

Aktualne trendy w modelowaniu i aplikacji narzędzi dyskowych asymetrycznych w konstrukcjach maszyn urabiających

Data wpłynięcia do Redakcji: 06/2025
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 07/2025

2025, volume 14, issue 1, pp. 58-72

Grzegorz Stopka
AGH w Krakowie, Poland



Streszczenie: Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju metod mechanicznego urabiania skał zwięzłych jest możliwość wykorzystania narzędzi dyskowych asymetrycznych w nowych konstrukcjach maszyn górniczych. Głównym celem prac projektowych jest pogodzenie zalet zastosowania mobilnych maszyn urabiających, jakimi są kombajny chodnikowe z możliwością aplikacji narzędzi dyskowych asymetrycznych. W artykule opisano podstawowe techniki urabiania narzędziami dyskowymi oraz zaprezentowano różne rozwiązania konstrukcyjne maszyn urabiających wykorzystujące dyski asymetryczne. Zaprezentowano przykłady konstrukcji maszyn realizujących urabianie techniką tylnego podcinania, czy też przy zastosowaniu metody ODC. Oprócz konstrukcji, które są wykorzystywane w przemyśle opisano także rozwiązania koncepcyjne takie, jak głowica dyskowa nowej generacji o złożonej trajektorii urabiania. Ważnym aspektem rozwoju technik urabiania dyskami asymetrycznymi jest modelowanie ich obciążeń. W tym zakresie jedną z bardziej obiecujących metod obliczeniowych jest metoda DEM. W artykule opisano podstawowe problemy wynikające z zastosowania tejże metody, a także zaprezentowano przykładowe wyniki badań symulacyjnych procesu urabiania dyskami asymetrycznymi.

Słowa kluczowe: narzędzia dyskowe, metoda tylne podcinanie, Metod elementów dyskretnych, kombajn chodnikowy

WPROWADZENIE

Obecnie drążenie wyrobisk chodnikowych i tuneli oraz pozyskiwanie surowców mineralnych często odbywa się w coraz to trudniejszych warunkach. Wynika to ze znacznej głębokości złóż i trudniejszych warunków geologicznych. Niejednokrotnie urabiana calizna skalna charakteryzuje się wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie przekraczającą 200 MPa

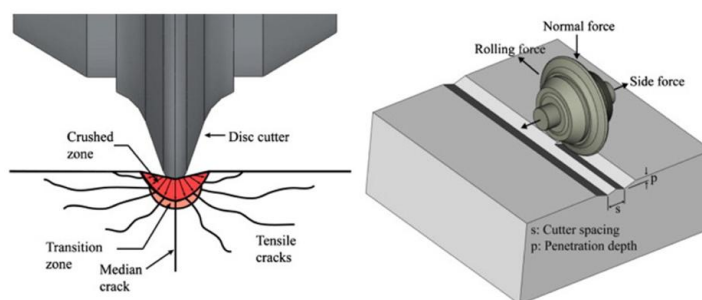
i w wielu przypadkach może zawierać wtrącenia minerałów ściernych. Takie warunki naturalnie mogą stanowić barierę techniczną dla zastosowanie niektórych metod urabiania i mają znaczący wpływ na ekonomiczną efektywność wydobywania. Stąd też jednym z głównych zadań przy doborze kompleksów maszyn urabiających jest wybór odpowiedniej metody urabiania skał, zapewniającej trwałość narzędzi górniczych i niskie zużycie energii w procesie wydobywczym (Kotwica i in., 2019, 2021).

W kompleksach mechanicznych wykorzystywanych do drążenia chodników i tuneli oraz wydobywania surowców mineralnych stosuje się najczęstsze metody mechanicznego urabiania skał poprzez ich skrawanie (frezowanie). Narzędzia skrawające, takie jak noże promieniowe i stycznie – obrotowe, są montowane głównie na głowicach urabiających kombajnów. Urabianie skał o bardzo niekorzystnych parametrach przy użyciu narzędzi skrawających stanowi jednak problem dla przemysłu górniczego. Wysoka wytrzymałość skał na jednoosiowe ścisnienie oraz dodatkowo jednorodna ich struktura wraz z wysoką zawartością minerałów abrazyjnych może generować szereg niedogodności takich jak zwiększone zużycie narzędzi urabiających, duże zapylenie oraz iskrzenie.

W celu wyeliminowania lub zmniejszenia tych zagrożeń w górnictwie stosuje się inne niekonwencjonalne, mechaniczne metody urabiania przy użyciu narzędzi dyskowych (Klich, 1998, Gospodarczyk i in., 2016). Aktualnie do drążenia wyrobisk tunelowych wykorzystywane są kombajny typu TBM (Tunnel Boring Machine), których organu uzbrojone są w narzędzi dyskowe symetryczne. Jednak i ta technika ma swoje ograniczenia. Zasadnicze wady kombajnów typu TBM wynikają z ich dużych gabarytów i masy, co ogranicza ich zastosowanie. Dodatkowo, wysokie koszty zakupu i eksploatacji oraz konieczność zapewnienia odpowiednich warunków geologicznych dla ich efektywnej pracy to kolejne istotne ograniczenia. W związku z powyższym stale prowadzone są prace nad przeniesieniem zalet narzędzi dyskowych na maszyny mobilne o mniejszych gabarytach i masach (Stopka, 2020). Aktualnie jednym z bardziej perspektywicznych kierunków rozwoju metod mechanicznego urabiania skał są metody oparte na wykorzystaniu narzędzi dyskowych asymetrycznych.

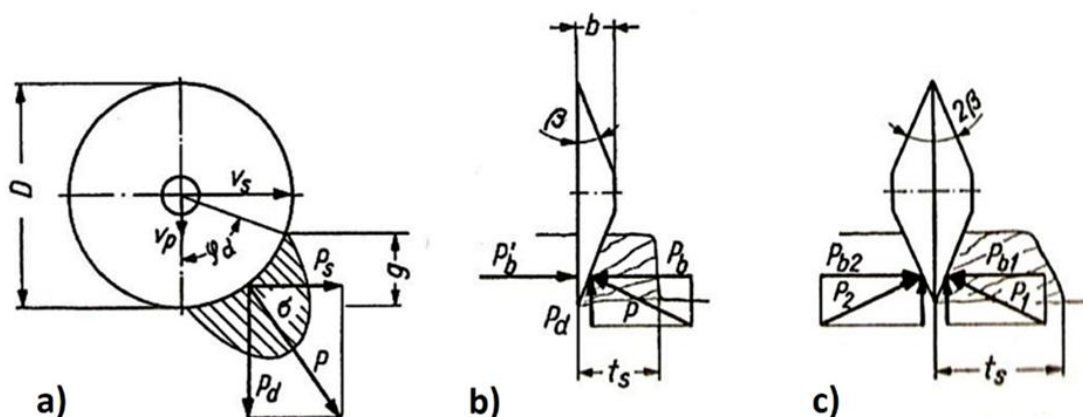
TECHNIKI URABIANIA NARZĘDZIAMI DYSKOWYMI

Do drążenia wyrobisk tunelowych (chodnikowych) w trudnych warunkach, wykorzystuje się obecnie symetryczne lub asymetryczne narzędzia dyskowe. Technikę urabiania skał opartą na statycznym kruszeniu przy użyciu symetrycznych i asymetrycznych narzędzi dyskowych pokazano na rys. 1 i 2. W tej metodzie krawędź dysku, o przekroju poprzecznym w kształcie litery V, symetrycznym lub asymetrycznym w płaszczyźnie prostopadłej do jego krawędzi, jest wciskana w skałę siłą nacisku P_d prostopadłą do jego powierzchni (Kotwica i in., 2021).



Rys. 1 Urabianie skał dyskami symetrycznymi przez statyczny docisk

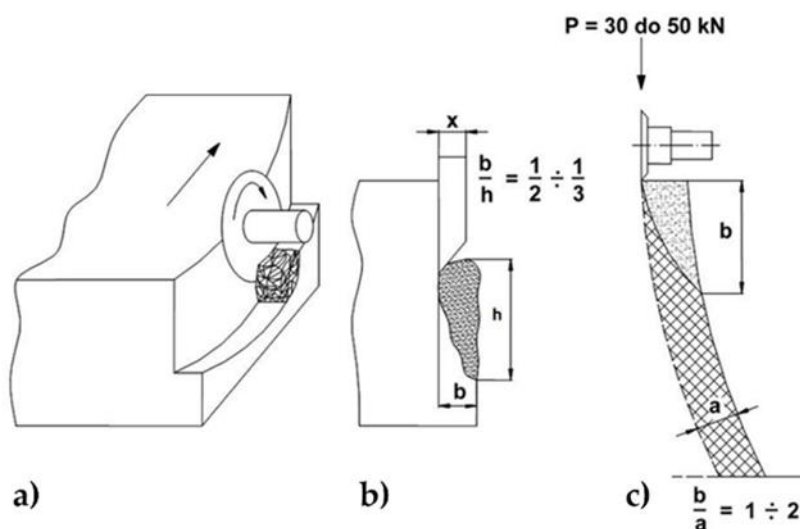
W wyniku działania tej siły wytrzymałość skały na ściskanie zostaje lokalnie przekroczona, a dysk wbija się w nią na głębokość g . Ponadto do uchwytu tarczy przyłożona jest siła styczna P_s , powodująca ruch narzędzia wzdłuż powierzchni skały. Ze względu na siły styczne P_s i ciśnienie P_d tarcza poddaje skałę naciskowi pochodzącemu z wypadkowej siły P wraz z obwodem odpowiadającym kątowi φ_d (rys. 2). Dysk jest zamontowany w obrotowym uchwycie, co umożliwia jego obrót wokół własnej osi. Podstawową zaletą tej metody jest to, że radykalnie zmniejsza rolę sił tarcia poprzez wykorzystanie ruchu obrotowego narzędzia. Ponadto, dzięki ruchowi obrotowemu, każdy fragment obwodu dysku pozostaje w kontakcie ze skałą przez krótki okres, podczas którego wykonuje pracę wymaganą do osiągnięcia docelowej głębokości wcięcia. Powoduje to mniejsze straty energii i lepsze warunki odprowadzania ciepła na krawędzi dysku, co zmniejsza skutki uboczne urabiania, takie jak iskrzenie spowodowane lokalnym wzrostem temperatury lub generowanie pyłu, a także wydłuża żywotność narzędzia. Metodę tę można stosować do urabiania skał o wytrzymałości na ściskanie powyżej 200 MPa. Średnica symetrycznego narzędzia tarczowego może sięgać do 500 mm, a jego żywotność pozwala na generowanie do kilku kilometrów chodników lub tuneli bez widocznego zużycia. Wadą urabiania metodą statycznego kruszenia jest zapewnienie dużej siły nacisku wywieranej przez narzędzie. Wartość siły nacisku na jedno narzędzie dyskowe symetryczne może wynosić nawet 300 kN. Dla całej głowicy urabiającej może ona generować całkowitą wartość siły nacisku do 25 000 kN. Wymusza to ogromne wymiary (do 450 m długości), ciężar (do 3500 Mg) i koszt maszyny zwanej TBM. Dlatego taka technologia jest opłacalna tylko przy długich wykopach, na przestrzeni kilku kilometrów (Krauze i in., 2009, Kotwica i in., 2021).



Rys. 2 Zasada pracy pojedynczego dysku: a – rozkład nacisków w strefie kontaktu dla narzędzia dyskowego, b-dysk niesymetryczny, c-dysk symetryczny

Zalety zastosowania narzędzi dyskowych postanowiono przenieść na maszyny mobilne o mniejszych gabarytach i masach. W ten sposób powstałe niekonwencjonalne techniki urabiania oparte o narzędzia dyskowe niesymetryczne. Jedną z podstawowych technik urabiania z udziałem narzędzi

dyskowych niesymetrycznych jest technika tylnego podcinania. Urabianie przez podcinanie lub nacinanie narzędziem dyskowym wykorzystuje zazwyczaj dla skał znacznie mniejsze opory na rozciąganie niż jednoosiowe ścisnienie. Zasada techniki nacinania wstecznego polega na urabianiu skały poprzez odcinanie jej w kierunku wolnej przestrzeni. Na rys. 3 przedstawiono schemat urabiania metodą tylnego podcinania.



Rys. 3 Zasada urabiania skał techniką tylnego podcinania za pomocą dysków asymetrycznych

Zastosowanie w ten sposób narzędzi dyskowych asymetrycznych obniża zużycie energii i siłę nacisku, co pozwala na budowę maszyny urabiającej o odpowiednio niższych parametrach masowych i energetycznych, niż w przypadku klasycznych maszyn TBM (Ramezanzadeh i in., 2010, Kotwica i in., 2021).

NOWE KIERUNKI ROZWOJU KONSTRUKCJI MASZYN URABIAJĄCYCH Z WYKORZYSTANIEM NARZĘDZI DYSKOWYCH ASYMETRYCZNYCH

Wykorzystanie zalet wynikających ze stosowania narzędzi dyskowych oraz potrzeba redukcji masy i gabarytów maszyn urabiających skały zwięzłe i bardzo zwięzłe stale inicjują prace nad konstrukcją nowych konstrukcji maszyn. Naturalnie pierwsze próby przemysłowej aplikacji dysków asymetrycznych obejmowały układy o prostej kinematyce urabiania (np. organy urabiające kombajnów ścianowych). Jednak nowe kierunki rozwoju maszyn urabiających wykorzystujących dyski asymetryczne są związane z rozwojem techniki tylnego podcinania w różnych, złożonych kinematycznie układach urabiania maszyn górniczych.

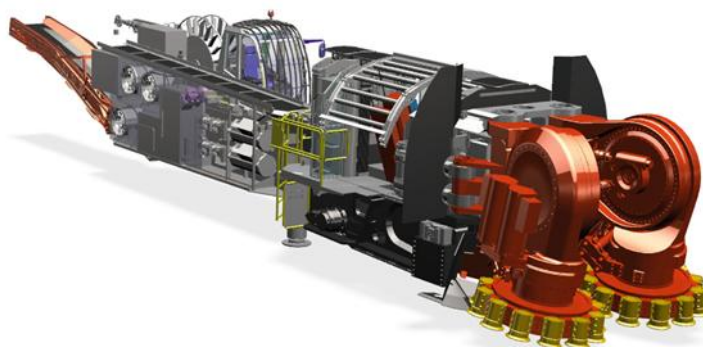
Jedną z pierwszych prób przemysłowej aplikacji dysków asymetrycznych w ramach techniki tylnego podcinania jest maszyna opracowana przez firmę Wirth (Erkelenz, Niemcy). Maszynę wyposażoną w cztery niezależnie sterowane ramiona z niesymetrycznymi narzędziami tarczowymi o średnicy 450 mm zastosowano do wiercenia wyrobisk o wymiarach 4 m x 4 m w stosunkowo

twardych skałach urabialnych. Zastosowana w prezentowanej maszynie metoda tylnego podcinania wykazała pełną użyteczność proponowanego rozwiązania. Uzyskano bardzo dużą granulację ziaren wyjściowych (nawet ponad 200 mm), przy jednostkowej wydajności urabiania 3 m³/h na tarczę. Na rys.4 pokazano natomiast widok maszyny przemysłowej. Głowica urabiająca kombajnu CMM miała postać trzech ramion wyposażonych w dyski niesymetryczne o średnicy 560 mm i dysponowała masą około 150 t (Ramezanzadeh i in., 2010). Ramiona mocowane były przegubowo do tarczy napędowej oraz siłowników, które pozwalały na ich wychylanie. Rezultatem złożenia ruchu obrotowego tarczy oraz wychylania ramion była spiralna trajektoria ruchu narzędzi dyskowych oraz możliwość atakowania calizny z obwodu wyrobiska do osi. Testy badawcze urabiania kombajnem CMM przeprowadzono na piaskowcu o wytrzymałości na ściskanie przekraczającej 150 MPa.



Rys. 4 Kombajn CMM firmy Wirth

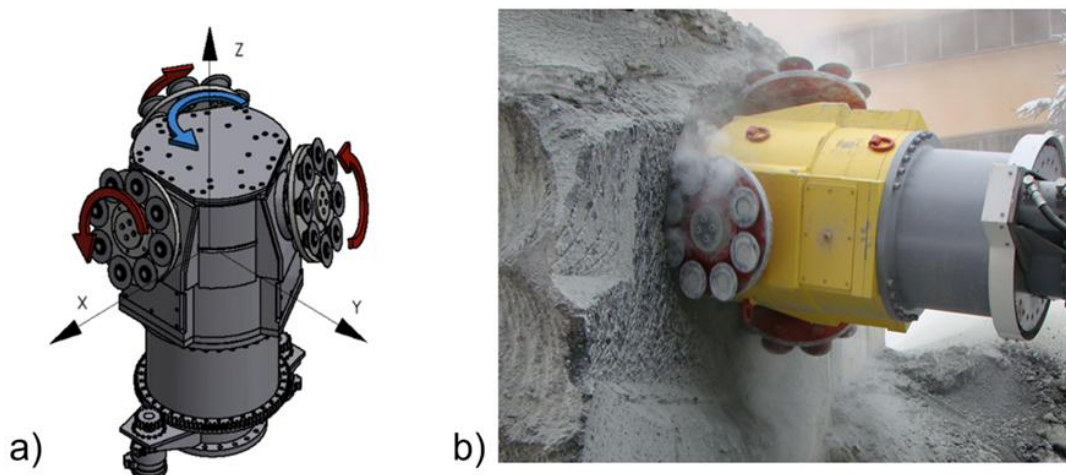
Kolejny etap rozwoju techniki tylnego podcinania można zaobserwować na przykładzie konstrukcji kombajnu typu MX650 firmy Sandvic (rys.5). W przypadku tej maszyny organ roboczy ma postać dwóch tarcz wyposażonych w dyski niesymetryczne. Tarcze dyskowe zamocowane są na ramionach, które mają możliwość wykonywania ruchów roboczych w dwóch płaszczyznach.



Rys. 5 Kombajn MX650 firmy Sandvic

W 2017 roku kombajn MX650 został przetestowany w kopalni wolframu w Austrii (Wolfram Bergbau i Hütten AG w Mittersill) w ramach projektu Rock Vader finansowanego przez EIT RawMaterials. Kombajn został zaprojektowany do urabiania skał o wytrzymałości do 250 MPa, z możliwością urabiania chodnika o wymiarach 5 m x 5 m. W przypadku skał o takim przekroju poprzecznym i o wytrzymałości około 150 MPa, kombajn MX650 osiąga postęp 20 m na dobę (Bołoz i in., 2020).

Odmienne podejście do problemu aplikacji narzędzi dyskowych asymetrycznych prezentuje prototyp głowicy dyskowej opracowanej w AGH w Krakowie. W tym przypadku postawiono sobie za cel opracowanie takiej głowicy urabiającej uzbrojonej w dyski asymetryczne, która będzie możliwa do zastosowania w konstrukcji kombajnów chodnikowych (Gospodarczyk i in., 2016, Stopka i in., 2023). Efektem powyższego było opracowanie koncepcji a później prototypu głowicy dyskowej o złożonej trajektorii ruchu. Istotą rozwiązania, które pokazano na rys. 6 jest uzyskanie złożonego toru ruchu dysku asymetrycznego w wyniku ruchu obrotowego tarcz dyskowych i niezależnego ruchu obrotowego korpusu głowicy. Do tej pory wykonano kilka serii badań poligonowych głowicy w różnej konfiguracji kinematycznej jak i narzędziowej.



Rys. 6 Głowica dyskowa nowego typu podczas testów poligonowych: a) możliwości kinematyczne głowicy, b) widok prototypu głowicy podczas testów poligonowych

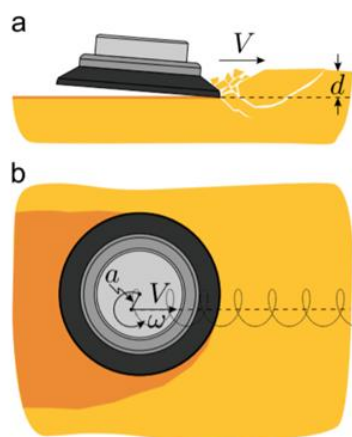
Badania poligonowe głowicy wykazały poprawną kinematykę procesu urabiania. We wnioskach z badań podkreślono, że kombajn chodnikowy z głowicą urabiającą z narzędziami dyskowymi potrzebował jedynie około 60% mocy w porównaniu z konwencjonalną głowicą urabiającą. W ramach badań sprawdzono następujący zakres parametrów kinematycznych głowicy urabiającej:

- Prędkość obrotowa korpusu głowicy talerzowej w zakresie 20 ÷ 30 obr/min
- Prędkość obrotowa talerzy talerzowych w zakresie 60 ÷ 200 obr/min
- Głębokość urabiania (zawrębiecie głowicy) w zakresie 10 ÷ 50 mm

Badania przeprowadzono z użyciem narzędzi dyskowych o średnicy 160 mm. Wstępne badania przemysłowe potwierdziły, że łączna moc napędów głowicy nie

przekroczyła wartości 78,5 kW. Stwierdzono również, że najkorzystniejsze, ze względu na dynamikę procesu urabiania, jest zastosowanie prędkości obrotowej korpusu głowicy równej 20 obr/min i prędkości obrotowej tarcz dyskowych równej 60 obr/min. Istotny jest również kierunek obrotu korpusu i talerzy. Najkorzystniejszymi warunkami pracy głowicy urabiającej jest stosunkowo niewielka głębokość skrawania. Badania przemysłowe wykazały, że głębokość skrawania powinna być mniejsza niż 20 mm. Niska wartość głębokości skrawania umożliwia osiągnięcie wyższej prędkości posuwu, co wpływa na wydajność urabiania.

Kolejnym interesującym kierunkiem rozwoju maszyn urabiających opartych na wykorzystaniu dysków asymetrycznych jest technika ODC (Oscillating disc cutter). Zasadniczo sam mechanizm niszczenia spójności skał jest podobny to techniki tylnego podcinania, a zatem dysk atakuje skałę pod pewnym kątem, przy czym narzędzie dodatkowo jest wprowadzane w mimośrodkowy ruch oscylacyjny (rys. 7). Opisywana metoda prowadzi do redukcji sił urabiania, zwiększenia wydajności urabiania w relacji do alternatywnych technik urabiania mechanicznego zwłaszcza w warunkach urabiania skał twardych o dużej abrazyjności (Hood i in., 2000, Ghamgosar i in., 2015).



Rys. 7 Idea urabiania skał techniką ODC (Oscillating Disc Cutter)

Na proces skrawania wpływa wiele parametrów, takich jak częstotliwość i amplituda oscylatora, głębokość skrawania, prędkość ruchu narzędzia dyskowego, mimośrodowość oraz właściwości ośrodka skalnego. Ta złożoność wpływu różnych parametrów procesu urabiania techniką ODC utrudnia opracowanie empirycznych, analitycznych lub numerycznych modeli obliczeniowych dla opisywanej metody. Aktualnie jedną z najbardziej zaawansowanych konstrukcji maszyn urabiających w oparciu o opisaną wyżej technikę urabiania jest konstrukcja firmy Komatsu. Nazwa handlowa technologii opracowywanej przez firmę Komatsu to Dynacut. Maszyna pokazana na rys.8 wykorzystuje metodę dynamicznego podcinania za pomocą dysku asymetrycznego, które wykonując ruch oscylacyjny.



Rys. 8 Kombajn MC51 firmy Komatsu

W podstawie informacji publikowanych przez producenta maszyny, technologia Dynacut umożliwia wykonywanie profili tunelowych o wymiarach 5 m x 5 m z dokładnością 50 mm w skała o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dochodzącej aż do 250 MPa.

NUMERYCZNE MODELOWANIA OBCIĄŻEŃ NARZĘDZI DYSKOWYCH ASYMETRYCZNYCH

Analityczne podejście do modelowania narzędzi dyskowych jest mocno uproszczone i zasadniczo dotyczy narzędzi dyskowych symetrycznych realizujących proces statycznego oddziaływania na caliznę skalną. Dominującą grupą modeli urabiania dyskowego jest model opisujący obciążenie symetrycznych narzędzi dyskowych. Cechą tych modeli jest założenie proporcjonalności sił generowanych na ostrzu dysku podczas pracy do wielkości pola powierzchni odcisku. Przykładem modelu reprezentującego większą grupę modeli analitycznych, jest opis zaproponowany przez Roxborough i Philipsa w 1975 roku:

$$P_d = 4 \cdot 10^{-3} \cdot R_c \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sqrt{D \cdot h^3 - h^4} \quad (1)$$

gdzie:

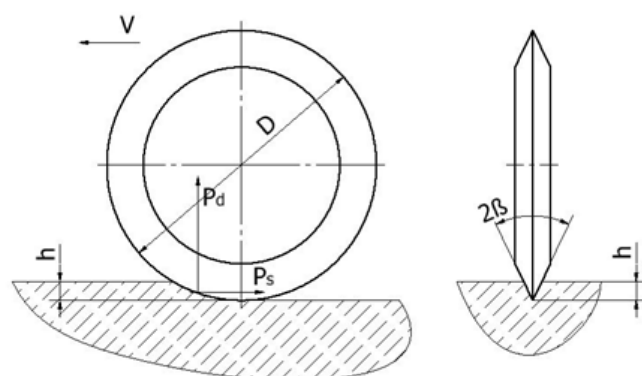
R_c – wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie

h – głębokość zagłębienia dysku

D, β – parametry geometryczne narzędzia

Opisane powyżej założenie charakteryzujące modele urabiania symetrycznego dyskowego jest racjonalnym przybliżeniem procesu urabiania symetrycznego dyskowego w przypadku prostej kinematyki urabiania (urabianie z naciskiem statycznym). Odmienne sytuacja ma miejsce w przypadku techniki podcinania, gdzie dysk porusza się po złożonym torze, a dysk asymetryczny podczas zagłębienia się w caliznę skalną i w momencie fragmentacji skały generuje zmienne siły boczne. W takim przypadku oszacowanie obciążeń poszczególnych narzędzi dyskowych jest bardzo utrudnione i najczęściej sprowadza się do

podejścia empirycznego, przyjmując uproszczoną kinematykę urabiania (Stopka, 2021).

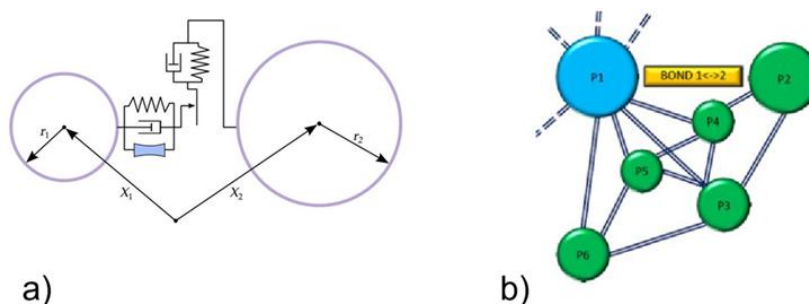


Rys. 9 Uproszczony schemat obciążenia narzędzia dyskowego podczas urabiania calizny skalnej

Brak metod analitycznych dla analizy procesu urabiania dyskami asymetrycznymi jest powodem, dla którego do analizy tego typu problemów zaczęto stosować metody symulacyjne przede wszystkim z wykorzystaniem techniki DEM. Dotyczy to zarówno zagadnień związanych z techniką urabiania dyskami asymetrycznymi przez tzw. tylne podcinanie, jaki i w przypadku techniki ODC. Metoda elementów dyskretnych (DEM) to metoda numeryczna umożliwiająca symulację zachowania systemu złożonego z zespołu dyskretnych cząstek kulistych. W metodzie tej elementarne cząstki traktowane są jako osobne, sztywne ciała o określonym kształcie (najczęściej kuliste). Oddziaływania między cząstkami są obliczane lokalnie – kiedy dwie cząstki się zbliżają i wchodzą w kontakt, obliczane są siły kontaktowe. Oddziaływanie między cząstkami ma postać jednego w wielu modelach kontaktowych opartych ogólnie rzecz ujmując na parametrach sztywności i tłumienia na kierunku normalnym i stycznym zgodnie z poglądowym modelem fizycznym zaprezentowanym na rys. 10a. W sytuacji modelowania za pomocą techniki DEM ciał stałych (np. skał) cząstki mogą zostać połączone wiązaniami o charakterystyce wytrzymałościowej podobnej do elementów belkowych (rys. 10b). Wiązania te są generowane w ściśle określonym otoczeniu każdej z kul (sferach), co prowadzi do powstania sieci połączeń przypominającą budowę atomową materiału. Odpowiednio zdefiniowane parametry wytrzymałościowe połączeń (w tym kryteria zniszczenia) umożliwiają finalnie osiągnięcie efektu fragmentacji materiału (zniszczenia), w sposób niezwykle zbliżony do rzeczywistego przebiegu procesu pęknięcia, szczególnie ośrodków sprężysto-kruchych.

W ciągu ostatniej dekady wielu badaczy przeprowadziło symulacje numeryczne urabiania skał z wykorzystaniem metod FEM i DEM. Największa grupa badawcza skupiła się na symulacji cięcia skał za pomocą noży styczno - obrotowych (Gajewski i in., 2008, Zhang i in., 2020), czy narzędzi dyskowych symetrycznych (Xia i in., 2017, Xu C i in., 2022). Jak wykazano natomiast m.in. w pracach (Stopka

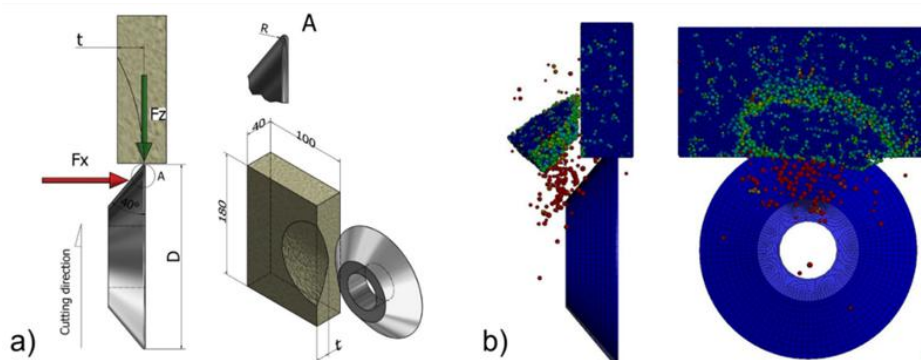
2021, Stopka i in., 2023), technika DEM może zostać z powodzeniem wykorzystana również do analizy procesu urabiania dyskami niesymetrycznymi w różnych wariantach kinematycznych.



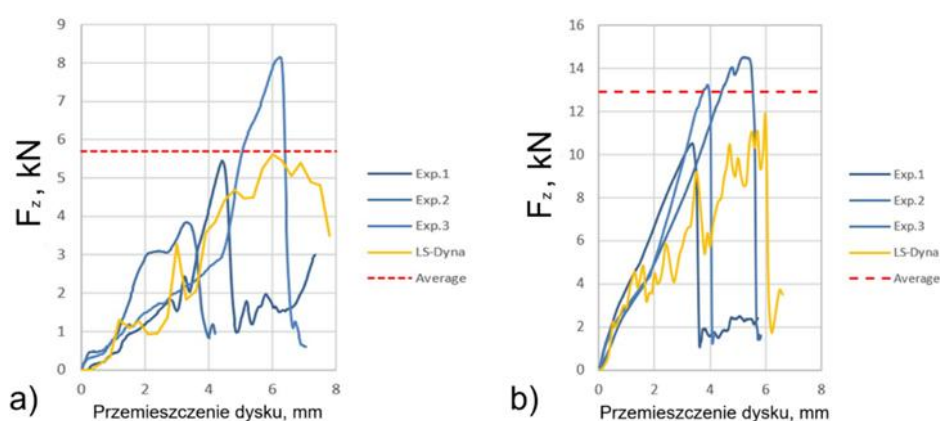
Rys. 10 Modele oddziaływania cząstek DEM:
a – materiał sypki, b – ciało stałe (ośrodek skalny)

W przypadku zastosowania techniki DEM w analizie procesu urabiania dyskowymi asymetrycznymi konieczne jest wieloetapowa walidacja modeli DEM, co wynika z faktu dużej wrażliwości tychże modeli na zmianę parametrów geometrycznych cząstek DEM, jak i właściwości wytrzymałościowych wiązań pomiędzy cząstkami. Istotny wpływ na finalne rezultaty symulacji ma także geometria narzędzia urabiającego oraz kinematyka procesu urabiania. Pierwszym etapem doboru parametrów modelu DEM jest przeprowadzenie testów wytrzymałościowych próbek skalnych na podobieństwo testów jednoosiowego ściskania oraz jednoosiowego rozciągania (test Brazylijski). W czasie tych testów weryfikacji podlega wielkość (średnica) cząstek DEM oraz parametry wytrzymałościowe wiązań i wielkość strefy generowania wiązań. Uzyskanie zbieżności badań symulacyjnych z odpowiednimi testami laboratoryjnymi w ramach co najmniej dwóch testów wytrzymałościowych pozwala zrealizować kolejny krok weryfikacji modelu jakim jest test urabiania narzędziem (dyskiem) w warunkach prostej kinematyki urabiania. Ten etap modelowania jest niezwykle istotny, gdyż umożliwia sprawdzenie modelu DEM w warunkach interakcji narzędzie – skała. W przypadku dysków asymetrycznych wygodnym testem do tego typu weryfikacji jest test wciskania dysku w próbkę skalną. Wyniki analiz symulacyjnych dla takiego przypadku przykładowo pokazano na rys. 11 i 12. Na rys. 11a pokazano schematycznie warunki brzegowe dla symulacyjnych testów wciskania narzędzi dyskowych asymetrycznych o średnicy 150 i 160 mm. Materiałem urabianym był piaskowiec o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynoszącej 78,8 MPa. Celem badań modelowych była identyfikacja maksymalnych sił niszczących, a zwłaszcza siły docisku (F_z) w funkcji przemieszczenia narzędzia dyskowego. Efektem badań symulacyjnych z wykorzystaniem metody DEM było zniszczenie próbki skalnej, którego przykładową postać pokazano na rys. 11b. Przykładowe przebiegi sił wciskania w funkcji przemieszczenia narzędzia dyskowego zaprezentowano na rys. 12. Na wykresach linią czerwoną zaznaczono wartość uśrednioną siły F_z uzyskaną na

podstawie testów laboratoryjnych, natomiast krzywa koloru żółtego obrazuje przebieg siły wciskania na podstawie symulacji DEM.



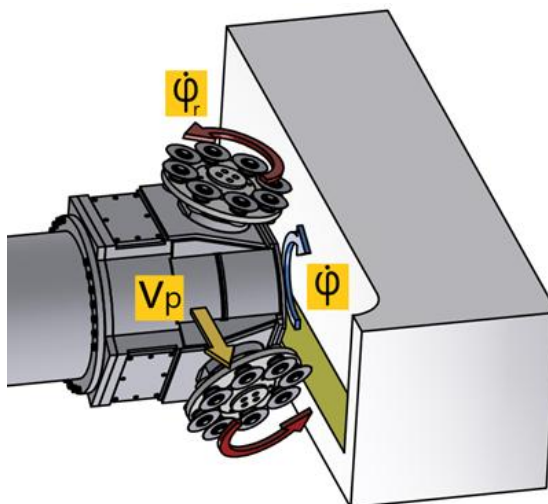
Rys. 11 Symulacja DEM wciskania dysku asymetrycznego w blok skalny:
a - warunki brzegowe testu, b - postać zniszczenia próbki skalnej



Rys. 12 Wyniki testów laboratoryjnych i symulacyjnych urabiania pojedynczym dyskiem asymetrycznym: a - dysk D=150 mm, t = 15 mm, b - dysk D=160 mm, t = 15 mm

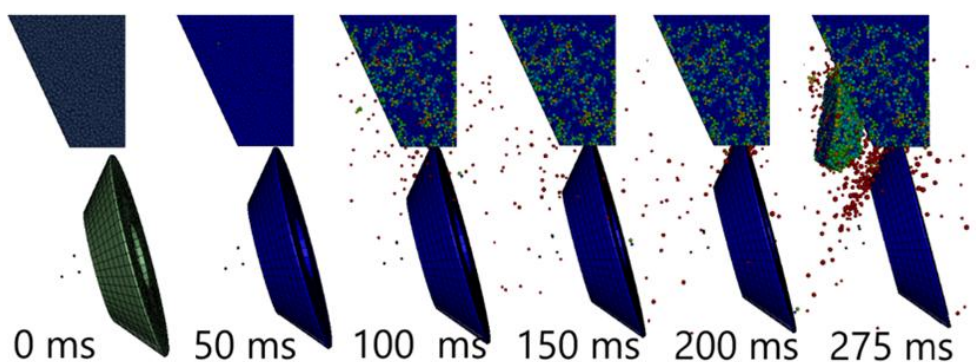
Modelowania za pomocą techniki DEM daje finalnie możliwość adekwatnego prognozowania obciążeń narzędzi dyskowych asymetrycznych w warunkach złożonej trajektorii urabiania, a zatem przy założeniu realizacji procesu urabiania przez organy urabiające o ściśle określonej kinematyce. Przykładem tego typu badań z udziałem metody DEM były testy realizowane w Katedrze Inżynierii Maszyn i Transportu AGH w Krakowie, których celem była ocena obciążeń głowicy dyskowej nowej generacji uzbrojonej w dyski asymetryczne. Głowica dyskowa zaprezentowana na rys.13 jest konstrukcją dedykowaną do zastosowania w organach urabiających kombajnów chodnikowych. Idea urabiania głowicą dyskową jest nadanie narzędziom dyskowym złożonej trajektorii tak, aby urabianie skały głowicą realizowane było na podobieństwo techniki tylnego podcinania, a więc poprzez odłupywanie i wyłamywanie fragmentów calizny. Złożona kinematyka urabiania wynika w tym wypadku ze skojarzenia ruchu obrotowego korpusu głowicy, ruchu obrotowego tarcz dyskowych oraz posuwu realizowanego za pomocą ramienia kombajnu chodnikowego.

Badania symulacyjne urabiania głowicą dyskową naturalnie poprzedził opisany wyżej dwuetapowy proces kalibracji modelu DEM.

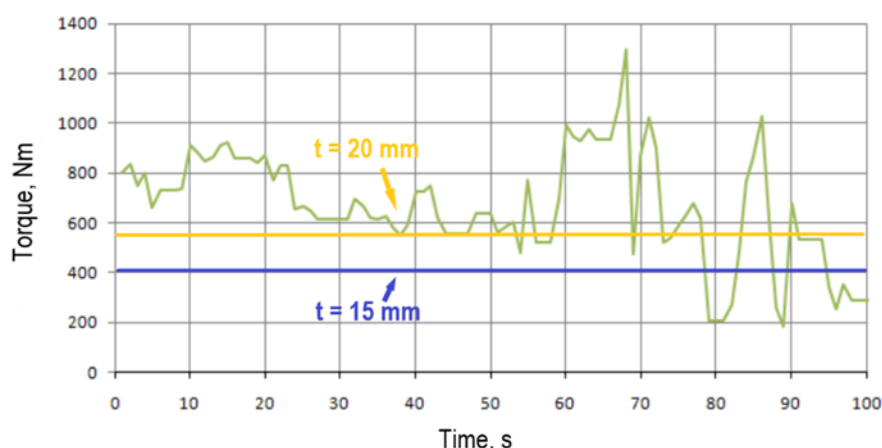


Rys. 13 Parametry kinematyczne głowicy dyskowej

Końcowy rezultat w postaci efektu zniszczenia ośrodka skalnego pod wpływem oddziaływania narzędzia w warunkach złożonej trajektorii urabiania pokazano na rys. 14. Na rys. 15 zestawiono wyniki badań symulacyjnych z unikatowymi rezultatami prób poligonowych głowicy dyskowej. Wykres ten przedstawia przebieg momentu obrotowego na wale silnika napędu tarcz dyskowych zarejestrowany podczas jednego z testów poligonowych głowicy, który odpowiadał podziałce urabiania w zakresie 15-20 mm. Na wykresie liniami ciągłymi zaznaczono wartości momentów obrotowego wyznaczonych na podstawie badań symulacyjnych. Zaprezentowane porównanie ilustruje zadawalającą zbieżność opracowanego modelu DEM z obserwacjami rzeczywistego procesu urabiania głowicą dyskową.

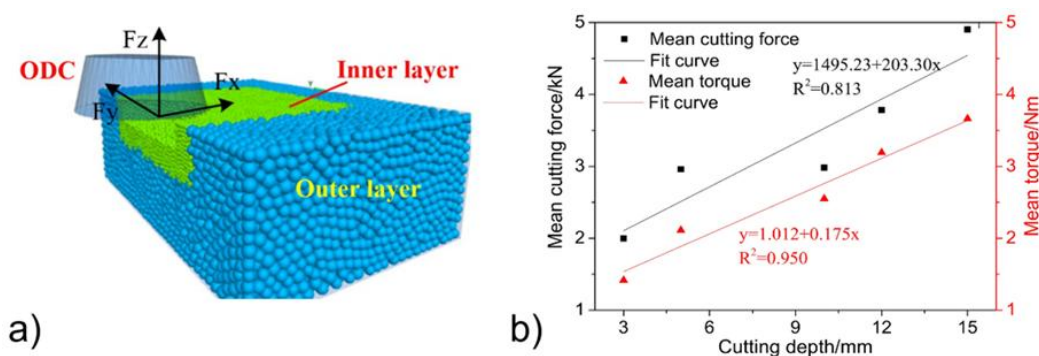


Rys. 14 Poszczególne sekwencje procesu urabiania narzędziem dyskowym w warunkach złożonej trajektorii urabiania



Rys. 15 Przebiegi momentu obrotowego na wale silnika napędu tarcz dyskowych i nominalne wartości tego parametru wyznaczone na podstawie badań symulacyjnych (dla podziałki urabiania $t = 15$ mm i $t = 20$ mm)

Metoda DEM jest również wykorzystywana w badaniach urabiania dyskami asymetrycznymi techniką ODC. Przykładem tego typu analiz są badania opisane przez (Li.X, et al. 2025). Celem testów numerycznych w tym przypadku była identyfikacja wpływu wybranych parametrów kinematycznych na obciążenia narzędzia dyskowego oraz parametry energetyczne procesu urabiania. W badaniach wykorzystano dysk o średnicy 100 mm. Dysk poruszał się z prędkością kątową równą 500 rad/s przy założeniu wartości mimośrodów $e = 1$ mm. Efektem modelowania w tym wypadku było m.in. opracowanie modeli statystycznych opisujących zależności pomiędzy głębokością urabiania, a wypadkową siłą reakcji i momentem generowanym na narzędzie dyskowe (rys.16).



Rys. 16 Badania symulacyjne DEM urabiania dyskiem techniką ODC:

a – model DEM układu dysk – próbka skalna,

b – wykresy wypadkowej siły skrawania i momentu reakcji w funkcji zagłębienia dysku

PODSUMOWANIE

Zastosowanie asymetrycznych narzędzi dyskowych do urabiania skał zwięzłych i bardzo zwięzłych stanowi obiecujący kierunek rozwoju mechanicznych metod urabiania. Liczne badania przemysłowe potwierdziły możliwości znacznego obniżenia energochłonności procesu urabiania, a tym samym minimalizacji gabarytów i masy maszyny urabiającej. Aktualnie w fazie wdrożenia i badań znajduje się wiele innowacyjnych konstrukcji maszyn urabiających

wykorzystujących dyski asymetryczne. Dotychczasowe testy przemysłowe dowodzą szeregu zalet w odniesieniu do dotychczas stosowanych technik mechanicznego urabiania skał. Jednym z podstawowych problemów stosowania asymetrycznych narzędzi dyskowych w głowicach maszyn urabiających jest problematyka prognozowania ich obciążeń. Rozwój narzędzi symulacji komputerowej, w tym metody DEM daje nadzieję na opracowanie efektywnych modeli urabiania dyskami asymetrycznymi, co poszerzy możliwości badawcze i projektowe w tym zakresie.

LITERATURA

- Bołoz Ł., Kalukiewicz A. (2020). Machines for Mechanical Mining of Hardly Workable and Abrasive Rocks. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering* ; ISSN 2545-2827 ; vol. 3 iss. 1). ISBN: 978-83-11-66675-02-5; e-ISBN: 978-83-66675-03-2. pp. 150-160. Bibliogr. pp. 159-160
- Gajewski, J., Podgórski, J., Jonak, J., Szkudlarek, Z. (2008). Numerical simulation of brittle rock loosening during mining process, *Computational Materials Science*, 43(1), pp. 115-118.
- Ghamgosar, Morteza & Doğan, Nazife. (2015). A numerical study on oscillating disc cutting (odc) technology for hard rock cutting a numerical study on oscillating disc cutting (odc) technology for hard rock cutting. Conference: ISRM Congress 2015. Int'l Symposium on Rock Mechanics At: Montreal, Canada Volume: ISBN: 978-1-926872-25-4
- Gospodarczyk P, Kotwica K., Mendyka P. and Stopka G. (2016). Innovative roadheader mining head with asymmetrical disc tools, *Exploration and mining, mineral processing. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, vol. 2, Sofia 2016, pp. 489-496.
- Hood M., Alehossein H.. (2000). A development in rock cutting technology', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, no. 1-2, pp. 297-305.
- Klich A. (1998). Praca zbiorowa. Niekonwencjonalne techniki urabiania skał. Katowice „Śląsk” 1998.
- Kotwica, K., Małkowski, P. (2019). Methods of mechanical mining of compact-rock – A comparison of efficiency and energy consumption. *Energies* 2019, 12, 3562.
- Kotwica K., Stopka G., Prostański D. (2021). Study and application of asymmetrical disk tools for hard rock mining. *Energies* ISSN 1996-1073. 2021 vol. 14 iss. 7 art. no. 1826, pp. 1-21. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1826/pdf>
- Li, X., Wang, S. & Meng, Q. (2025). Influence of kinematic parameters and rock properties on the cutting process with ODC based on discrete element method. *Sci Rep* 15, 14649 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98587-8>
- Stopka, G. (2020). Laboratory research on the influence of selected technological parameters on cutting forces during hard rock mining with asymmetric disk tools. *Acta Montan. Slovakia* 2020, 25, pp. 94-110.
- Ramezanzadeh A., Hood M. (2010). A state-of-the-art review of mechanical rock excavation technologies. *Int. Journal of Mining and Environmental Issues*, Vol.1, No.1.
- Stopka, G. (2021). Modelling of Rock Cutting with Asymmetrical Disc Tool Using Discrete-Element Method (DEM). *Rock Mech Rock Eng* 54, pp. 6265-6279 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02611-y>
- Stopka, G.; Kotwica, K. (2023). Estimation of excavation forces in conditions of a complex cutting trajectory with asymmetrical disc tools in DEM method. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2023, 142, 105439.

- Xia Y.M., Guo B., Cong G.Q. and Zeng G.Y. (2017). Numerical simulation of rock fragmentation induced by a single TBM disc cutter close to a side free surface, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 91, January 2017, pp. 40-48
- Xu C, Zhu Y, Song D, Guo X, Liu X, Wang E, Lu R. (2022). Comparison of DEM Models with Different Elemental Dimensions for TBM Disc Cutter Rock Fragmentation. *Sustainability*. 14(19):12909. <https://doi.org/10.3390/su141912909>
- Zhang G, Dang W, Herbst M, Song Z (2020) Complex analysis of rock cutting with consideration of rock-tool interaction using distinct element method (DEM). *Geomech Eng* 20(5)
- Komat'su website (2025), online information: <https://www.komatsu.com/en-us/products/equipment/hard-rock-continuous-miners/mc51>

Current trends in modeling and application of asymmetric disk tools in mining machine designs

Abstract: One of the most promising developments in mechanical hard rock mining methods is the use of asymmetric disc tools in new mining machine designs. The main goal of the design work is to reconcile the advantages of using mobile mining machines such as roadheaders with the possibility of using asymmetric disc tools. This article describes the basic techniques of mining with disc tools and presents various design solutions for mining machines using asymmetric discs. Examples of machine designs for mining using the undercutting technique and the ODC method are presented. In addition to designs used in industry, conceptual solutions are also described, such as a new-generation disk head with a complex mining trajectory. An important aspect of developing asymmetric disk mining techniques is the modeling of their loads. In this regard, one of the most promising computational methods is the DEM method. The article describes the basic problems arising from the application of this method and presents sample results of simulation studies of the asymmetric disk mining process.

Keywords: Disc tools, undercutting method, Discrete-element method (DEM), roadheader

Grzegorz Stopka

AGH University of Krakow
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics
Department of Machinery Engineering and Transport
A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland
e-mail: stopka@agh.edu.pl