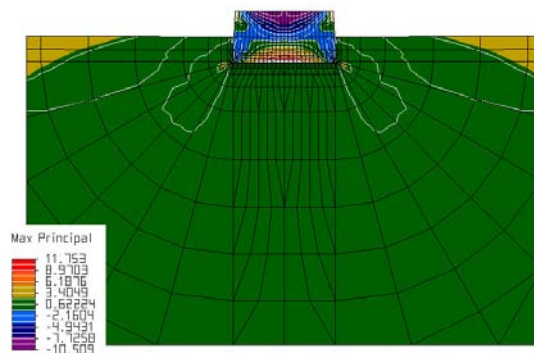


Rys. 5.4. Dyskretyzacja modelu oraz utwierdzenia węzłów brzegowych dla ostrza o płasko ukształtowanej powierzchni natarcia.

Dla warstwy kontaktowej przyjęto: $E = 10^4 \text{MPa}$, $\nu = 0,2$; $\phi = 30^\circ$ oraz $c = 0,1 \text{MPa}$ [44].

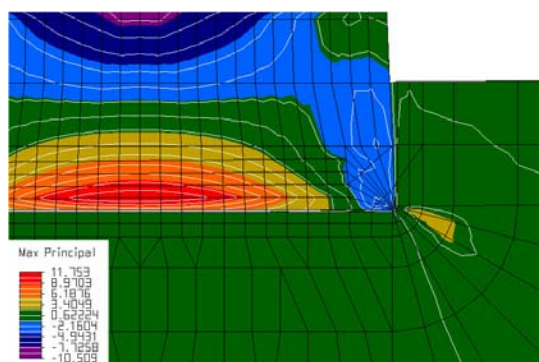
5.2. Wpływ formy geometrycznej powierzchni natarcia na kształtowanie się naprężeń w strefie skrawania

W wyniku przeprowadzonej analizy, uzyskano zróżnicowany obraz pól naprężeń generowanych w strefie skrawania. Dla przyjętych modeli ostrzy uzyskano charakterystyczny, symetryczny w stosunku do osi modelu ostrza, rozkład naprężeń (np. rys. 5.5).



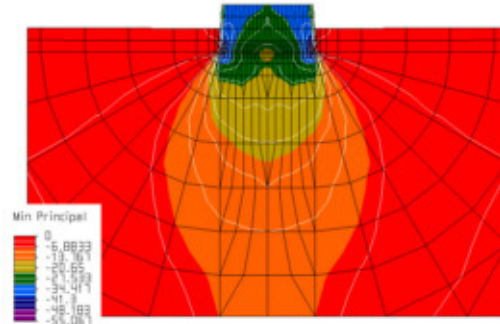
Rys. 5.5. Rozkład naprężeń maksymalnych $\sigma_{\max}$ dla ostrza o płasko ukształtowanej powierzchni natarcia.

Dla ostrza o płaskiej powierzchni natarcia, rozkład naprężeń maksymalnych $\sigma_{\max}$ ilustruje rys.5.5. Charakterystyczna jest tutaj silna koncentracja naprężeń w skrawanej skale, w okolicach naroży ostrza. Naprężenia mają tutaj dodatnie wartości (są to zatem naprężenia rozciągające). W przypadku ostrza, największe wartości naprężeń dodatnich (rozciągających) występują w centralnej części ostrza, tuż na styku powierzchni natarcia i skały. Idąc w głąb narzędzia, naprężenia te przechodzą z rozciągających w ściskające i to o znacznych wartościach. Podobnie przy narożach skrawającego narzędzia widoczne są strefy ściskania. Zjawisko takiego lokalnego spiętrzenia naprężeń jest bardzo niekorzystne z punktu widzenia trwałości narzędzia, gdyż sprzyja zwiększonemu tępieniu się naroży ostrza. Występowanie w ostrzu obszarów rozciągania, może sprzyjać pękaniu ostrza, którego materiał zawsze cechuje określona kruchość.



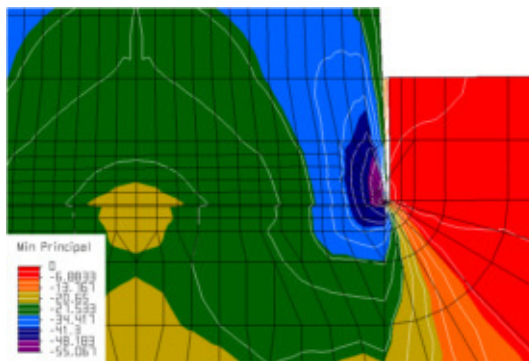
Rys. 5.6. Efekt silnego rozciągania materiału skalnego w strefie naroża ostrza.

Jak poprzednio, rozkład naprężeń minimalnych $\sigma_{\min}$, również przyjmuje symetryczny rozkład w stosunku do symetralnej ostrza (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Rozkład naprężeń minimalnych $\sigma_{\min}$ dla ostrza o płasko ukształtowanej powierzchni natarcia.

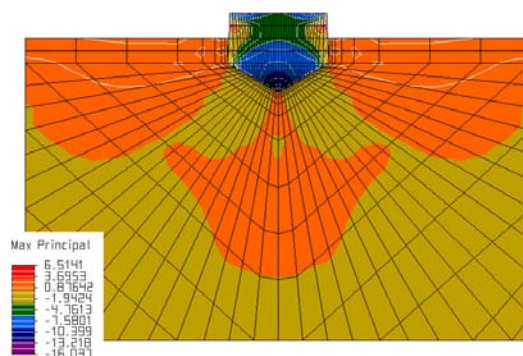
W tym przypadku, tak dla skały jak i ostrza, największa koncentracja naprężeń występuje w okolicach naroży ostrza. Naprężenia minimalne przyjmują tutaj ujemne wartości.



Rys. 5.8. Efekt koncentracji naprężeń $\sigma_{\min}$ w narożach ostrza o płasko ukształtowanej powierzchni natarcia.

Obszar koncentracji naprężeń, dobrze ilustruje rys. 5.8. Jak widać z powyższego rysunku strefa koncentracji naprężeń ma niewielkie rozmiary (w stosunku do wymiarów całego narzędzia) a wartość naprężeń jest stosunkowo duża. Efekt ten bardzo niekorzystnie będzie wpływał na trwałość narzędzia skrawającego sprzyjając intensywnemu tępieniu się jego naroży.

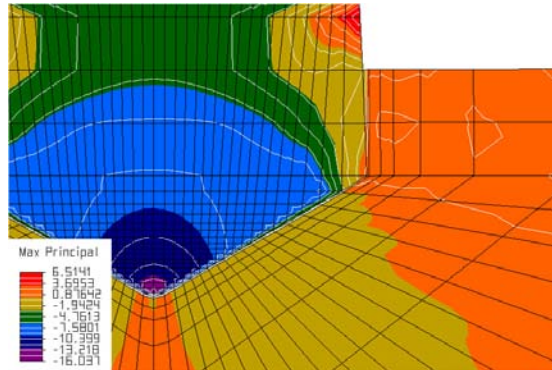
W przypadku ostrza o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia, jak poprzednio, symetria osiowa modelu powoduje, że rozkład naprężeń jest również symetryczny względem osi ostrza (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Rozkład naprężeń maksymalnych $\sigma_{\max}$ wywołanych ostrzem o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia.

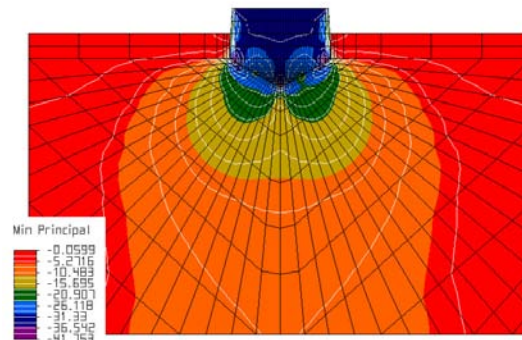
Z pokazanej na rys. 5.9 mapy naprężeń maksymalnych $\sigma_{\max}$ widać, że naprężenia te w skale „podzielone są” na cztery charakterystyczne strefy. W okolicach bocznych powierzchni ostrza jak i przed wierzchołkiem klina, koncentrują się naprężenia o dodatnich wartościach. Przy czym największe wartości występują w obszarach przylegających do bocznych powierzchni ostrza. Z kolei wzdłuż symetrycznych boków klina koncentrują się naprężenia $\sigma_{\max}$ o ujemnych wartościach. Obszary ich występowania, oddzielone są obszarami naprężeń rozciągających. W porównaniu do analogicznego rozkładu, charakterystycznego dla ostrza o płaskiej powierzchni natarcia (rys. 5.5) jest on diametralnie różny i to zarówno pod względem wartości naprężeń jak i ich charakteru.

Analizując rozkład naprężeń w skrawającym narzędziu widać, że powstałe tutaj naprężenia maksymalne, mają głównie ujemne wartości (zwłaszcza w części klinowej ostrza), a ich wartość bezwzględna jest większa od wartości naprężeń rozciągających wygenerowanych w skale. Dokładniej to widać na rys. 5.10. W samym wierzchołku klina występuje największa koncentracja naprężeń ściskających.



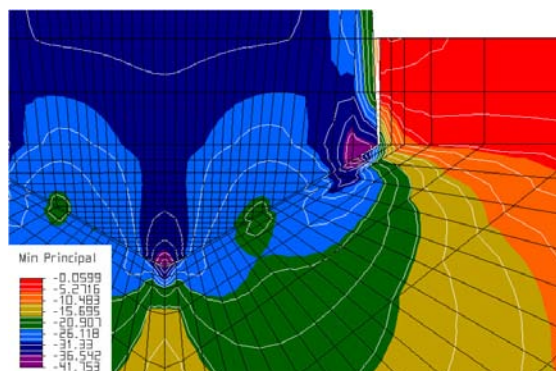
Rys. 5.10. Rozkład naprężeń maksymalnych σ_{max} wywołanych ostrzem o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia (powiększenie).

W stosunku do ostrza o płaskiej powierzchni natarcia (rys. 5.5 i 5.6) występuje więc tutaj odmienne zjawisko. Strefa ujemnych naprężeń maksymalnych w narzędziu o płaskiej powierzchni natarcia była umiejscowiona w głębi ostrza oraz w narożach. Na większej części kontaktu powierzchni natarcia ze skałą, naprężenia były dodatnie.



Rys. 5.11. Rozkład naprężeń minimalnych σ_{min} wywołanych ostrzem o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia.

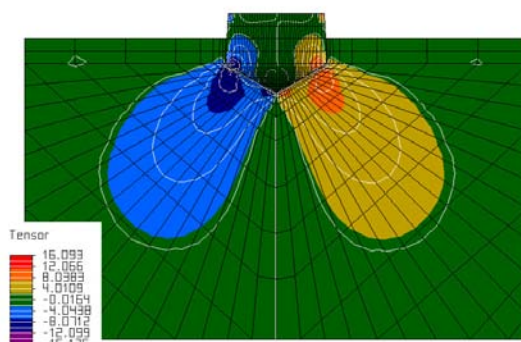
Naprężenia minimalne σ_{min} w skale, przyjmują głównie wartości ujemne. Podobnie jak i poprzednio, rozkłady są symetryczne względem symetralnej ostrza (rys. 5.11). Łatwo tu zauważyć, że strefa naprężeń o największej wartości bezwzględnej znajduje się wzdłuż bocznych krawędzi klina. Lokalne koncentracje naprężeń występują w sąsiedztwie naroży (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Rozkład naprężeń minimalnych σ_{min} wywołanych ostrzem o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia z wyraźnymi strefami koncentracji naprężeń (powiększenie).

Występują tu trzy newralgiczne obszary o większych wartościach naprężeń. W obszarach tych ostrze będzie bardziej podatne na szybsze zużywanie się.

Nieco w zbliżony sposób przebiega rozkład naprężeń σ_{yx} (w płaszczyźnie YX, jak na rys. 5.13). Obszary koncentracji tych naprężeń mają wyraźnie symetryczny rozkład względem osi symetrii modelu.

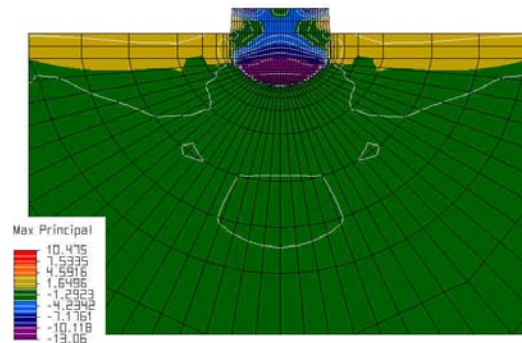


Rys. 5.13. Rozkład naprężeń σ_{yx} w płaszczyźnie równoległej do kierunku skrawania.

Zauważa się tu strefy koncentracji naprężeń w pobliżu naroży ostrza. Generalnie jednak zwiększone naprężenia koncentrują się w obszarach przyległych do tworzących klina.

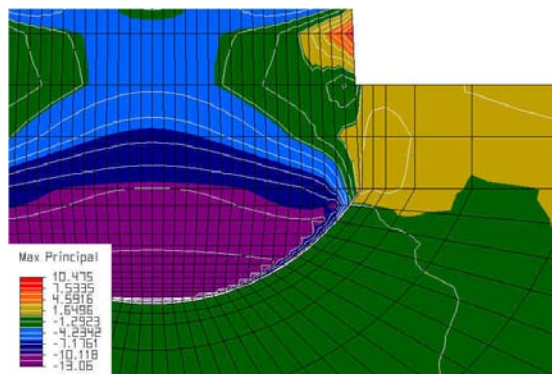
Ostatnim poddanym analizie numerycznej nożem, był nóż płaski, o owalnym zarysie powierzchni natarcia. Podobnie jak poprzednio, symetria osiowa narzędzia zapewniła symetrię otrzymanych rozkładów naprężeń maksymalnych i minimalnych. Rozkład naprężeń maksymalnych σ_{max} (rys. 5.14) jest nieco zbliżony do rozkładu naprężeń maksymalnych takich jak dla przypadku

noża o płaskiej powierzchni natarcia (rys. 5.5), lecz jest on całkowicie odmienny od rozkładu naprężeń maksymalnych dla przypadku noża o klinowej powierzchni natarcia (rys. 5.10). Naprężenia panujące w całej objętości skrawanej próbki są ujemne (ściskające), jedynie w wierzchniej warstwie próbki obserwuje się naprężenia dodatnie (rozciągające) rozchodzące się prostopadle do bocznych krawędzi narzędzia.



Rys. 5.14. Rozkład naprężeń maksymalnych σ_{max} dla noża o owalnej powierzchni natarcia.

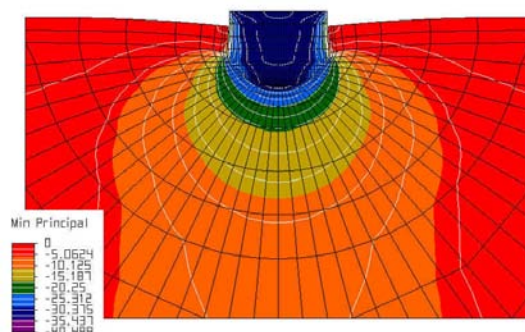
Również i dla tego przypadku obserwuje się, że największe naprężenia σ_{max} występują w skrawającym narzędziu. Naprężenia te są ujemne, a ich wartość bezwzględna zdecydowanie przewyższa wartości pozostałych obserwowanych naprężeń. Tak duża wartość naprężeń, w tak dużym obszarze, nie była obserwowana w żadnym z rozpatrywanych przypadków. Praktycznie cały czynny przekrój noża jest ściskany. Odmiennie również do pozostałych przypadków, nie obserwuje się tutaj lokalnych koncentracji naprężeń (rys. 5.15), jak to miało miejsce w przypadku noży o płaskiej i klinowej powierzchni natarcia.



Rys. 5.15. Rozkład naprężeń maksymalnych σ_{max} dla noża o owalnej powierzchni natarcia (powiększenie).

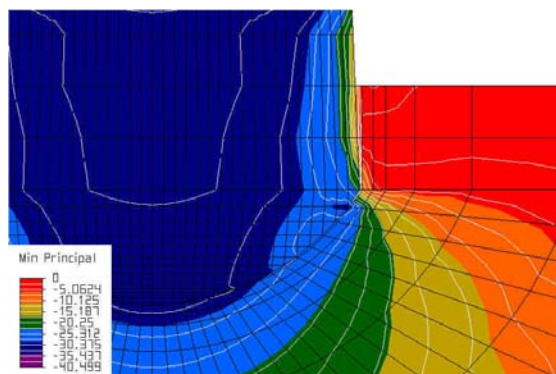
Brak obszarów wyraźnej koncentracji naprężeń wskazuje na to, że narzędzie takie będzie bardziej odporne na zużycie, a więc dłużej będzie można je wykorzystywać bez konieczności jego wymiany.

Rozkład naprężeń minimalnych $\sigma_{\min}$ przedstawia rys. 5.16 (na odkształconej siatce modelu).



Rys. 5.16. Rozkład naprężeń minimalnych $\sigma_{\min}$ dla noża o owalnej powierzchni natarcia.

Zasadnicze różnice, jakie można zauważyć dla tego rozkładu w porównaniu do rozkładów z rys. 5.7 i rys. 5.11 są następujące: występuje tu tylko jedna strefa naprężeń o największych wartościach bezwzględnych w najbliższym sąsiedztwie skrawającego narzędzia. Na poprzednich rozkładach widoczne są dwie takie strefy, prostopadłe do odpowiednich krawędzi (rys. 5.7, 5.8, 5.11, 5.12). W ostrzu o owalnej powierzchni natarcia nie występują lokalne koncentracje naprężeń, tak jak ma to miejsce w pozostałych przypadkach ostrzy.

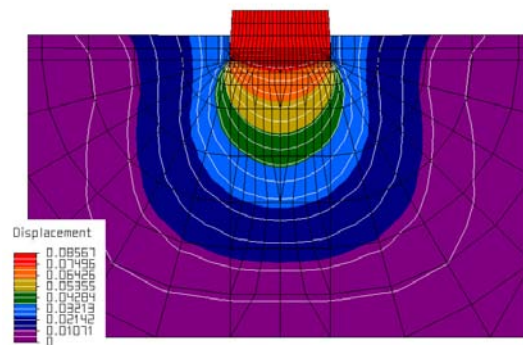


Rys. 5.17. Rozkład naprężeń minimalnych $\sigma_{\min}$ dla noża o owalnej powierzchni natarcia (powiększenie).

Prawie regułą jest, że największe naprężenia obserwowane są w skrawającym narzędziu. Także i tutaj naprężenia panujące w narzędziu są generalnie większe od naprężeń panujących w skrawanej próbce. Rozkład ich jest równomierny niemalże w całej objętości narzędzia z widocznymi lokalnymi spadkami ich wartości na powierzchniach bocznych narzędzia. Jest to odmienna sytuacja od poprzednich przypadków, gdzie obserwowane były wzrosty wartości naprężeń na krawędziach zewnętrznych narzędzia.

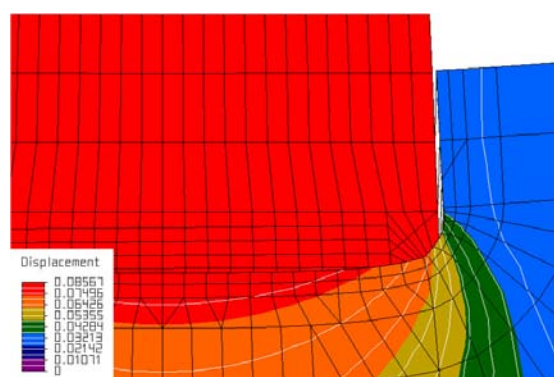
5.3. Rozkład przemieszczeń materiału w strefie skrawania

Kolejnym aspektem badań numerycznych był rozkład przemieszczeń, jakie obserwuje się w skrawanej skale w sąsiedztwie ostrza (rys. 5.18).



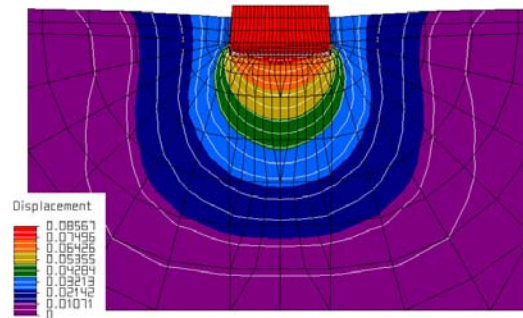
Rys. 5.18. Przemieszczenia wypadkowe w strefie oddziaływania ostrza o płaskiej powierzchni natarcia.

W bezpośrednim sąsiedztwie narzędzia o płaskiej powierzchni natarcia, pola przemieszczeń wypadkowych, przyjmują owalne zarysy, których początki mają miejsce w narożach ostrza (rys. 5.18).



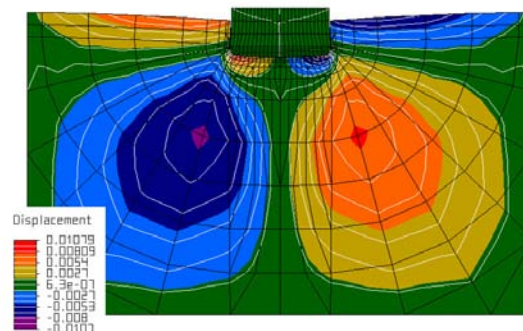
Rys. 5.19. Efekt powstawania stref przemieszczeń maksymalnych przy narożach ostrzy dla noży o płaskiej powierzchni natarcia.

Tylko niewielka strefa materiału skały, która ma bezpośredni styk z narzędziem, ma identyczną z narzędziem wartość przemieszczeń (rys. 5.19). Pozostałe strefy charakteryzują się już znacznie niższymi wartościami przemieszczeń, aż do ich zaniku w strefie zewnętrznej. Podobne do powyższych rozkładów, zaobserwowane zostały rozkłady przemieszczeń w kierunku osi OY (rys. 5.20). Zjawiskiem, jakie różni ten rozkład od poprzednich jest występowanie wyraźnego efektu zaciskania materiału skalnego na krawędziach bocznych noża. Efekt ten nie jest nazbyt duży, jednakże w przypadku skrawania twardych skał sprężystych, o dużej zwięzłości i małym kącie rozkruszania bocznego ψ może to wywołać dodatkowy, zbędny efekt wzrostu obciążenia narzędzia, wynikający z tarcia bocznych powierzchni ostrza o skałę. W przypadku skał miękkich o dużej porowatości i dużym kącie bocznego rozkruszania, efekt ten może nie wpływać w sposób istotny na wzrost obciążenia skrawającego narzędzia.



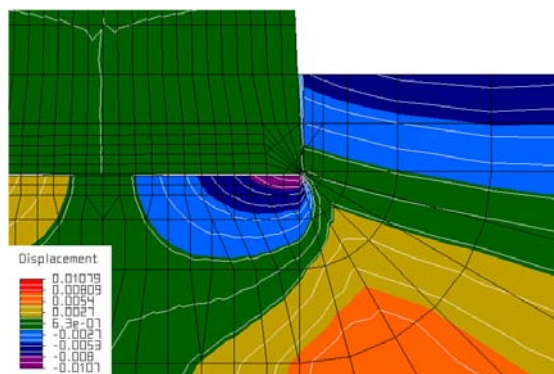
Rys. 5.20. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi OY . Efekt zaciskania materiału skalnego na bocznych powierzchniach ostrza.

Zupełnie odmienne od poprzednich, są otrzymane rozkłady przemieszczeń wzdłuż osi OX (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi OX .

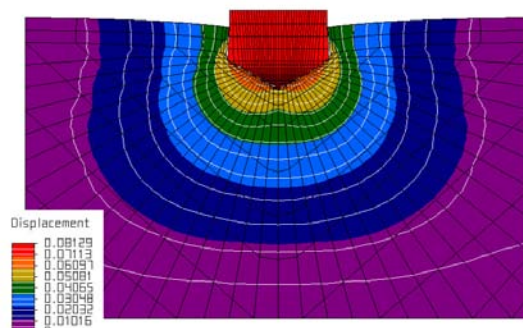
Występujące tu strefy przemieszczeń są bardzo zróżnicowane. Dwie największe strefy przemieszczeń jak widać z rys. 5.21, są ściśle związane z narożami ostrza, rozchodzą się wzdłuż przekątnych ostrza wędrując w głąb materiału skalnego. Interesujące jest to, że występują w tych strefach swoistego rodzaju lokalne koncentracje przemieszczeń, szczególnie należy podkreślić tu fakt, że znajdują się one w znacznym oddaleniu nie tylko od naroży ostrza, ale również od samego ostrza. W obydwu strefach wyraźnie widać, że w poszczególnych warstwach, ich środki geometryczne układają się na prostych pod pewnymi kątami. Można to odnieść do teorii strefy sprasowania (rys. 2.12), gdzie odspojenie materiału następuje wzdłuż charakterystycznych dla danej skały, prostych. W okolicy naroża występują niewielkie strefy przemieszczeń przeciwnie skierowanych do osi OX (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Zjawisko koncentracji przemieszczeń w pobliżu naroża ostrza.

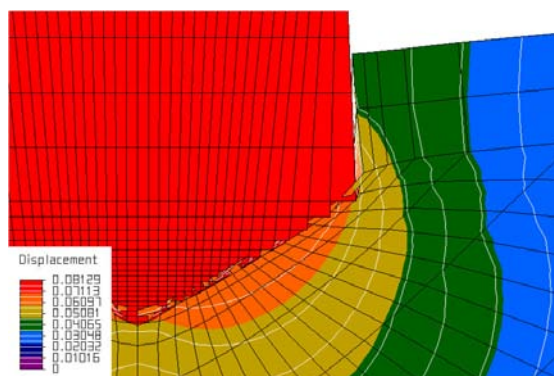
Strefy takich przemieszczeń układają się również równolegle do swobodnej powierzchni skrawanej skały a prostopadle do ścian bocznych narzędzia (rys. 5.21, 5.22). Widoczna jest tendencja do zaciskania wolnej przestrzeni pomiędzy boczną powierzchnią ostrza a skałą. Skała „płyynie” w kierunku bocznej powierzchni ostrza. Obserwuje się tu występowanie blisko obok siebie, stref o odmiennych charakterach. Narzędzie pozostaje nie odkształcone, natomiast skrawana skała jest równocześnie na przemian ściskana i rozciągana.

W przypadku ostrza o klinowej powierzchni natarcia rozkład przemieszczeń wypadkowych ilustruje rys. 5.23. Zasięg poszczególnych stref jest bardzo zróżnicowany i można zauważyć, że największe przemieszczenia w skale skupiają się głównie na kierunkach prostopadłych do elementarnych powierzchni klina.



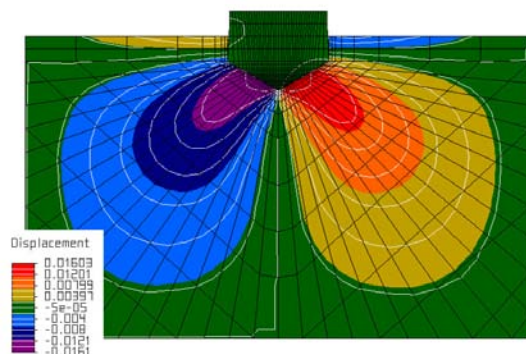
Rys. 5.23. Rozkład przemieszczeń wypadkowych w strefie oddziaływania ostrza klinowego.

Maksymalny zasięg strefy największych przemieszczeń znajduje się w połowie długości krawędzi bocznej tworzącej klin. Jednakże rzeczą najbardziej spektakularną jest fakt silnego zaciskania materiału skalnego w strefie bocznych powierzchni ostrza, co wyraźnie obrazują rys. 5.24 i 5.25. Silne ugięcie materiału zachodzi nie tylko w strefie przejścia powierzchni natarcia w powierzchnię przyłożenia, (co zaobserwowano np. w badaniach [21]), lecz także w strefie przejścia powierzchni natarcia, w boczną powierzchnię przyłożenia (pomocniczą powierzchnię przyłożenia).



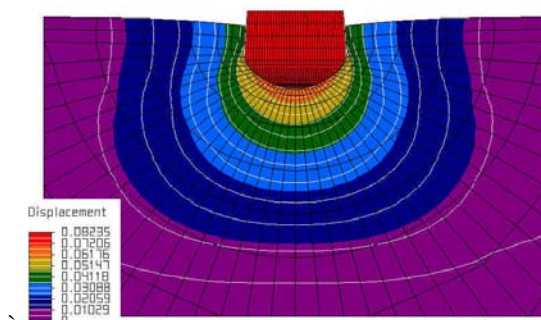
Rys. 5.24. Efekt silnego zaciskania materiału skalnego w strefie bocznych powierzchni ostrza.

Interesujące rozkłady przemieszczeń można zaobserwować w przypadku przemieszczeń rozpatrywanych w kierunku osi OX, co przedstawia rys. 5.25.



Rys. 5.25. Przeszyczenia w kierunku osi OX.

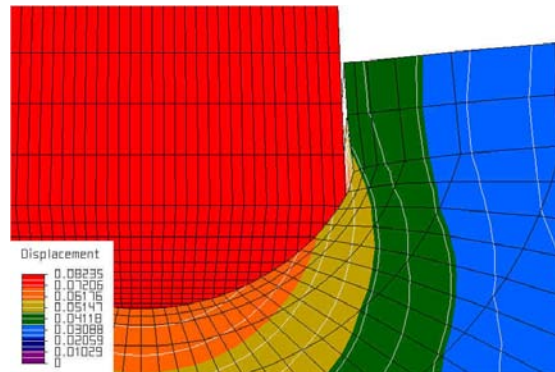
Narzędzie wywołuje bardzo złożony stan deformacji w skrawanej skale. Oprócz stref przemieszczeń pochodzących od krawędzi bocznych klina, obserwuje się dodatkowe strefy przemieszczeń na powierzchni skały. Ich występowanie i charakter wskazują, że wierzchnie warstwy skrawanej skały są jakby ciągnięte za skrawającym narzędziem.



Rys. 5.26. Przeszyczenia wypadkowe w badanej próbce dla noża o owalnym zarysie powierzchni natarcia.

W przypadku ostrza o owalnej powierzchni natarcia, w tym przypadku rozkład przemieszczeń wypadkowych skały w strefie skrawania odzwierciedla w pewnym stopniu zarys powierzchni natarcia (rys. 5.26).

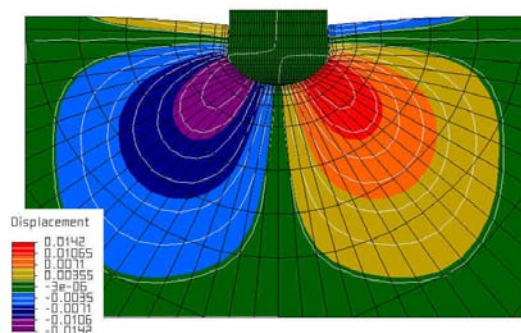
Po pełnej analizie rozkładu przemieszczeń materiału, pod wpływem działania ostrza o owalnym zarysie powierzchni natarcia, zauważa się duże przemieszczenia materiału w obrębie ostrza (rys. 5.27).



Rys. 5.27. Rozkład przemieszczeń materiału w okolicach ostrza o owalnym zarysie powierzchni natarcia.

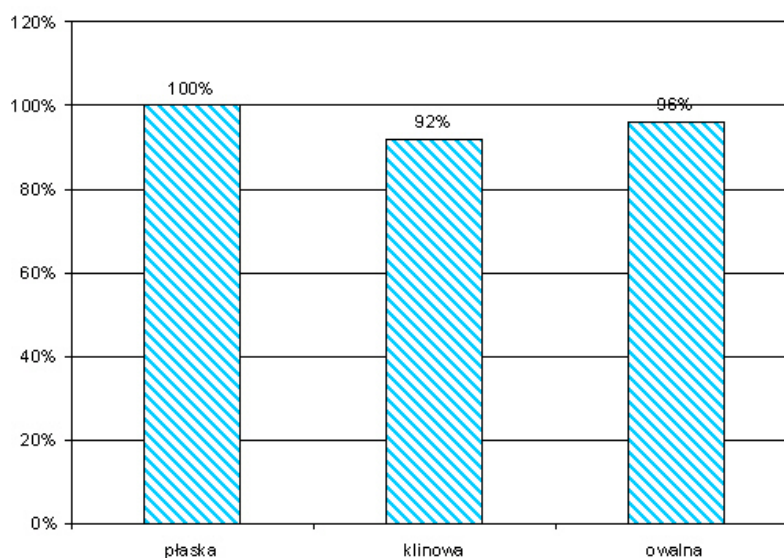
Wartości przemieszczeń maksymalnych w narzędziu są znacznie większe od przemieszczeń, jakie obserwuje się w skrawanej próbce skalnej. Jedyne strefa, która bezpośrednio sąsiaduje ze skrawającym narzędziem ma zbliżone wartości do tych, jakie w nim występują (rys. 5.26). Podobnie jak w poprzednich przykładach, występuje silne zaciskanie materiału skalnego wokół bocznych powierzchni narzędzia (rys. 5.27, rys. 5.28).

Skala tego zjawiska nie jest obserwowana dla pozostałych przypadków noży w takim stopniu jak tutaj. Można przypuszczać, że nie pozostaje to bez wpływu na wartość obciążenia skrawającego narzędzia. Jak wynika z analizy, dużą zaletą stosowania tego typu noży, może być brak lokalnych koncentracji naprężeń w skrawającym narzędziu, co oznacza większą jego trwałość i dłuższy okres eksploatacji bez konieczności wymiany.



Rys. 5.28. Efekt zaciskania materiału skalnego na bocznych powierzchniach narzędzia o owalnym zarysie powierzchni natarcia (Przemieszczenia wzdłuż osi OX).

W zestawieniu (rys. 5.29) przedstawione zostały maksymalne wartości przemieszczeń dla poszczególnych ostrzy uzyskane pod działaniem siły wymuszającej ruch, o jednakowej w każdym przypadku wartości. Przemieszczenia ostrza o płaskiej powierzchni natarcia przyjęto jako bazowe (100%). Do tych przemieszczeń odniesiono przemieszczenia maksymalne, charakterystyczne dla pozostałych ostrzy.



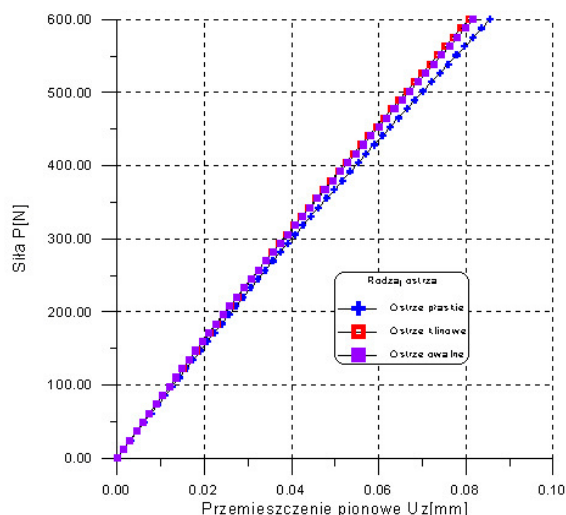
Rys. 5.29. Przemieszczenia maksymalne poszczególnych ostrzy, w odniesieniu do ostrza z płaską powierzchnią natarcia.

W przypadku przemieszczeń, największe wartości były zatem dla narzędzia o płaskiej powierzchni natarcia, natomiast najmniejsze dla klinowej powierzchni natarcia. Największe różnice obserwuje się dla ostrza z płaską oraz klinową powierzchnią natarcia. W badanym zakresie obciążenia ostrzy, różnice te były rzędu 8%.

5.4. Wpływ kształtu powierzchni natarcia ostrza, na kształtowanie się siły skrawania

W kolejnym etapie analizy MES, wyznaczono wartości sił występujących na rozpatrywanych ostrzach, dla tej samej wartości przemieszczenia danego ostrza wzdłuż osi OY (podczas penetracji ostrza w skałę). Siły te są odpowiednikiem sił skrawania charakterystycznych dla poszczególnych ostrzy, w trakcie ich

przemieszczania się zgodnie z wektorem prędkości skrawania (jak na rys. 5.1). Uzyskane wyniki ilustruje rys. 5.30.



Rys. 5.30. Zależność siły penetracji ostrza o określonym kształcie powierzchni natarcia, zależnie od wartości przemieszczenia ostrza w skale.

Jak wynika z rysunku 5.30, dla założonej penetracji ostrza rzędu 0,08mm, siła skrawania ostrzem o płaskiej powierzchni natarcia jest najmniejsza spośród analizowanych przypadków. Jest ona mniejsza o około 6% od siły charakterystycznej dla ostrza o klinowej powierzchni natarcia. W badanym zakresie penetracji, siła skrawania ostrzem o owalnej powierzchni natarcia, jest minimalnie mniejsza niż ostrza o klinowej powierzchni natarcia. Jak można zauważyć, razem z penetracją ostrza rośnie różnica w siłach skrawania charakterystycznych dla poszczególnych ostrzy. Z wykresu wynika ponadto, że dla tych wartości przemieszczeń, proces przebiega w zakresie sprężystym, o czym świadczy niemal liniowy charakter krzywych opisujących przebieg zależności siła – przemieszczenia ostrza. Z uwagi na ograniczenia systemu MES-ALGOR, nie było możliwe przeprowadzenie dalszej analizy, zwłaszcza dla przemieszczeń w rozwiniętej fazie uplastycznienia materiału skalnego. Mając na uwadze, że w rzeczywistym cyklu skrawania, zależnie od rodzaju skały, do momentu odspojenia większego elementu wióra, ostrze przebywa drogę rzędu 2-3mm, na podstawie charakteru krzywych oraz rozpatrywanego w analizie zakresu przemieszczeń można przypuszczać, że różnice w wartościach omawianych sił, w zakresie uplastycznienia, mogą być znacznie większe.

5.5. Podsumowanie i wnioski z analizy MES

Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki badań numerycznych można zauważyć, że zarówno wartości naprężeń jak i wartości deformacji są zróżnicowane, zależnie od geometrii ostrza narzędzia. Miejsca koncentracji naprężeń występują głównie w okolicach ostrych naroży ostrzy, a występujące wartości są największe w przypadku ostrza o płaskiej powierzchni natarcia. Dla ostrza o owalnej powierzchni natarcia, rozkład naprężeń ma z kolei bardziej jednorodny charakter.

Na podstawie wyników analizy MES można jednoznacznie stwierdzić, że siła skrawania ostrzem o płaskiej powierzchni natarcia jest najmniejsza podczas gdy dla ostrza klinowego jest ona największa. Siła skrawania ostrzem o owalnej powierzchni natarcia jest minimalnie mniejsza niż ostrzem klinowym.

Analiza wykazała jednoznacznie, że dla innych parametrów ustalonych, wpływ przestrzennego ukształtowania powierzchni natarcia, jest bardzo istotny dla jego obciążenia. Wyniki analizy potwierdzają przy tym teoretyczne rozważania Evansa [15] tj., że wprowadzenie dodatkowych krawędzi na ostrzu klinowym, sprzyja bezproduktywnemu rozpraszaniu energii oraz przyczynia się do wzrostu obciążenia ostrza (w tym zwłaszcza wzrostu siły skrawania).

Obserwowane zjawisko można tłumaczyć głównie zaciskaniem materiału w strefie oddziaływania powierzchni bocznych ostrza, które jest największe w przypadku ostrza klinowego (co ilustruje rozkład przemieszczeń w kierunku osi OX modelu, jak na rys. 5.21, rys. 5.25, rys. 5.28).

Podsumowując wyniki analizy MES można zatem stwierdzić, że przestrzenne formy powierzchni natarcia ostrza, przyczyniają się do wzrostu siły skrawania.

6. Badania laboratoryjne wpływu kształtu powierzchni natarcia ostrza na obciążenie noża skrawającego naturalny materiał kruchy

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki badań numerycznych, nad kształtowaniem się obciążenia ostrza, zależnie od jego formy geometrycznej. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, których zadaniem była weryfikacja zależności uzyskanych na drodze analiz numerycznych.

Ponieważ istniały przypuszczenia, że trajektoria skrawania może mieć znaczenie dla kształtowania się siły skrawania, badania laboratoryjne zostały wykonane na dwóch stanowiskach, tj.:

- o prostoliniowej trajektorii skrawania (stanowisko na bazie strugarki poprzecznej, usytuowane w byłej Katedrze Maszyn Górniczych i Wiertniczych Politechniki Lubelskiej). Interpretacja wyników badań

uzyskiwanych na takim stanowisku jest znacznie ułatwiona z uwagi na stałą głębokość skrawania, podczas każdego pomiaru.

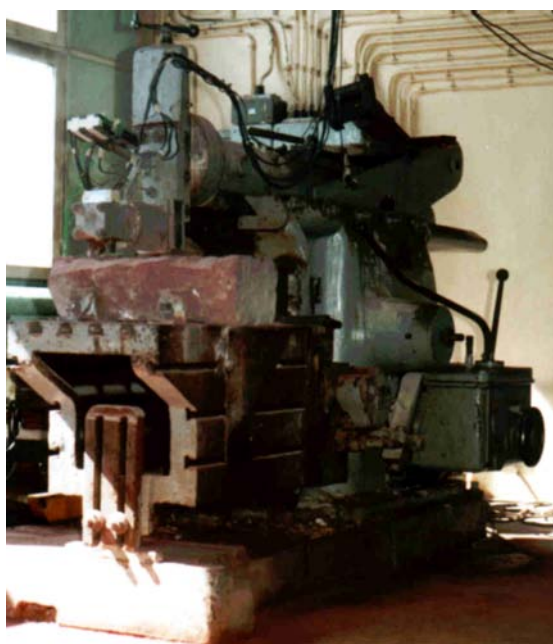
- o trajektorii łukowej, bardzo zbliżonej do trajektorii noży na kombajnach ścianowych (specjalistyczne stanowisko Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH).

Obydwa stanowiska posiadały możliwość pomiaru trzech składowych siły obciążającej ostrze skrawającego narzędzia, jednak w badaniach szczególną uwagę zwracano na kształtowanie się siły skrawania (jako najbardziej kontrowersyjnego zagadnienia w świetle literatury).

6.1 Stanowisko o prostoliniowej trajektorii skrawania

Stanowiskowe badania porównawcze wykonane zostały między innymi w Laboratorium Skrawania Skał, byłej Katedry Maszyn Górniczych i Wiertniczych Politechniki Lubelskiej.

Stanowisko zbudowane było z kilku modułów. Pierwszy moduł stanowiła strugarka poprzeczna SP-800, o mocy 7kW (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Strugarka poprzeczna SP-800.

Na stole strugarki mocowane były skrawane próbki a na jej wrzecionie, siłomierz tensometryczny wraz z badanymi nożami. Drugi moduł stanowiło komputerowe

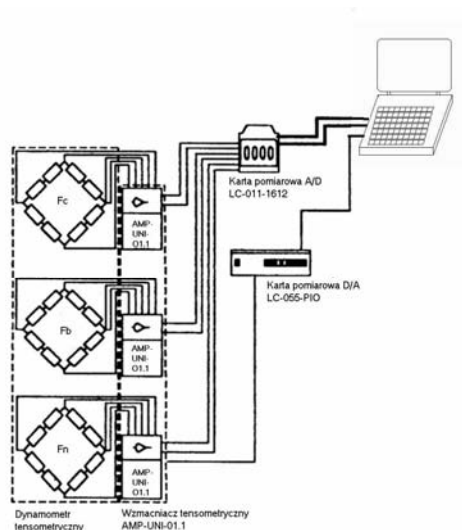
stanowisko pomiarowe składające się z jednostki komputerowej z zainstalowaną kartą D/A typu LC-055-PIO. Za pomocą tej karty realizowane było sterowanie wzmacniaczem mostka tensometrycznego typu AMP-UNI.01. Wzmacniacz realizował dwa zadania: rejestrował i wzmacniał sygnały analogowe pochodzące z mostków tensometrycznych, a następnie przesyłał dane do karty pomiarowej A/D typu LC-011-1612. Karta ta (12 bitowy przetwornik analogowo – cyfrowy) konwertowała wzmocnione analogowe sygnały elektryczne ze wzmacniacza, na sygnały cyfrowe, które podlegały dalszej obróbce w komputerze. Widok całego stanowiska komputerowego przedstawia rys. 6.2.



Rys. 6.2. Komputerowe stanowisko pomiarowe ze wzmacniaczem i przetwornikiem A/D firmy Ambex.

Pomiar trzech składowych siły obciążającej noże realizowany był przez zastosowanie specjalnego siłomierza tensometrycznego zaprojektowanego i wykonanego w Politechnice Lubelskiej. Pomiary sił były realizowane w układzie pełnego mostka tensometrycznego. Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 6.3.

Siłomierz tensometryczny i aparatura kontrolno –pomiarowa skalowane były za pomocą siłomierza optycznego typu KMPo, o zakresie pomiarowym od 0 – 20 kN.



Rys. 6.3. Schemat układu pomiarowego dla stanowiska pomiarowego o prostoliniowej trajektorii skrawania.

6.2. Stanowisko badawcze o łukowej trajektorii skrawania

Badania dotyczące skrawania po trajektorii łukowej, przeprowadzone zostały w Laboratorium Skrawania Skał Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych Akademii Górniczo – Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Stanowisko do badania oporów skrawania narzędziami skrawającymi składało się z dwóch zasadniczych modułów: modułu roboczego (rys. 6.4), na którym zamocowany był organ roboczy z uchwytem do mocowania narzędzi skrawających, jak również z układami do sterowania podziałką skrawania oraz głębokością skrawania. Drugi moduł (rys. 6.5), to układ zasilający silnik hydrauliczny wahadłowy napędzający organ roboczy właściwego stanowiska. W skład układu zasilającego wchodziły: silnik elektryczny 3-fazowy o mocy 30kW, pompa zębata napędzana silnikiem elektrycznym, podająca medium robocze (olej Hydrol 20). Pompa zapewniała ciśnienie 16MPa, przy natężeniu przepływu do 100 dm³/min. Sterowanie modułem zasilającym realizowane było przez trójpołożeniowy rozdzielacz elektrohydrauliczny.



Rys. 6.4. Moduł roboczy stanowiska badawczego.



Rys. 6.5. Moduł zasilający silnik hydrauliczny stanowiska badawczego.

Zasadnicze stanowisko badawcze stanowiła konstrukcja metalowa, która składała się z ramy, stanowiącej tor jezdny. Po torze jezdny przesuwiał się suport bębna obrotowego oraz uchwyt dla badanej próbki. Do bębna obrotowego zamocowane było ramię z podstawą, do której, w zależności od potrzeb, przykręcano odpowiedni uchwyt do mocowania narzędzia skrawającego. W celu zapewnienia zmiany podziałki skrawania stanowisko wyposażono w mechanizm śrubowy, który porusza podstawę ramienia zamocowanego na bębnie obrotowym. Do zmiany nastaw głębokości skrawania służył odrębny mechanizm śrubowy, który

powodował przesuw całego bębna obrotowego na żadaną odległość od próbki (rys. 6.6).



Rys. 6.6. Mechanizmy do zmiany podziałki i głębokości skrawania.

Na drodze pomiarów tensometrycznych możliwy był pomiar sił składowych (F_c , F_n i F_b) siły obciążającej skrawające narzędzie. W tym celu wykorzystywany był siłomierz tensometryczny o specjalnej konstrukcji umożliwiający pomiar sił w trzech prostopadłych do siebie kierunkach (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Siłomierz tensometryczny używany do badań.

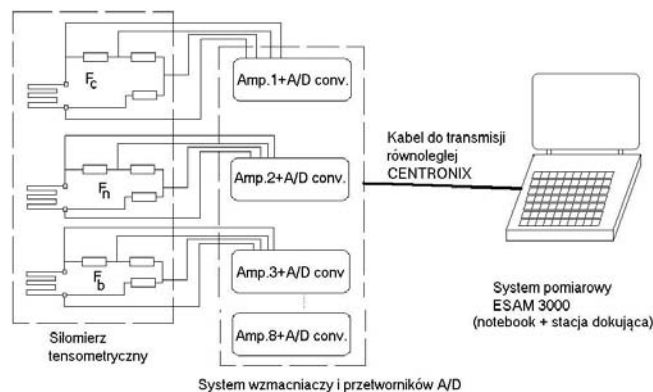
Siłomierz tensometryczny współpracował z komputerowym stanowiskiem pomiarowym (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Komputerowe stanowisko pomiarowe.

Komputerowe stanowisko pomiarowe stanowił system ESAM-3000 firmy MGM Vishay. W skład systemu, oprócz programu komputerowego wchodził panel pomiarowy. Umożliwiał on jednoczesny pomiar ośmiu różnych sygnałów. Każdy kanał zawierał przetworniki pomiarowe analogowo – cyfrowe, które umożliwiały współpracę komputera z tensometrycznymi czujnikami sił składowych i ciśnień roboczych na zasilaniu i spływie silnika hydraulicznego. Całość została wykonana jako stacja dokująca dla jednostki komputerowej w postaci notebooka z zainstalowanym programem pomiarowym.

Pomiar sił dokonywany był przy zastosowaniu tensometrii oporowej. Do pomiaru został wykorzystany układ pomiarowy w postaci ćwierć mostka pomiarowego - jeden tensometr oporowy, pomiarowy, czynny, skompensowany temperaturowo i trzy precyzyjne rezystory (0,5%) o rezystancji równej rezystancji użytego tensometru. Schemat zastosowanego układu pomiarowego przedstawia rys. 6.9.



Rys. 6.9. Schemat zastosowanego układu pomiarowego.

Jako próbki, do skrawania użyta została skała cementowo – piaskowa o parametrach wytrzymałościowych porównywalnych z naturalnym wapieniem. Próbka o znacznych wymiarach gabarytowych, mocowana była na stanowisku w taki sposób, aby uzyskać warunki zbliżone do naturalnego zalegania skał. Stanowisko pomiarowe umożliwiało również zbieranie wiórów pochodzących z procesu skrawania. Dynamometr skalowany był zewnętrznym dynamometrem wzorcowym.

6.3 Badania zasadnicze

Przeprowadzone badania laboratoryjne, miały charakter porównawczy. Dla każdego pomiaru starano się określić wartości średnie sił skrawania, charakterystyczne dla każdego noża o określonej formie geometrycznej powierzchni natarcia. Dla danej serii pomiarowej wyznaczano średnią wartość siły skrawania, charakterystyczną dla danego narzędzia, która stanowiła podstawę do prowadzonych ocen i porównań skuteczności oddziaływania danej formy geometrycznej ostrza.

6.3.1. Przebieg badań prowadzonych na stanowisku o prostoliniowej trajektorii skrawania

Użyte do badań bloki skalne o wymiarach 0,6 x 0,45 x 0,3m, mocowane były za pomocą specjalnych uchwytów na stole strugarki. Przed zasadniczymi badaniami powierzchnia próbek była planowana nożem wyrównawczym, mocowanym do siłomierza. Głębokość skrawania nożem wyrównawczym była zawsze większa od maksymalnej głębokości skrawania w danej serii pomiarów. Planowanie powierzchni próbki na całej jej szerokości czynnej odbywało się przed

każdą nową serią pomiarową. Na tak przygotowanej powierzchni próbki, określone były miejsca kolejnych przejść noży w danej serii pomiarowej. Ilość przejść była tak dobrana, aby każdy skraw był skrawem otwierającym ($t/h \geq 10$). Głębokość skrawania w tej serii badań była równa $h = 12\text{mm}$.

Z uwagi na to, że użyta do badań strugarka była strugarką poprzeczną, po każdym skrawie suwak strugarki wraz z nożem był zatrzymywany. Możliwe to było dzięki wykorzystaniu sprzęgła, w które była wyposażona strugarka. Zatrzymywanie suwaka było konieczne z uwagi na uniknięcie wtórnego rozdrabniania wióra przez powracające narzędzie.

Przed przystąpieniem do badań, próbka była na całej swej szerokości wyrównywana nożem wyrównawczym. Po wyrównaniu powierzchni próbki, a przed przystąpieniem do właściwego pomiaru, wykonywany był skraw próbny. Skraw próbny nie był brany do analizy i nie był archiwizowany. Celem przeprowadzania skrawu próbnego było sprawdzenie poprawności działania aparatury kontrolno – pomiarowej i zmiany ustawień parametrów skrawania. Po wykonaniu skrawu próbnego wykonywane były pomiary o ustalonych parametrach skrawania.

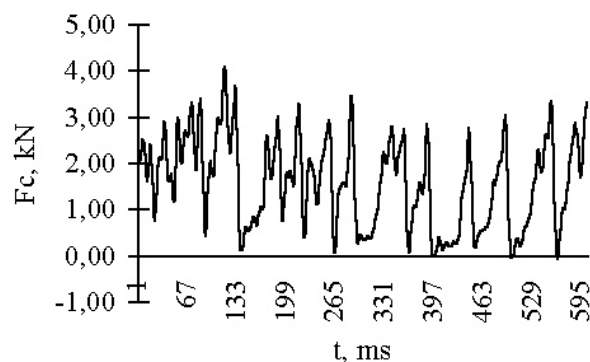
Na rys. 6.10 przedstawiony został obraz typowej bruzdy jaką wykonywał nóż nr 1 (o płaskiej powierzchni natarcia i przyłożenia) w procesie skrawania kruchego wapienia.



Rys. 6.10. Zarys bruzdy powstałej w wyniku skrawania wapienia nożem nr 1 (o płaskiej powierzchni natarcia i przyłożenia).

Przy zastosowanej głębokości skrawania i zastosowanej skale, w okolicach dna bruzdy nie zaobserwowano dużego wpływu kąta bocznego rozkruszania. Dlatego też, dno bruzdy przybierało kształt skrawającego narzędzia.

Typowy przebieg czasowy, charakterystyczny dla skrawania wapienia nożem nr1 (rys. 4.1b, o płaskich pow. natarcia i przyłożenia) przedstawia rys. 6.11.



Rys. 6.11. Typowy przebieg czasowy sił skrawania, charakterystyczny dla skrawania wapienia nożem o płaskiej powierzchni natarcia i przyłożenia (nóż nr 1).

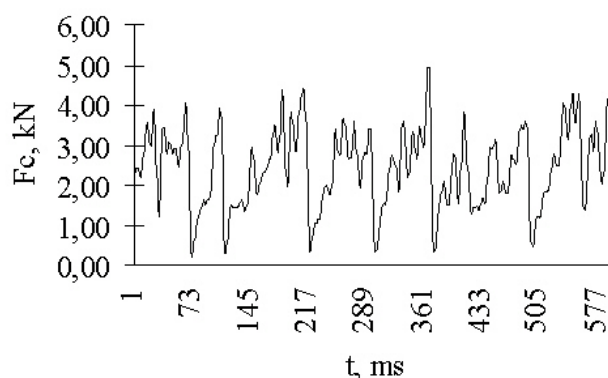
Nóż nr 2 (rys. 4.1a) miał płaską powierzchnię przyłożenia i klinową powierzchnię natarcia (na powierzchni natarcia występowała zatem ostra krawędź). Kształt skrawu był zbliżony do kształtu bruzdy noża nr 1 (rys. 6.12). Na głównej krawędzi skrawającej można zauważyć wyraźne, białe przebarwienia narzędzia. Jest to dowód na to, że część skrawanego materiału silnie zaciska się na bocznych krawędziach narzędzia. Mała strefa bezpośrednio występująca na granicy skrawanego materiału i skrawającego narzędzia jest nie tylko skrawana, ale jest również miażdżona. Powoduje to osadzanie się resztek skrawanego materiału na narzędziu. Pociąga to za sobą wzrost oporów skrawania i powoduje tępienie ostrza.



Rys. 6.12. Zarys bruzdy powstałej w wyniku skrawania nożem nr 2.

O ile dno bruzdy było podobne do tego jakie zostawiał nóż nr 1, o tyle powierzchnie boczne (zwłaszcza wierzchołki bruzd) były postrzępione i powyrywane.

Typowy przebieg czasowy sił skrawania wapienia nożem nr 2, ilustruje rys. 6.13.



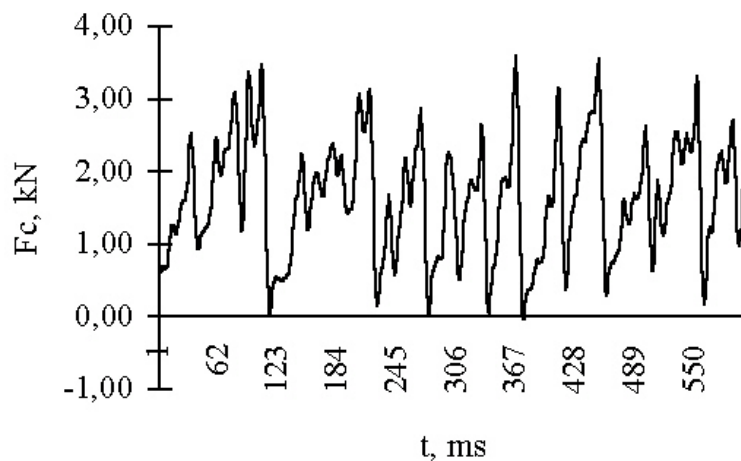
Rys. 6.13. Typowy przebieg czasowy siły skrawania wapienia, nożem nr 2 (o klinowej pow. natarcia i płaskiej pow. przyłożenia).

Zarówno nóż nr 2 jak i 3 miały powierzchnię natarcia ukształtowaną klinowo. W przypadku noża nr 3 (nóż typu Rapid 89) wprowadzono modyfikację powierzchni przyłożenia. Jej kształt jest wyraźnie owalny (rys. 4.2a). Wprowadzenie owalu w konstrukcję powierzchni przyłożenia narzędzia dało odmienne efekty zarówno w zakresie obciążenia noża, jak i uzyskiwanego wióra oraz powstającej bruzdy (rys. 6.14)



Rys. 6.14. Kształt bruzdy powstałej po przejściu noża nr 3.

Przebieg czasowy siły skrawania, charakterystyczny dla tego noża, ilustruje rys. 6.15.



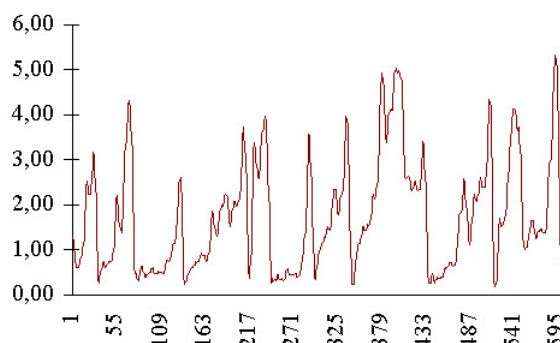
Rys. 6.15. Przebieg czasowy siły skrawania wapienia, nożem nr 3 (o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia oraz owalnej powierzchni przyłożenia, nóż typu Rapid 89).

Kształt bruzdy powstałej po przejściu noża nr 5, o płaskiej powierzchni natarcia i owalnej powierzchni przyłożenia (rys. 6.16) był zbliżony do zarysu bruzdy powstałej przy skrawaniu nożem nr 3 (rys. 6.14).



Fot. 6.16. Kształt bruzdy powstałej po przejściu noża nr 5.

Zarys bruzdy jest regularny, bez wyraźnych, bocznych wykruszeń na obrzeżach owalnej krawędzi skrawającej.



Rys. 6.17. Przebieg czasowy siły skrawania wapienia, charakterystyczny dla noża nr 5 (o płaskiej powierzchni natarcia i owalnej powierzchni przyłożenia).

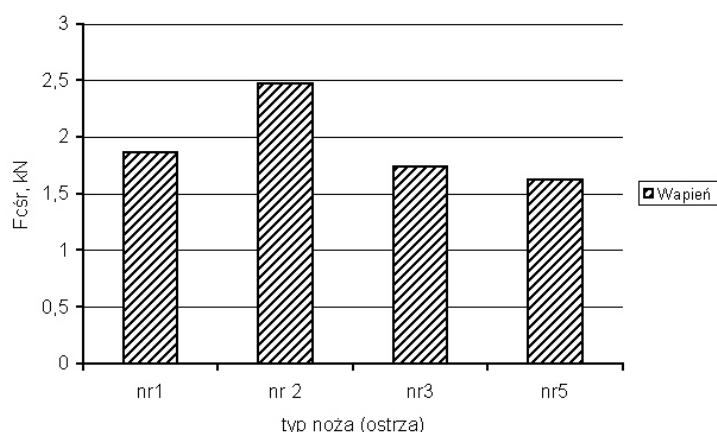
6.3.1.1. Wyniki badań siły skrawania charakterystycznej dla skrawania po trajektorii prostoliniowej

Zestawienie wyników badań siły skrawania charakterystycznej dla określonej formy geometrycznej ostrza, ilustruje tabela 2 (skrawanie wapienia, $h = 12\text{mm}$).

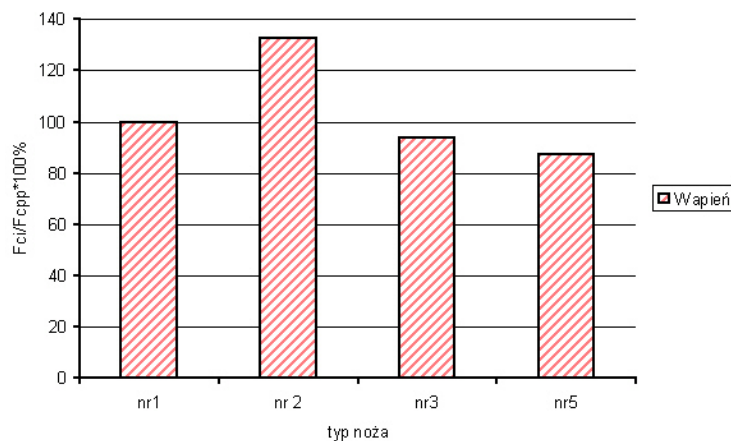
Tab. 2. Zestawienie wyników badań siły skrawania dla badanych noży (wartości średnie).

Nr noża	Nr pomiaru	Siła skrawania F_c , kN
1	1.1	1,86
	1.2	1,71
	1.3	2,17
	1.4	1,88
	1.5	2,18
	1.6	1,60
2	2.1	2,06
	2.2	2,79
	2.3	2,57
	2.4	2,44
	2.5	2,31
	2.6	2,44
3	3.1	1,45
	3.2	1,82
	3.3	1,96
	3.4	1,71
	3.5	1,76
5	4.1	1,60
	4.2	1,58
	4.3	1,64
	4.4	1,59
	4.5	1,99

Z kolei na rys. 6.18, przedstawiono graficzną ilustrację kształtowania się wartości średnich siły skrawania nożami, o rozpatrywanych kształtach ostrzy. Jak wynika z tego rysunku, zarysowuje się pewna charakterystyczna tendencja. Siła skrawania jest zawsze większa dla ostrzy wyposażonych w dodatkową krawędź na powierzchni natarcia (nóż nr 2, nóż nr 3), przy czym w grupie ostrzy mających dodatkowo owalną powierzchnię przyłożenia, różnice te są mniejsze, niż w grupie ostrzy o płaskiej powierzchni przyłożenia.



Rys. 6.18. Wartości średnie siły skrawania, charakterystyczne dla rozpatrywanych form geometrycznych ostrzy noży.



Rys. 6.19. „Względna siła skrawania” tj wartość średniej siły skrawania i-tym ostrzem, odniesiona do średniej siły skrawania ostrzem o płaskich pow. natarcia i przyłożenia - x 100%.

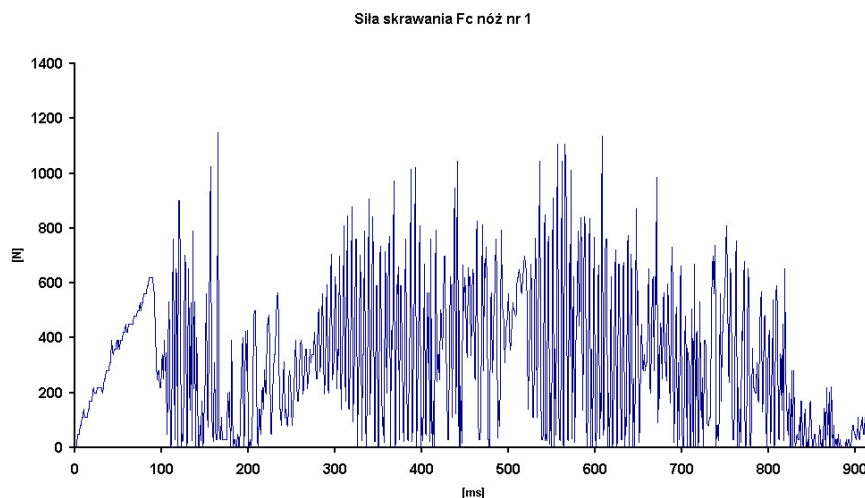
6.3.2. Przebieg i wyniki badań uzyskanych na stanowisku o łukowej trajektorii skrawania

Użyty do badań blok cementowo – piaskowy o parametrach porównywalnych z badanymi próbkami skalnymi, posiadał wymiary 2,0x1,8x1,0m i mocowany był za pomocą specjalnych uchwytów na ramie stanowiska badawczego. Trajektoria ruchu była krzywoliniowa o promieniu krzywizny $R=650\text{mm}$. Zastosowany uchwyt do mocowania noży był tak skonstruowany, aby trajektoria ruchu była taka sama dla wszystkich użytych noży. Do badań użyto tylko jednej próbki, ponieważ jej wymiary gabarytowe w stosunku do zaplanowanej ilości pomiarów i ich głębokości były wystarczające. Zanim przeprowadzone zostały badania, próbka została wstępnie zeskrwana do momentu, kiedy uzyskane zostało wcięcie o promieniu krzywizny odpowiadającej promieniowi krzywizny trajektorii ruchu narzędzia tj. $R = 650\text{mm}$. Przed przystąpieniem do badań, powierzchnia czynna próbki była specjalnie przygotowywana nożem wyrównawczym w celu uzyskania jednolitej powierzchni. Nóż wyrównawczy mocowany był w tym samym uchwycie w siłomierzu, co i badane noże. Dawało to pewność, że kształt powierzchni próbki będzie jednakowy na całej szerokości i każdy z użytych noży będzie skrawał na takiej samej drodze. Pomiar wartości sił obciążających narzędzie był prowadzony tylko dla skrawów otwierających analogicznie jak poprzednio. Przed zasadniczymi pomiarami przeprowadzany był skraw próbny w celu weryfikacji poprawności wskazania aparatury i założonej głębokości skrawania. Skraw ten nie był brany do analizy.

Po każdym skrawie bęben wahacza, na którym osadzony był siłomierz wyhamowywano i mierzona była głębokość skrawania w środku krzywizny skrawu. Wyhamowanie wahacza było możliwe dzięki zastosowaniu do sterowania ruchem hydraulicznego silnika wahadłowego, trójpółosiowego rozdzielacza elektrohydraulicznego. Zatrzymanie noża w końcowym położeniu pracy było konieczne dlatego, aby powracające narzędzie nie pogłębiało wtórnie, wykonanego skrawu przed pomiarem jego głębokości. Natomiast wióry, z uwagi, że samoczynnie pod wpływem grawitacji opadały na dno rynny, nie były narażone na wtórne miażdżenie przez powracające narzędzie. Po wykonaniu serii pomiarów na całej szerokości próbki, powierzchnia jej była ponownie wyrównywana nożem wyrównawczym. Na wyrównanej powierzchni próbki znaczone były miejsca kolejnych przejść noża i prowadzono pomiary w kolejnych seriach pomiarowych. Skrawanie odbywało się na dwu założonych głębokościach: $h_1 = 4\text{mm}$ i $h_2 = 8\text{mm}$.

Próbowi stanowiskowemu skrawania nożem nr 1 (rys. 4.1b) towarzyszyło uzyskiwanie wiórów o różnych rozmiarach i kształtach geometrycznych. Jednakże rozmiar maksymalnego elementu wióra nie przekraczał 5mm dla $h = 4\text{mm}$ i ok. 10mm dla $h = 8\text{mm}$. Wielkość i ilość wiórów była ściśle uzależniona od głębokości skrawania. Powrotowi tego narzędzia po wykonaniu skrawu często towarzyszyły duże opory ruchu (nóż nie był odsuwany od próbki po przejściu z uwagi na to, żeby nie zmieniać ustawień głębokości skrawania w kolejnych próbach). Na rys. 6.20 pokazany został typowy przebieg siły skrawania F_c .

Częstotliwość próbkowania wynosiła 1kHz, co daje rozdzielczość podziałki czasu (oś OX) równą $t = 1\text{ms}$.



Rys. 6.20. Przebieg czasowy zmiany siły skrawania F_c nożem nr 1, głębokość skrawania $h = 8\text{ mm}$.

W tab. 3 podano parametry skrawania nożem nr 1 oraz wartości składowych siły na ostrzu.

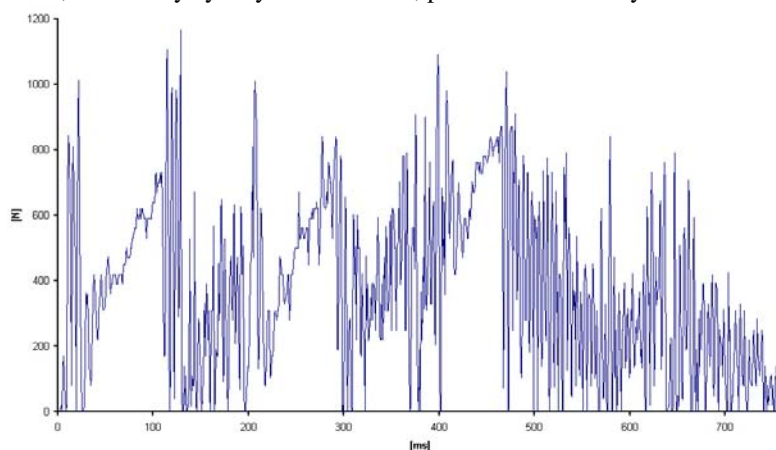
Tab. 3. Parametry skrawania nożem nr 1 i zarejestrowane wartości składowych siły na ostrzu.

Lp.	h [mm]	F_c [N]	F_b [N]	F_n [N]
1.1	4	263,7	349,00	461,1
1.2	4	250	314,94	292,3
1.3	4	237,31	319,45	348,5
1.4	8	305,52	305,54	520,74
1.5	8	417,76	308,21	528,25
1.6	8	390,07	367,1	567,18

Przy skrawaniu na głębokości $h = 4\text{mm}$ siła skrawania wynosiła 265,17N (wartość średnia). Zmiana głębokości skrawania do $h = 8\text{mm}$ spowodowała wzrost siły skrawania o 30,6% do wartości 382,3N. Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że pozostałe dwie składowe siły obciążającej narzędzie tj. siła docisku i siła boczna, są większe od siły skrawania. Siła normalna (docisku narzędzia do skały) przy głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$ wyniosła 367,5N. Przy zmianie głębokości skrawania do 8mm, siła wzrosła o 32,8% do wartości 546,91N. Stosunek siły skrawania do siły docisku przy $h = 4\text{mm}$ wyniósł 0,72, a przy $h = 8\text{mm}$ zmalał do wartości 0,70. Trzecia składowa siły obciążającej nóż – siła boczna kształtowała się na poziomie $F_b = 327,8\text{N}$ przy głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$. Po zwiększeniu głębokości do $h = 8\text{mm}$ siła boczna nieznacznie tylko

wzrosła do wartości $F_b = 328,15\text{N}$; a więc wzrost siły wyniósł tylko 0,1%. Stosunek siły skrawania do siły bocznej wahał się od 0,81 dla $h = 4\text{mm}$ do 1,16 przy głębokości skrawania $h = 8\text{mm}$. Generalnie należy stwierdzić, że wzrost głębokości skrawania h pociąga za sobą wzrost siły docisku F_n . Natomiast w przypadku siły bocznej nie obserwuje się znaczącego jej wzrostu.

Przy skrawaniu nożem nr 2 (rys. 4.2a) uzyskiwany był również wiór o kształcie i strukturze zbliżonej do charakterystycznego dla noża nr 1. Skrawano na dwu założonych głębokościach $h_1 = 4\text{mm}$ i $h_2 = 8\text{mm}$. Zastosowany do skrawania nóż miał płaską powierzchnię przyłożenia i klinową powierzchnię natarcia. Na powierzchni natarcia występowała ostra krawędź a powierzchnia ta miała kształt ostrego klina. Skrawanie przebiegało ze szczególnie dużymi oporami ruchu, w stosunku do pozostałych noży, dość często dochodziło do zatrzymywania organu roboczego stanowiska badawczego. Typowy przebieg czasowy siły skrawania, charakterystyczny dla noża nr 2, przedstawiono na rys. 6.21.



Rys. 6.21. Przebieg czasowy siły skrawania F_c nożem nr 2 (próba 43), głębokość skrawania $h = 8\text{mm}$.

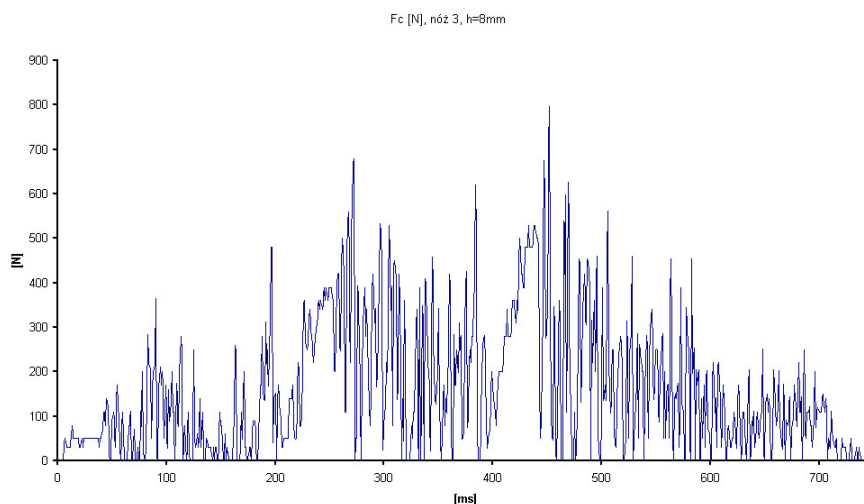
Parametry procesu skrawania nożem nr 2 oraz wartości składowych siły na ostrzu, przedstawia tablica nr 4.

Tab. 4. Parametry skrawania nożem nr 2 oraz wartości składowych siły na ostrzu.

Nr próby	h [mm]	F_c [N]	F_b [N]	F_n [N]
23	4	302,63	283,63	469,15
25	4	297,76	365,27	302,58
27	4	354,27	365,41	432,38
43	8	508,21	358,8	545,47
45	8	388,55	708,65	495,15
47	8	420,84	603,43	563,13

Siła skrawania dla noża nr 2 dla głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$ wyniosła $F_c=318,22\text{N}$ (wartość średnia z pomiarów). Przy skrawaniu z głębokością $h=8\text{mm}$ siła skrawania wzrosła o 27,54% i osiągnęła wartość 439,2N. Obserwowany wzrost siły jest mniejszy niż dla przypadku noża nr 1 (30,6%). Siła normalna F_n wahała się od 401,38N (wartość średnia z pomiarów) dla mniejszej głębokości skrawania, do 534,8N przy głębokości skrawania $h = 8\text{mm}$. Jak widać z powyższego siła docisku wzrosła wraz ze wzrostem głębokości skrawania o 24,9%. Stosunek siły skrawania do siły normalnej wyniósł $F_c/F_n = 0,79$ dla $h=4\text{mm}$ i $F_c/F_n = 0,82$ dla $h = 8\text{mm}$. Wartość siły bocznej wahała się od 419,17N przy głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$ do 656,04N przy $h = 8\text{mm}$, co stanowi wzrost siły o 36,1%. Stosunek siły skrawania do siły bocznej wyniósł 0,76 dla głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$ i 0,67 dla $h = 8\text{mm}$. Taki rozkład sił składowych jest spowodowany konstrukcją skrawającego noża.

Z kolei na rysunku 6.22, przedstawiony został typowy przebieg czasowy siły skrawania F_c , charakterystyczny dla skrawania nożem nr 3 (o klinowej pow. natarcia i owalnej pow. przyłożenia). Głębokość skrawania dla tych przebiegów wynosiła 8mm. Proces badawczy prowadzony był analogicznie do opisanych wyżej dwóch przypadków – dwie głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$ i $h_2 = 8\text{mm}$, podziałka skrawania jak dla skrawów otwierających.



Rys. 6.22. Przebieg zmiany siły skrawania F_c nożem nr 3 (próba 59), głębokość skrawania $h = 8\text{mm}$.

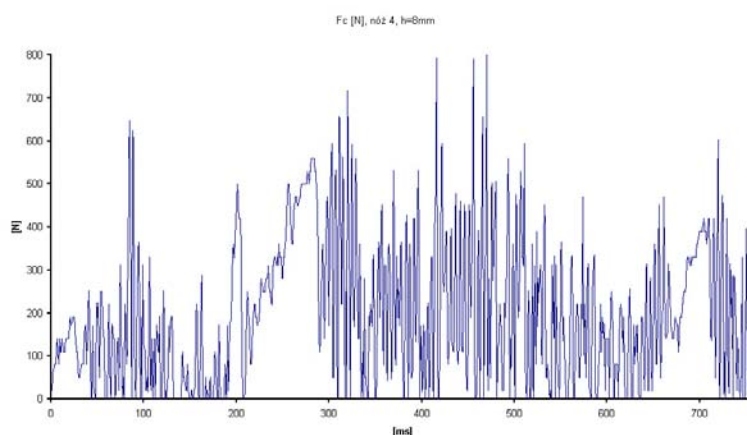
Parametry procesu skrawania oraz uzyskane wartości składowych siły na ostrzu nr 3, przedstawia tabela 5.

Tab. 5. Parametry skrawania nożem nr 3 i wartości sił składowych.

Nr próby	h [mm]	F_c [N]	F_b [N]	F_n [N]
51	4	102,38	379,25	249,7
53	4	73,28	615,38	241,09
55	4	73,28	544,42	247,46
57	8	211,14	442,1	409,50
59	8	253,78	872,93	305,67
61	8	236,86	686,12	376,46

W przypadku noża nr 3 siła skrawania wahała się od 82,98N przy głębokości skrawania $h = 4\text{mm}$ do 234N dla głębokości skrawania $h_2 = 8\text{mm}$, co daje wzrost siły skrawania o 189,2%. Siła normalna F_n osiągnęła wartość 246,1N (średnia wartość siły z pomiarów) dla głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$. Wraz ze zwiększeniem głębokości skrawania do $h_2 = 8\text{mm}$ siła docisku wzrosła o 32,36% do wartości 363,88N. Siła normalna pozostała w stosunku do siły skrawania jako $F_c/F_n = 0,34$ ($h_1 = 4\text{mm}$) i $F_c/F_n = 0,64$ ($h_2 = 8\text{mm}$). Z kolei siła boczna kształtowała się na poziomie $F_b = 579,9\text{N}$ dla przypadku skrawania na głębokości $h = 4\text{mm}$. Wzrost głębokości skrawania spowodował wzrost tejże siły tylko o 13,06%, co daje jej wartość $F_b = 667\text{N}$. Stosunek siły skrawania do siły bocznej pozostaje w zależności $F_c/F_b = 0,14$ ($h_1=4\text{mm}$) i $F_c/F_b = 0,35$ ($h_2 = 8\text{mm}$). Zarówno siła normalna jak i siła boczna są znacznie większe od siły skrawania.

Ostatnim użytym do badań narzędziem był nóż nr 4 (przedstawiony na rys. 4.2b). Jest to nóż o wypukłych, owalnie ukształtowanych powierzchniach natarcia i przyłożenia. Proces skrawania tym nożem przebiegał bez zakłóceń wywoływanych klinowaniem się organu roboczego stanowiska badawczego. Na rysunku 6.23 przedstawiony został przebieg czasowy siły skrawania F_c , charakterystyczny dla tego noża. Głębokość skrawania dla tych przebiegów wynosiła 8mm.



Rys. 6.23. Przebieg zmiany siły skrawania F_c nożem nr 4 (próba 71), głębokość skrawania $h = 8\text{mm}$.

Parametry skrawania nożem nr 4 przedstawia tabela 6.

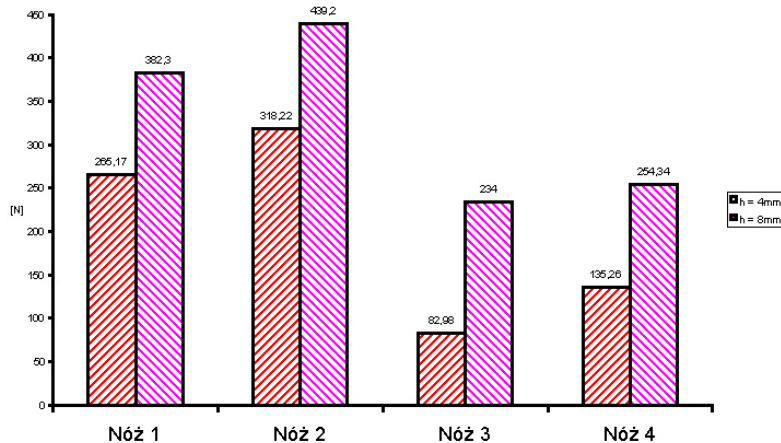
Tab. 6. Parametry skrawania nożem nr 4 oraz wartości sił składowych na ostrzu.

Nr próby	h [mm]	F_c [N]	F_b [N]	F_n [N]
63	4	125,32	286,48	333,68
65	4	130,64	249,89	328,95
67	4	150,14	405,22	346,26
69	8	291,37	503,40	434,92
71	8	249,35	705,55	416,02
75	8	222,28	608,42	422,53

Siła skrawania dla noża nr 4 przy głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$ wyniosła $F_c = 135,26\text{N}$ (wartość średnia z pomiarów). Zmiana głębokości skrawania na $h_2 = 8\text{mm}$ wywołała wzrost siły skrawania o 46,82% do wartości $F_c = 254,34\text{N}$.

Wartość siły docisku (siły normalnej) wahała się od wartości $F_n = 336,3\text{N}$ dla głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$ do wartości $F_n = 424,49\text{N}$ dla $h_2 = 8\text{mm}$, siła wzrosła o 20,77%. Proporcja siły skrawania do siły docisku dla $h_1 = 4\text{mm}$ wyniosła $F_c/F_n = 0,40$; natomiast dla $h_2 = 8\text{mm}$ wzrosła do wartości 0,60.

Z zestawienia wszystkich sił skrawania dla poszczególnych noży wynika, że największe siły zarejestrowano dla noża nr 2, a najmniejsze dla noża nr 3 (rys. 6.24).



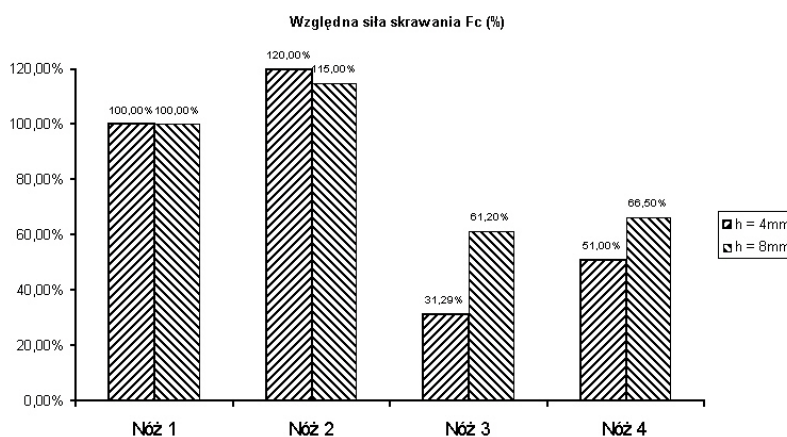
Rys. 6.24. Zestawienie średnich wartości sił skrawania dla badanych noży.

Zarysowuje się wyraźna dysproporcja wartości sił skrawania charakterystycznych dla noży o płaskiej powierzchni przyłożenia (noże nr 1 i nr 2) oraz noży o owalnej powierzchni przyłożenia (noże nr 3 i nr 4). Dla badanego zakresu głębokości skrawania, owalny kształt powierzchni przyłożenia wyraźnie obniża wartości sił skrawania. Efekt ten można tłumaczyć znaczącym zmniejszeniem powierzchni

zarysu noża (która jest w kontakcie ze skrawaną skałą), charakterystycznym dla ostrzy o owalnej powierzchni przyłożenia. Z kolei różnice w wartościach sił charakterystycznych dla noży o owalnej powierzchni przyłożenia ale o klinowej oraz owalnej powierzchni natarcia (nr 3 i nr 4) nie są zbyt wyraźne, zwłaszcza dla większych głębokości skrawania (rzędu 5%).

W grupie noży o płaskiej powierzchni przyłożenia (nóż nr 1 i nr 2), wyraźny jest wpływ kształtu powierzchni natarcia. Wprowadzenie klinowej powierzchni w miejsce płaskiej, spowodowało przyrost siły skrawania rzędu 15÷20% (zależnie od głębokości skrawania).

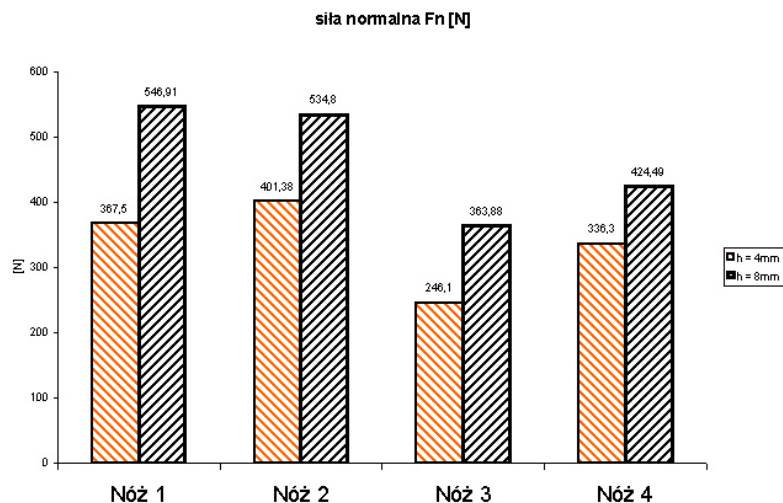
Przyjmując za punkt odniesienia siłę skrawania nożem nr 1, tj. nożem o płaskiej powierzchni przyłożenia i natarcia jako 100%, to pozostałe wartości sił skrawania dla badanych noży można przedstawić jak na rys. 6.25.



Rys. 6.25. „Względna siła skrawania” tj. wartość średniej siły skrawania i-tym ostrzem, odniesiona do średniej siły skrawania ostrzem o płaskich pow. natarcia i przyłożenia - x 100%.

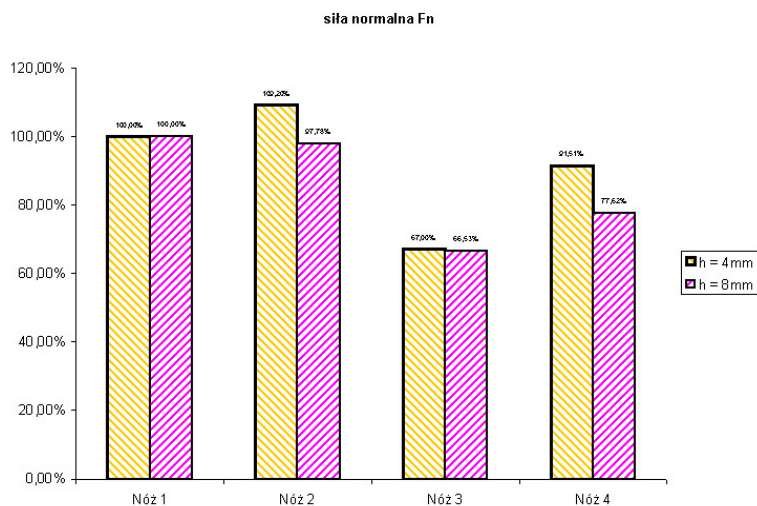
W przypadku siły normalnej, wyniki nie są jednoznaczne. Dla większych głębokości skrawania, największa siła normalna wystąpiła na ostrzu nr 1, jednak w stosunku do noża nr 2, różnica ta jest minimalna.

Generalnie można stwierdzić, że siła docisku wzrastała wraz ze wzrostem głębokości skrawania (rys. 6.26).



Rys. 6.26. Zestawienie wartości sił normalnych F_n dla badanych noży.

Odnosząc wartości siły normalnej na poszczególnych nożach, do siły na ostrzu noża nr 1, dokonano porównania kształtowania się obciążenia noży, w odniesieniu do tego właśnie noża (co ilustruje rys. 6.27).

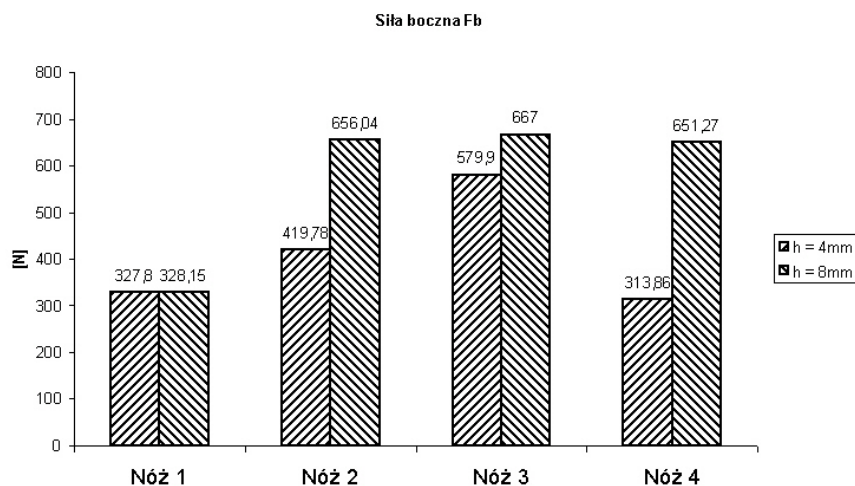


Rys. 6.27. „Względna siła normalna” tj. wartość średniej siły normalnej na i -tym ostrzu, odniesionej do średniej siły normalnej na ostrzu o płaskich pow. natarcia i przyłożenia - x 100%.

Dla tak przyjętej formy prezentacji danych, łatwo można zauważyć, że najmniejsze siły docisku występują w przypadku noża nr 3 (owalna powierzchnia przyłożenia, klinowa powierzchnia natarcia). Natomiast największe siły normalne są dla noża nr 2 przy głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$ (145,52%, 534,8N) i dla noża nr 1 przy głębokości skrawania $h_2 = 8\text{mm}$ (100%, 546,91N).

Wartość siły bocznej wahała się od $F_b = 313,86\text{N}$ przy głębokości skrawania $h_1 = 4\text{mm}$, do $F_b = 651,27\text{N}$. Wzrost siły wyniósł 51,81% i był to największy przyrost siły bocznej dla badanych noży. Stosunek siły skrawania do siły bocznej wyniósł dla $h_1 = 4\text{mm}$ $F_c/F_b = 0,43$, a dla głębokości skrawania $h_2 = 8\text{mm}$ - $F_c/F_b = 0,39$. Zestawienie sił bocznych badanych noży przedstawia rys. 6.28. Na podstawie tego zestawienia widać, że najmniejsze wartości wystąpiły dla noża nr 1 (przy $h_2=8\text{mm}$, $F_b = 328,15\text{N}$) i dla noża nr 4 (przy $h_1= 4\text{mm}$, $F_b = 313,86\text{N}$). Największe siły boczne są dla noża nr 3 przy obydwu głębokościach skrawania.

Stosunek siły skrawania do siły bocznej dla noża nr 4 wynosił odpowiednio $F_c/F_b = 0,43$ dla głębokości skrawania $h_1= 4\text{mm}$, oraz $F_c/F_b = 0,39$ dla głębokości skrawania $h_2 = 8\text{mm}$.

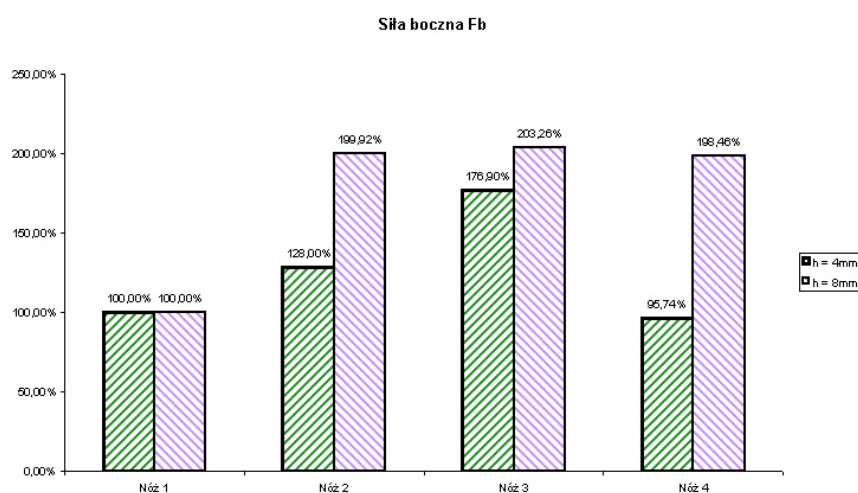


Rys. 6.28. Zestawienie wartości sił bocznych F_b badanych noży.

Dla pełnego obrazu prezentowanych danych na rys. 6.29 przedstawione zostały zależności procentowe siły bocznej pomiędzy poszczególnymi nożami. Jako kryterium porównawcze przyjęto jako 100% wartości sił bocznych F_b generowanych na nożu nr 1 płaskiej powierzchni natarcia i płaskiej powierzchni przyłożenia (typowy nóż klinowy). Nożem, którego składowa boczna siły przyłożonej do skrawającego narzędzia jest najmniejsza, jest nóż nr 1. Tak jest zarówno dla przypadku skrawania z głębokością skrawania $h_1 = 4\text{mm}$, jak i dla skrawania z głębokością $h_2 = 8\text{mm}$. Wszakże, nieco niższą wartością siły bocznej charakteryzuje się nóż nr 4 przy skrawaniu z głębokością skrawania $h_1 = 4\text{mm}$, ale

różnica pomiędzy tymi wartościami jest niewielka (4,26%), dlatego też można przyjąć, że nóż nr 1 jest najmniej obciążony od składowej bocznej F_b . Największe wartości składowej bocznej występują na nożu nr 3.

Jak można zauważyć, wprowadzenie ostrzy o przestrzennych formach powierzchni natarcia, generalnie sprzyja wzrostowi siły bocznej. Zjawisko to można tłumaczyć tym, że w trakcie zagłębiania się takich narzędzi w skałę, istnieją przesłanki do bocznego odchylenia noża (względem trajektorii skrawania), co sprzyja pojawieniu się reakcji bocznych na narzędziu. Równocześnie, omawiane formy geometryczne ostrzy, nie sprzyjają powrotowi noża na pierwotne położenie względem uchwytu i głowicy, z uwagi na brak możliwości bocznego skrawania materiału skalnego.



Rys. 6.29. „Względna siła boczna” tj. wartość średniej siły bocznej na i -tym ostrzu, odniesiona do średniej siły bocznej na ostrzu o płaskich pow. natarcia i przyłożenia - x 100%..

6.4. Wnioski z badań laboratoryjnych

Przeprowadzone badania laboratoryjne tak na stanowisku o prostoliniowej jak i krzywoliniowej trajektorii skrawania, pozwoliły stwierdzić, że:

- wprowadzenie przestrzennej formy geometrycznej powierzchni natarcia ostrza, w miejsce płaskiej, powoduje znaczący przyrost siły skrawania,
- z pośród badanych form geometrycznych powierzchni natarcia, największy przyrost siły skrawania powoduje klinowo ukształtowana powierzchnia natarcia, przy płasko ukształtowanej powierzchni przyłożenia,

- dla większych głębokości skrawania, różnice w wartościach siły skrawania ostrzem o klinowej powierzchni natarcia oraz o owalnej powierzchni natarcia są niewielkie

Z uwagi na koszty, badania miały na celu głównie jakościową ocenę wpływu określonej formy geometrycznej ostrza na kształtowanie się jego obciążenia. Celem ustalenia indywidualnego wpływu poszczególnych parametrów konstrukcyjnych ostrza (które decydują o jego ostatecznej formie geometrycznej), niezbędne są dalsze, szczegółowe badania.

7. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę wyniki badań numerycznych oraz laboratoryjnych, wysunięto wnioski:

1. Badania numeryczne wykazały a badania laboratoryjne potwierdziły, że przestrzenne formy geometryczne powierzchni natarcia ostrza, powodują znaczący wzrost (rzędu $15 \div 20\%$) siły skrawania materiałów skalnych, względem ostrzy o płaskich powierzchniach natarcia.
2. W świetle przeprowadzonych badań numerycznych, zweryfikowanych pozytywnie badaniami laboratoryjnymi, stwierdzono, że przestrzenne formy powierzchni natarcia ostrza przyczyniają się do wzrostu siły skrawania.
3. Czynnikiem odpowiedzialnym za znaczący przyrost siły skrawania ostrzem o przestrzennie ukształtowanej powierzchni natarcia w stosunku do ostrza o płaskiej powierzchni natarcia, w świetle badań numerycznych, jest intensywne zaciskanie skały na bocznych powierzchniach takiego ostrza, co sprzyja zwiększonemu tarcu skały o ostrze (zwłaszcza w strefie gdzie skała nie ulega bocznemu wykruszaniu).
4. Przeprowadzone badania analityczne jak i laboratoryjne potwierdziły rozważania Evansa [15], że wprowadzenie dodatkowych krawędzi skrawających na ostrzu klinowym, sprzyja bezproduktywnemu rozpraszaniu energii oraz przyczynia się do wzrostu obciążenia ostrza.
5. Analiza MES wykazała, że miejsca koncentracji naprężeń występują głównie w okolicach ostrych naroży ostrza, przy czym największe wartości występują w przypadku ostrza o płaskiej powierzchni natarcia.
6. Przeprowadzone badania analityczne wykazały, że analiza MES może być szczególnie przydatna w opracowywaniu przez biura konstrukcyjne przemysłu węglowego, geometrii ostrzy o najbardziej korzystnych parametrach z punktu widzenia tak obciążenia jak i trwałości ostrza, ograniczając przy tym do minimum ilość kosztownych badań i eksperymentów przemysłowych.
7. Z uwagi na to, że badania numeryczne MES zostały potwierdzone badaniami stanowiskowymi, uzasadnione jest prowadzenie w przyszłości badań narzędzi urabiających głównie w oparciu o analizę MES.

Natomiast badania stanowiskowe, z uwagi na wysokie koszty, powinny być prowadzone tylko w celach weryfikacyjnych.

8. Z uwagi na duże koszty i ryzyko podczas badań skrawania skał (np. częste uszkodzenia przygotowanych bloków skalnych, uniemożliwiające dokończenie zaplanowanych serii pomiarowych, w powtarzalnych warunkach skrawania), często występująca niekompletność informacji (np. o parametrach skały), w podobnych badaniach sugeruje się wykorzystanie metod tzw. sztucznej inteligencji (w tym zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych czy algorytmów genetycznych), co może zmniejszyć ich koszty oraz podnieść jakość uzyskiwanych wyników. Oczekuje się również, że będzie możliwe prognozowanie kształtowania się obciążenia nowych konstrukcji narzędzi, zależnie od urabiania określonej formacji skalnej, już na etapie ich projektowania, bez konieczności prowadzenia żmudnych badań rozpoznawczych, wykorzystując już posiadane bazy danych.

8. Wytyczne do dalszych badań

Z dotychczas opublikowanych prac krajowych jak i zagranicznych (rozdz. 2) wynika, iż z uwagi na czasochłonność, koszty badań, problemy logistyczne oraz trudności w zachowaniu warunków powtarzalności badań (konieczność przygotowywania dużej liczby próbek z materiałów naturalnych, o losowo rozłożonych właściwościach), badania w poruszonym temacie są bardzo trudne w realizacji.

Mając na uwadze opisaną powyżej złożoność procesu oraz liczbę czynników mających wpływ na proces skrawania skał, w ewentualnych, dalszych badaniach tego procesu, proponuje się wykorzystanie najnowszych technik badawczych takich jak np. algorytmy genetyczne czy sztuczne sieci neuronowe. Jak się oczekuje, pozwoli to na znaczne przyspieszenie prowadzenia badań, ograniczenie ich kosztów oraz lepsze prognozowanie przewidywanych efektów urabiania, pomimo niepełnych danych pomiarowych.

8.1. Propozycja wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do badania wpływu parametrów geometrycznych powierzchni natarcia na kształtowanie się obciążenia ostrza

Jak już wspomniano, kształt powierzchni natarcia dla danej płytki, z której wykonane jest ostrze, charakteryzuje szereg parametrów konstrukcyjnych, co w przybliżeniu można zapisać (wzór nr 4):

$$k \approx f(R, R_1, R_2, \varphi, \varepsilon, D, T \dots) \quad (6)$$

Aby przeprowadzić np. szczegółowe badania wpływu tych parametrów na kształtowanie się obciążenia ostrza, niezbędne jest stworzenie odpowiednio

dużego banku narzędzi uwzględniających w miarę reprezentatywny zakres tych parametrów. Przy zachowaniu wymaganej liczby powtórzeń niezbędnych pomiarów, oprócz wspomnianych już kosztów, przyczyni się to między innymi do wygenerowania znacznej liczby danych pomiarowych. Z przyczyn losowych, zawsze istnieje też niebezpieczeństwo pojawienia się braku kompletności tychże danych, skąd koncepcja, aby do szczegółowych badań takiego zagadnienia, wykorzystać wspomniane już sztuczne sieci neuronowe lub algorytmy genetyczne.

Algorytmy genetyczne są to algorytmy poszukiwania, oparte na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności [25, 26]. Mechanizmy doboru naturalnego i dziedziczność opierają się na ewolucyjnej zasadzie przeżycia najlepiej przystosowanych algorytmów z systematyczną, ale i z przypadkową (losową) wymianą informacji. Na swój sposób tworzą one metodę poszukiwania obdarzoną pewną dozą pomysłowości tak charakterystyczną dla umysłu ludzkiego. Ewolucyjność procesu poszukiwania nowych rozwiązań opiera się na modyfikacji informacji w każdym nowym pokoleniu. Każde nowe pokolenie tworzy nowy zespół sztucznych organizmów w postaci ciągów bitowych powstałych z połączenia fragmentów „starych genów” pochodzących z poprzedniego pokolenia. O wyborze fragmentów przedstawicieli z poprzedniego pokolenia decyduje ich jak najlepsze przystosowanie do poszukiwanego algorytmu. Oprócz istniejących już fragmentów z poprzedniego pokolenia do procesu poszukiwania najlepszego rozwiązania dołączane są także nowe części składowe, nie występujące do tej pory w żadnym z poprzednich pokoleń.

Wspomniane już zostało, że algorytmom genetycznym towarzyszy element przypadkowości (losowości), to jednak ich działanie nie sprowadza się do przypadkowego błędzenia poprzez kolejne pokolenia. Zakres działań nowego pokolenia efektywnie wykorzystuje doświadczenia przeszłych pokoleń do określania nowego obszaru poszukiwań o przewidywanej podwyższonej wydajności.

Algorytmy genetyczne charakteryzują się odpornością na zakłócenia jak również „potencjalną możliwością wyzyskania architektur sprzętowych o wysokim stopniu równoległości, a w zastosowaniu do systemów klasyfikujących stanowią nowy sposób podejścia do problemów inteligencji i adaptacji” [26]. Są bardzo skuteczną i odporną metodą poszukiwania w przestrzeniach wielowymiarowych. W literaturze światowej można znaleźć wiele publikacji, które potwierdzają przydatność tej techniki obliczeniowej w zagadnieniach związanych z optymalizacją i sterowaniem [25].

Kolejnym atutem algorytmów genetycznych wpływającym na ich rozwój i szerokie zastosowanie jest fakt, że są nieskomplikowanym a przy tym wysoce skutecznym narzędziem poszukiwania lepszych rozwiązań. Poza tym, nie są one uwarunkowane nakładaniem ograniczeń zewnętrznych o przestrzeni poszukiwań takich jak np. ciągłość, istnienie pochodnych, jednomodalność funkcji celu.

W Polsce technika ta jest jeszcze dość mało znana, głównie z uwagi na małą dostępność do oprogramowania komputerowego opartego na teorii algorytmów genetycznych. Polskie opracowania tematu to między innymi [102,89].

Druga z proponowanych technik obliczeniowych – sztuczne sieci neuronowe ANN (Artificial Neural Network) wywodzi się z nauk naturalnych (biologia, medycyna, anatomia) i połączenia ich z techniką i informatyką. Sztuczne sieci neuronowe są „zespołami prostych, wzajemnie połączonych jednostek i przetwarzają informacje równolegle, w całej swej objętości.” [102]. ANN opierają się na analogii do struktury i działania ludzkiego mózgu.

Zainteresowanie stosowaniem sztucznych sieci neuronowych wynika z faktu, że ich dostosowywanie się do rozwiązywania określonego zadania zachodzi poprzez ich uczenie się, przy użyciu typowych pobudzeń i odpowiadającym im określonych reakcji. Jak więc widać, nie wymagają one precyzowania konkretnego algorytmu w postaci programu komputerowego. Fakt ten jest szczególnie przydatny w tych przypadkach, gdzie stosowanie komputera ze standardowym oprogramowaniem napotyka duże trudności. Szczególnie jest to widoczne w zadaniach wymagających kojarzenia informacji i analizy danych o różnych charakterach.

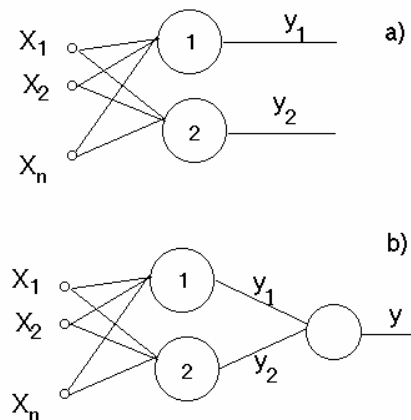
Podstawowe elementy przetwarzające informacje w sztucznej sieci neuronowej to sztuczne neurony (częściej zwane po prostu neuronami) albo węzły. Neurony można często traktować jako elementy progowe, które aktywują się wtedy, gdy suma ich sygnałów wejściowych przekroczy pewien poziom. Podstawowym zadaniem neuronów jest sumowanie i nieliniowe odwzorowywanie sygnałów. Neurony w sieci ułożone są w regularne struktury, najczęściej w postaci warstw. Bywa też tak, że pomiędzy neuronami w tej samej warstwie jak i pomiędzy sąsiednimi warstwami istnieją połączenia zwrotne, oddziaływanie których wyrażone jest pewną liczbą. Liczba ta w terminologii związanej z ANN nazywana jest wagą. Wartość wagi w czasie działania sieci może być modyfikowana w celu uzyskania jak najlepszych odpowiedzi na wyjściu z sieci.

Sztuczną sieć neuronową przede wszystkim charakteryzuje ją jej architektura. Rozróżnia się sieci o strukturze bez połączeń zwrotnych i z połączeniami zwrotnymi. Sieci bez połączeń zwrotnych działają bardzo szybko ponieważ reagują natychmiast na pobudzenie. Sieci z połączeniami zwrotnymi z uwagi na występowanie tych połączeń wymagają pewnego przedziału czasowego na ustalenie się odpowiedzi. Dzięki temu zjawisku sieci z połączeniami zwrotnymi można charakteryzować przez ich zachowanie się w czasie – zachowanie to nazywane jest dynamiką sieci (częściej, krótko – dynamiką). Zasadnicza różnica tkwiąca pomiędzy sztucznymi sieciami neuronowymi a konwencjonalnymi komputerami jest taka, że komputery są programowane dla realizacji konkretnych zadań. Sieci natomiast są uczone i trenowane, uczą się kojarzenia obrazów i zależności funkcyjnych. Podstawowym zadaniem projektanta sieci nie jest określenie algorytmów, według których, będzie działał węzeł obliczeniowy (neuron, lub grupa neuronów), lecz ich zadaniem jest określenie (jego zdaniem) najlepszej architektury sieci, specyfikacja charakterystyki neuronów, określenie początkowych wartości wag a na koniec wybór metody uczenia się sieci neuronowej [101].

Istniejące w literaturze definicje sztucznych sieci neuronowych można przedstawić w następującej postaci: *sztuczna sieć neuronowa jest układem*

neuronów, w którym wyjścia każdego neuronu są połączone, poprzez wagi, z wejściami wszystkich neuronów, w tym także z jego własnym wejściem [102].

Sztuczne sieci neuronowe w zależności od stopnia komplikacji dzieli się na sieci jednowarstwowe i sieci warstwowe (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Model sieci a) jednowarstwowej, b) warstwowej.

W przypadku sieci warstwowej ilość warstw jest zależna od stopnia komplikacji sieci. Ilość neuronów w warstwie jest zależna od komplikacji zadania obliczeniowego i doświadczenia osoby budującej sieć, ta sama zależność dotyczy ilości warstw w sieci.

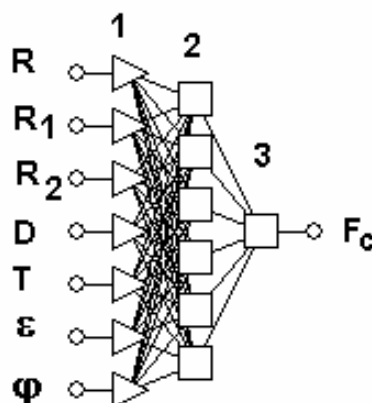
Przedstawiony podział modeli sieci dokonany był z uwagi na stopień komplikacji sieci. Częściej spotykanym w literaturze podziałem sieci jest podział ze względu na zasadę ich działania. Wyróżnić tutaj można np. sieci jednokierunkowe czy np. sieci ze sprzężeniem zwrotnym.

W Polsce najwięcej opracowań zostało opublikowane przez pracowników AGH, Politechniki Warszawskiej oraz Gdańskiej.

8.1.1. Przykładowa struktura sieci neuronowej, służącej do badania wpływu parametrów geometrycznych powierzchni natarcia na obciążenie ostrza

Przystępując zatem do analizy zagadnienia z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, należy określić między innymi zmienne wejściowe sieci, zmienne (lub zmienną) wyjściowe sieci, ilość warstw sieci (w tym ilość warstw

ukrytych) oraz między innymi ilość neuronów w poszczególnych warstwach. W analizowanym przypadku, zmiennymi wejściowymi będą wielkości: R , R_1 , R_2 , D , T , ε , φ . Zmiennymi wyjściowymi będą składowe siły obciążającej ostrze tj.: F_c , F_n , F_b . Po dekompozycji, możliwe jest uwzględnienie na wyjściu sieci, jedynie jednej składowej, np. F_c , oraz analizowanie uzyskanych zależności dla każdej zmiennej wyjściowej oddzielnie. Przykładową strukturę takiej sieci, można zaproponować jak na rys. 88. Niezbędne są jednak szersze badania nad określeniem najbardziej optymalnej struktury i rodzaju sieci, w tym optymalnej liczby neuronów w warstwie ukrytej czy optymalnej liczby warstw ukrytych, sposobu uczenia sieci, itd. Jak można zauważyć, w rozpatrywanym przypadku ma się do czynienia z zagadnieniem regresyjnym. Stopień skomplikowania krzywej regresji nieliniowej kontrolowany jest tutaj poprzez liczbę neuronów, która decyduje o złożoności wyniku. Przy czym w takim przypadku nie podaje się jawnie postaci funkcyjnej krzywej regresji, przez co unika się preferowania, już na początku analizy, określonego (czasem błędnego) charakteru przebiegu procesu, przez przyjęcie określonej postaci funkcji aproksymującej, co było charakterystyczne dla typowych metod regresji nieliniowej.



Rys. 8.2. Struktura sieci neuronowej, do analizy wpływu parametrów powierzchni natarcia ostrza, na kształtowanie się siły skrawania (R , R_1 , R_2 , D , T , ε , φ - parametry powierzchni natarcia ostrza, F_c – siła skrawania, 1- neurony warstwy wejściowej, 2- neurony warstwy ukrytej, 3 – neurony warstwy wyjściowej). Oznaczenia wg rys. 2. 2.

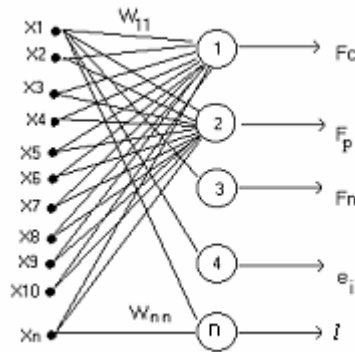
8.2. Propozycja wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do kompleksowej identyfikacji procesu urabiania

W przypadku kompleksowej analizy wpływu czynników istotnych w procesie urabiania (omówionych w początkowej części rozdziału 2), struktura sieci ulec musi znacznej rozbudowie. Na wyjściu z sieci powinny znaleźć się tak wskaźniki siłowe procesu skrawania skał (składowe siły obciążającej ostrze), jak i np. właściwa energia skrawania e_c czy np. długość maksymalna elementu wióra l . Liczba wielkości wejściowych również znacznie wzrośnie (wzory nr 1÷5, rozdział 2).

Określiwszy wielkości jakie powinny znaleźć się po stronie wejściowej do sieci i po stronie wyjściowej można przejść do wyboru modelu sieci. Problem o tyle jest złożony, że nie do końca rozpoznane są procesy myślenia i uczenia się ludzkiego mózgu. Dlatego też trudno jest jednoznacznie powiedzieć z ilu warstw będzie składała się sieć, aby była w stanie podołać przetworzeniu wszystkich dostarczonych jej informacji i podać, jeżeli nie jedną to chociaż pewien zbiór prawidłowych odpowiedzi.

Na początek do określania obciążenia noży płaskich można zaproponować sieć jednowarstwową bez sprzężeń zwrotnych. Na ile będzie to trafny wybór, na obecnym etapie prac trudno jest jeszcze powiedzieć. Ze wstępnych rozważań teoretycznych wynika, że można się spodziewać zadowalających wyników. Proponowany model sieci zostanie sprawdzony i zweryfikowany doświadczalnie w przyszłych pracach autora.

Proponowana sieć neuronowa powinna być układem neuronów, w którym wyjścia każdego neuronu są połączone, poprzez wagi, z wejściami wszystkich neuronów w tym także z jego własnym wejściem. Na podstawie danych literaturowych można wysunąć wniosek, że najwłaściwszym do tego zadania modelem może być sieć jednokierunkowa bez sprzężenia zwrotnego (przynajmniej we wstępnej wersji rozwiązania). Może to być zatem jednowarstwowa sieć jednokierunkowa np. o n -neuronach powiązanych przynajmniej z n -wejściami (rys 8.3).



Rys. 8.3. Przyjęty model sztucznej sieci neuronowej do badania obciążenia noży płaskich. x_1 do x_n – parametry wejściowe, 1... n - numery neuronów, w_{in} – wagi, I - maksymalny wymiar ziarna.

Dla przyjętego modelu sieci, wektory wejściowy i wyjściowy mają postać:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^t ; y = [F_c \ F_p \ F_n \ e_i \ I]^t \quad (6)$$

Bardzo często wektory te nazywane też są odpowiednio, obrazem wejściowym i obrazem wyjściowym [3]. Wagi w_{in} łączą odpowiednio neuron i , z wejściem do sieci n , i w nomenklaturze tej zapis np. w_{nn} oznacza połączenie węzła docelowego nr n (neuronu) z wejściem źródłowym nr n (x_n). Zatem pobudzenie dowolnego neuronu można zapisać w postaci:

$$net_i = \sum_{m=1}^n w_{ij} x_n, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

Pod wielkościami x_1 do x_n kryją się parametry podane we wzorach nr 1 do 5. Na rysunku podana jest również wielkość wejściowa x_n . Wydaje się, że na wejściu do sieci powinno być przynajmniej dziesięć wielkości wejściowych. Jest to niezbędne minimum, znane już z badań doświadczalnych i numerycznych, które należy uwzględnić, aby otrzymać wiarygodne wyniki badań.

Przedstawiona koncepcja wykorzystania sieci neuronowych do badania procesów skrawania skał nożami tzw. „płaskimi” wymaga jeszcze dopracowania. Oczekuje się jednak, że badania zarówno stanowiskowe jak i numeryczne dostarczą nowych danych dla sztucznych sieci neuronowych, co pozwoli udoskonalić proponowaną strukturę sieci a uzyskiwane wyniki przybliżyć do rzeczywistości. Oczekuje się również, że będzie możliwe prognozowanie kształtowania się obciążenia nowych konstrukcji narzędzi, zależnie od urabiania określonej formacji skalnej, już na etapie projektowania narzędzia, bez konieczności prowadzenia żmudnych badań rozpoznawczych, wykorzystując już posiadane bazy danych.

Literatura

1. Barker J.S. – *A laboratory investigation of rock cutting using large picks*. In. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol. 1, 1964, s. 519 – 534.
2. Bieron A. J. – *Ob ocenie energetycznego balansu procesu rezania uгля*. Podziemna rozrobka uęolnych płastow. Trudy IGD im. A. Skoczynskiego 1972, wyp. 9.
3. Bieron A. J. – *Ob osnovnykh eksperimentalno-analiticheskikh teorii reziianiia uęla i gornyykh porod*. Sb. Sovershenstvovanie rozrobki uęolnykh miestorozenij. Uęletechizdat, 1959.
4. Bieron A. J. – *Reziianiie uęla*. Gosgortechizdat, 1962.
5. Bieron A. J. , Pozin E.Z. , Ton W.W. – *Issledovanie i vybor effektivnogo rjezhushchego instrumienta dljenshjekovykh ispolnitelnykh organow*. Institut Gornogo Diela , Moskwa 1969r.
6. Błazik - Borowa E., Podgórski J., Sulik P. – *Przykłady rozwiązywania zadań z mechaniki konstrukcji za pomocą systemu ALGOR*, Lublin 2000.
7. Bobrow V. F. – *Osnovy teorii rezaniia metallov*. Moskwa, Maszinostroenie, 1975.
8. Bojko N. G., Markov N. A. – *Snizenije udielnykh energozatrat razrusheniia płasta i povyshenie proizvoditelnosti ocistnogo kombajna*. Gornaja Mechanika UDK 622.232.72.
9. Clark G. B. – *Principles of Rock Fragmentation*. Viley, New York, 1987, p. 610.
10. Czudaj K. – *Gesichtspunkte für die Anwendung der maschinellen Gewinnung in Festgesteinen*. Neue Bergbautechnik, 8, Jg., Heft 1, Januar 1978.
11. Demou S. G., Olson R. C., Winqvist C.F. – *Determination of Bit Forces Encountered in Hard Rock Cutting for Application to Continuous Miner Design*. United States Department Of Interior, Bureau of Mines, RI 8748.
12. Detournay E., Drescher A., Garagash D., Richard T. – *Rock behavior in shallow cutting*. Mat. Konf.: SolMec, 1998, Zakopane, Poland, September 1-5, 1998, s. 121 – 122.
13. Driesch S. – *Untersuchungen über Wahl und wirtschaftliche Schneidgeschwindigkeit von Kegelmeißeln für Teilschnitt – Vortriebsmaschinen*. Glückauf – Forschungshefte 52 (1991), Nr 5, pp. 214 – 219.
14. Evans I. – *Basic Mechanics of the Point – Attack Pick*. Colliery Guardian, May 1984.
15. Evans I. – *Optimum Line Spacing for Cutting Picks*. Mining Engineer, Jan. 1982r. s. 433.
16. Evans J. – *The Force required to cut coal with blunt wedges*. International Journal of Rock Mechanics Vol. 2, 1965r.

17. Evans J., Murell A. A. F. – *Wedge Penetration Into Coal*. Colliery Engineering, 1962r. nr 1, s. 11 – 16.
18. Evans I., Pomeroy C.D. – *The Strength, fracture and workability of coal. Theoretical aspects of cutting and ploughing of coal*. Pergamon Press Ltd., London, 1966, ch. 13, pp. 236-257.
19. Fahning E. – *Schnittkraft – und verschleißmessungen mit verschiedenen Meißeltypen*. Neue Bergbautechnik, 6 Jg, Heft 12, Dezember 1976, s. 915 – 918.
20. Frołow A. G. – *Metoda zwiększenia ilości grubych sortymentów i zmniejszania zapylenia przy wydobywaniu węgla*. Mechanizacja Górnictwa, 1971, nr 39.
21. Gehring K. H. – *A cutting comparison*. Tunnels & Tunneling, November, 1989, pp. 27 – 31.
22. Gehring K. H. – *Möglichkeiten zur Betreibung des Arbeitsveraltens von Werkzeugen zur schneiden Gesteinbearbeitung*. Berg und Hüttenmännische Monatshefte MH 10, 1973.
23. Gehring K. H. – *Über den zusammenhang zwischen Gesteineigenschaften und Gewinnbarkeit unter besonderer Berücksichtigung der Vortriebstechnik*. Berg – und Huttenmaschine Monatshefte 120 (1975) 4, s. 146 – 152.
24. Giza T. – *Zależność siły i energii skrawania węgla od stanu ostrza noża*. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej Górnictwo z. 130, 1985.
25. Goldberg D. E. – *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. WNT Warszawa 1995.
26. Goldberg D. E. – *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison – Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, USA 1989.
27. Gondek H. – *Określenie sił skrawania działających na noże organów urabiających kombajnów ścianowych i chodnikowych*. VI konferencja Naukowo – Techniczna „Trwałość Elementów i Węzłów Konstrukcyjnych Maszyn Górniczych”. Kraków, 1998.
28. Greń J. – *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*. PWN W-wa, 1976r.
29. Grzesik W. – *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. WNT, Warszawa 1998 r.
30. Hanson B. D., Roepke W.W. – *Effect of symmetric bit wear and attack angle on airborne respirable dust and energy consumption*. Bureau of Mines, RI nr 8395.
31. Hurt K. G., Evans I. – *Point attack tools: an Evaluation of function and use for rock cuttings*. The Mining Engineer, March 1981.
32. Hurt K. G., Laidlaw D.D. – *Laboratory comparison of three rock cutting tools*. Tunnels & Tunneling, May 1979 r. s. 13 – 16.
33. *Improving the Capabilities of Cutting Tools and Cutting Systems for Hard Rock* – ICACUTROC. Eng. & Mining J. No 10, 1998.
34. *Instrukcja obsługi modułu kontrolno – pomiarowego LC-011-1612*, Ambex sp. z o.o. 1992.

35. *Instrukcja obsługi modułu kontrolno – pomiarowego LC-055-PIO*, Ambex sp. z o.o. 1992.
36. Jaromin Z. – *Wyniki badań urabiania pokładów o różnej zwięzłości nożami NK – 4 oraz nożami stożkowymi*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Katowice, luty 1981.
37. Jonak J. - *Badania stanowiskowe wpływu wybranych parametrów noży urabiających na efekty urabiania skał*. Rozprawa Doktorska Politechnika Śląska, Gliwice 1990.
38. Jonak J. - *Osobliwości kształtowania skrawaniem materiałów skalnych* Mechanik nr 7/1998.
39. Jonak J. - *Teoretyczne podstawy urabiania skał stożkowymi nożami obrotowymi*. Wyd. Politechniki Lubelskiej 1998.
40. Jonak J. – *Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi*. Wyd. Śląsk, Katowice 2001.
41. Jonak J. – *Wpływ geometrii ostrza narzędzia na wielkość sił tarcia i dynamikę skrawania*. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Katedry Maszyn Górniczych i Wiertniczych w X-lecie jej powstania, na temat : Modele tarcia i zużycia powierzchni kontaktowych materiałów kruchych i metali (materiały konferencyjne). Kazimierz Dolny n/Wisłą, 28.12 – 29.12 1995.
42. Jonak J. – *Wpływ wybranych parametrów noży urabiających na efekty urabiania skał*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo z. 218, Gliwice 1994.
43. Jonak J. - *Wykorzystanie Analizy Widmowej (Fouriera) do oceny przebiegu procesów skrawania skał*. Archiwum Górnictwa nr 1, 2000.
44. Jonak J., Podgórski J. - *Wybrane aspekty mechaniki skrawania skał*. Sympozjum „Zagadnienia mechaniki pękania i skrawania materiałów”. Red.: Z. Mróz, T. Sadowski. Kazimierz Dolny n. Wisłą, 22-24 października 1998. Wyd. LTN, Lublin, 1998.
45. Jonak J., Zubrzycki J. - *Numeryczne badania strefy skrawania skał*. VI konferencja naukowo – techniczna Kształtowanie Materiałów Nietalowych, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Zakopane, wrzesień 2001.
46. Jonak, J. Podgórski, J. Zubrzycki - *Wybrane zagadnienia mechaniki procesu skrawania materiałów*. Konferencja naukowo – techniczna Zagadnienia Mechaniki Pękania i Skrawania Materiałów, Kazimierz Dln. n/Wisłą 23-24.11.2001. Eksploatacja i Niezawodność nr 5(12)/2001, ISSN 1507-2711, kwartalnik PAN o/Lublin PN-TTE.
47. Katalog produktów firmy *Baildonit*.
48. Katalog produktów firmy *Boart*.
49. Katalog produktów firmy *Fasing*.
50. Klich A., Kotwica K., Krawczyk S., Ptak J. – *Zagadnienia zużycia ostrzy kombajnowych w zależności od temperatury i warunków skrawania skały*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa. Nr 9 (291), Katowice 1994.

51. Klich A., Krauze K. – *Stanowisko do badania oporów urabiania narzędziami skrawającymi*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 1, Katowice 1990.
52. Kozak J.N. – *Issledowanije niekatorych woprosow processa razrushenija podmoskowskogo ugla*. Sb. Gornoje Dielo. Nr 1, Moskwa, 1958.
53. Kozłów Ju. N., Kurbatow W. M., Kekelidze Z. Sz., Nacwliszwili W. Z. – *Wlijanie geometriczieskich paramietrow rezców tipa RKS na intensiwnost ich wraszczenijsa pri rezanji gornych porod*. Naucz. Soobszcz., IGD im. Skoczinskiego, wyp. 167, 1978.
54. Krauze K. – *Analiza metod wyznaczania oporów skrawania noży zamocowanych na organie ślimakowym kombajnu ścianowego*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 1, Katowice 1989.
55. Krauze K. – *Porównanie oporów urabiania wybranymi nożami kombajnowymi*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 2 (243), 1990.
56. Krauze K. – *Porównanie oporów urabiania wybranymi nożami kombajnowymi*. *Stanowisko do badania oporów urabiania narzędziami skrawającymi*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 2, Katowice 1990.
57. Krauze K., Ptak J. – *Zastosowanie noży strugowych nowej konstrukcji do struga firmy Halbach – Braun*. V konferencja pt. „Problemy urabiania i przeróbki skał”, Kielce, październik 1988.
58. Kuhnert G. – *Stand und Perspektive der Gewinnungs- und Vortriebsmaschinen im Hartgestein*. Neue Bergbautechnik 4 (1974) 8, s. 596 – 602.
59. Kyungwon Lee : *Untersuchungen zum Bruchspannungszustand elastischspröder und poröspröder Materialien bei keilförmigen Meißelbelastungen*. Dissertation Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen 1980.
60. Lebrun M. – *Etude theorique et experimentale de l'Abatage mecanique. Application a la conception de machines d'abattage et de creusement*. Praca doktorska, Paryż 1978.
61. Leitner R. – *Zarys matematyki wyższej cz. III*, WNT Warszawa, 1998.
62. Niestierow W. I. - *Kaczestwiennaja ocenka formy pieredniej grani raboczego instrumenta*. Izw. Gornyj Żurnał nr 1, s. 63-65, 1985.
63. O'Dogherty M.J. – *A laboratory examination of the effect of rake angle and back clearance angle*. MRE Report Nr 2217, 1962.
64. Opolski T – *Przyczynek do teorii wiercenia obrotowego*. Przegląd Górniczy nr 11, 1957.
65. Opolski T, Bąkiewicz S. – *Badanie laboratoryjne przebiegu skrawania skał*. Prace ITiEM PL, Mechanika B-3 1980.
66. Opolski T. – *Urabianie calizny węglowej narzędziami skrawającymi*. Katowice, Wyd. Śląsk, 1965.
67. Opolski T. – *Urabianie mechaniczne i fizykalne skał*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1982.

68. Opolski T. Rynik J. – *Maszyny do urabiania i ładowania w kopalniach podziemnych*
t.1 Wyd. Ucz. PL 1979.
69. Osburn H.J. – *Wear of rock cutting tools*. Powder Metal 12. 471 – 502, 1969.
70. Paszkowski Z. – *Wpływ wybranych parametrów ruchowych na trwałość noży obrotowych stosowanych w kombajnach głowicowych*. Prace Naukowe Pol. Lubelskiej, seria Górnictwo 25, Wyd. Ucz. Pol. Lub., 1989.
71. Pechalt F. – *La rabotage*. Document interieur CERCHAR no 1735, Mai 1967.
72. Plis M.N., Winquist C.F., Roepke W.W. – *Preliminary Evaluation of the Relationship of bit Wear to Cutting Distance, Force and Dust Using Selected Commercial and Experimental Coal- and Rock – Cutting Tools*. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 9193.
73. Pomeroy C.D. – *Breakage of coal by Wedge Action Factors Affecting*. Tool Design 2. Colliery Guardian. July 1964.
74. Pomeroy C.D. *The breakage of coal by wedge action. Factors influencing breakage by any given shape of tool*. Colliery Guardian. Nov. 21,28, 1963, pp. 29-37.
75. Pozin E.Z. – *Soprotiwlaajemost uglij razruszeniu rezhushchymi instrumentami*. Moskwa, „Nauka” 1972.
76. *Program pomiarowy MULT*, instrukcja obsługi, Ambex sp. z o.o. 1994.
77. Roliński Z. - *Tensometria oporowa*. WNT, W-wa 1980.
78. Rother E. – *Eine Möglichkeiten zur Spankraftberechnung unter berücksichtigung der Meißelgeometrie*. Brgbau 12/83, s. 561 – 566.
79. Roxborough F.F. – *Breaking coal and rock*. Australasian Coal Mining Practice (chapter 9).
80. Roxborough F.F. – *Cutting rock with picks*. Mining Engineer 132, pp. 445 – 455, 1973.
81. Roxborough F.F. – *Mechanical excavation. Selected papers relating to research in the field of mine mechanization*. The University of South Wales. 1994.
82. Roxborough F.F. - *The influence of pick shape and some operational factors on the performance of hard rock mining machines*. Document de l'Universite de New South Wales
83. Roxborough F.F., Pedroncelli E.J. – *A practical evaluation of some coal – cutting theories using a continous miner*. The Mining Engineer, Sept. 1982.
84. Roxborough F.F. Philips H.R. – *Rock excavation by disc cutter*. International Journal of Rock Mechanics. Vol. 12, 1975.
85. Sakaloglou E. - *Theoretische und experimentale Untersuchungen zum Trennwidrestand und Spanbildung sprodelastische Materialien bei Belastung durch Keilmeissel unter besonderer Berucksichtigung der Meisegeometrie*. Diss. TH Aachen, 1984.
86. Sikora W. – *Zależność siły skrawania od prędkości skrawania i innych parametrów technicznych*. Mechanizacja Górnictwa, nr 25, 1965.

87. Staroń T., Paszkowski Z., Jonak J. – *Porównanie oporów skrawania noży klinowych z nożami stożkowymi dla wybranych skał*. Prace badawcze CMG – KOMAG Gliwice, Politechnika Lubelska 1986.
88. Styburski W. - *Przetworniki tensometryczne, konstrukcja, projektowanie, użytkowanie*. WNT, W-wa 1971.
89. Tadeusiewicz R. – *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
90. Valantin A. – *Machine a attaque ponctuelle. Etude de la destruction de la roche, travail des pics*. Revue de l'Industrie Minerale – Mine, Mai 1972.
91. Vergeron M. de – *La probleme des pics engins d'abattage*. Rev. d'Ind. Min. Nr 1, 1962.
92. Wilhelm H. – *Untersuchung zu Temperaturen Energieumsätzen bei schneidender Gesteinszerstörung mit Teilschnitt – Vortriebsmaschinen*. Dissertation, TU Clausthal, 1992.
93. Wilhelm I. – *Einflussgrossen auf das spannen Salzen mit Flach- und Rundschäftmeisseln*. Diss. Univ. Hannover 1981.
94. Young P., Gailer G. H. – *Technik und Betrieb. Entwicklung von Teilschnitt – Vortriebsmaschinen zur Gewinnung mittelharter Eisenerze*. Glückauf 111 (1975), nr 9.
95. Żakowski W., Leksiński W. – *Matematyka. Seria „eit”*, WNT Warszawa, 1995.
96. Zawada J. – *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*. Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich Politechniki Warszawskiej. Wyd. i Zakł. Poligrafii Inst. Technologii Eksploatacji w Radomiu. 1998.
97. Zniszczyński A. – *Wpływ geometrii narzędzi ostrokrawędziowych na urabianie skał i skład ziarnowy urobku*. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
98. Zubrzycki J., Jonak J. - *Analiza możliwości badania obciążenia noży płaskich z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*. IV konferencja naukowo – techniczna „Technologiczne systemy informacyjne w inżynierii produkcji i kształceniu technicznym” Kazimierz Dln. n\Wisła, 21-22.06.2001.
99. Zubrzycki J., Jonak J. - *Analiza numeryczna oddziaływania na skałę ostrza o klinowo ukształtowanej powierzchni natarcia*. I Międzynarodowa Konferencja TECHNIKI URABIANIA 2001, Kraków - Krynica, 18 – 21.09.2001.
100. Zubrzycki J., Jonak J. - *Wybrane aspekty skrawania skał*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2001 nr 2(362), s. 9-11, Czasopismo naukowo – techniczne, wyd. Centrum Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa „EMAG” Katowice.
101. Żurada J. - *Introduction to Artificial Neural Systems*. West Publishing Company, USA 1992.
102. Żurada J. Barski M. Jędruch W.- *Sztuczne sieci neuronowe*. PWN Warszawa 1996.