

Pomiar parametrów wiertarki hydraulicznej i procesu wiercenia obrotowego

Łukasz Bołoz

1. Wstęp

W górnictwie podziemnym ręczne wiertarki obrotowe znajdują szerokie zastosowanie podczas realizacji wielu procesów związanych z wykonywaniem wyrobisk, procesami technologicznymi oraz pracami pomocniczymi. Ręczne wiercenie obrotowe sprawdza się znakomicie tam, gdzie skały charakteryzują się niską zawartością krzemu oraz wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie do 60 MPa. Obecnie dostępne są i stosowane wiertarki obrotowe o napędzie elektrycznym, pneumatycznym oraz hydraulicznym. Wiertarki hydrauliczne z silnikiem zębatym satelitowym charakteryzują się dużym momentem obrotowym, małym wskaźnikiem masy do uzyskiwanego momentu obrotowego oraz odpornością na warunki typowe dla wyrobisk górniczych, przez co zyskują coraz większe uznanie. Ze względu na coraz szersze pole zastosowania hydraulicznych silników satelitowych w wiertarkach górniczych oraz ich niezaprzeczalne zalety w Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH opracowano i wykonano stanowisko do badania obrotowych wiertarek hydraulicznych oraz procesu wiercenia obrotowego. Stanowisko charakteryzuje się potencjałem badawczym oraz może być stosowane do realizacji zajęć dydaktycznych.

2. Ręczne wiertarki obrotowe

Ręczne wiertarki obrotowe, w zależności od zastosowanej energii zasilania różnią się znacząco uzyskiwanymi parametrami przy określonej masie i wielkości. Wiertarki hydrauliczne, pneumatyczne i elektryczne znajdują zastosowanie w podziemnych zakładach górniczych o różnicowych zagrożeniach wybuchem pyłu węglowego i metanu. Najczęściej w wiertarkach hydraulicznych stosuje się silniki gerotorowe (orbitalne) lub zębate satelitowe (obiegowo-krzywkowe), w pneumatycznych wysuwowe (łopatkowe), natomiast w elektrycznych silniki asynchroniczne. Wiertarki obrotowe mogą być wyposażone w przystawkę do generowania uderzeń (tak zwany udar mechaniczny) wspomagających proces wiercenia przez zmniejszenie spójności skały na dnie otworu.

Pomijając dostępność energii zasilania w miejscu pracy, warto zwrócić uwagę na podstawowe parametry użytkowe wiertarek, czyli moment obrotowy, prędkość obrotową oraz masę. W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry dla przykładowych wiertarek o różnej energii zasilania. Największe różnice występują w generowanym momencie obrotowym oraz masie. Wiertarki hydrauliczne charakteryzują się kilkukrotnie wyższym momentem obrotowym przy jednoczesnym

Streszczenie: Stosowane obecnie w górnictwie ręczne wiertarki obrotowe mogą być zasilane energią elektryczną, pneumatyczną lub hydrauliczną. Ze względu na duży moment obrotowy oraz mały wskaźnik masy do momentu obrotowego wiertarki hydrauliczne sprawdzają się znakomicie w wielu zastosowaniach. W artykule przedstawiono stanowisko do pomiaru parametrów procesu wiercenia wiertarką hydrauliczną z silnikiem satelitowym. Stanowisko umożliwia pomiar ciśnienia na zasilaniu i spływie do 40 MPa, bezpośredni pomiar momentu obrotowego do 175 Nm, prędkości obrotowej do 250 obr./s, jak również mechanicznej prędkości wiercenia do 5 m/s. Konstrukcja stanowiska umożliwia zadawanie siły docisku do 1600 N i wykonywanie otworów o długości do 410 mm. Po zastosowaniu odpowiedniego kołnierza możliwe jest przeprowadzenie badań innych obrotowych wiertarek hydraulicznych o parametrach zgodnych z parametrami stanowiska.

MEASUREMENT OF HYDRAULIC DRILL AND ROTARY DRILLING PARAMETERS

Abstract: Rotary drills currently used in mining can be powered by electric, pneumatic or hydraulic power. Due to high torque and a small mass to torque indicator, hydraulic drills perform well in many applications. The article presents the stand for measuring the parameters of drilling process with the use of hydraulic drilling machine with satellite motor. The stand enables measurement of power and flow pressures up to 40 MPa, direct torque measurement up to 175 Nm, rotational speed up to 250 rps, as well as mechanical drilling speed up to 5 m/s. The construction of the stand allows the force to be applied to 1600 N and the drilling of holes up to 410 mm. After using the appropriate flange it is possible to conduct tests of other rotary hydraulic drills with parameters consistent with the parameters of the stand.

kilkudziesięciokrotnie niższym wskaźniku masy. Przy niewielkiej masie uzyskują znaczny moment obrotowy, którego wartość bezpośrednio zależy od ciśnienia zasilania i może być zmieniana od wartości minimalnej do szczytowej. Masa wiertarki ma duże praktyczne znaczenie i znacząco wpływa na komfort pracy.

Poszczególne modele hydraulicznych wiertarek obrotowych różnych producentów również wykazują znaczące różnice

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów przykładowych wiertarek: hydraulicznej, pneumatycznej oraz elektrycznej

Rodzaj wiertarki	hydrauliczna	pneumatyczna	elektryczna
Moment obrotowy [Nm]	90,0/160,0	27,0	17,5
Prędkość obrotowa [obr./min]	900,0	580,0	610,0
Masa [kg]	5,5	19,0	15,5
Wskaźnik masy [kg/Nm]	0,061/0,034	0,703	1,129

Tabela 2. Wybrane dane techniczne wiertarki H-WH1 Hydromech SA

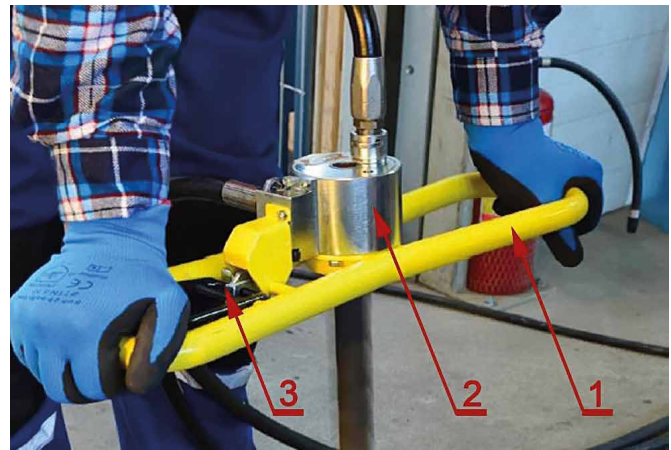
Wymiary	Długość [mm]	535
	Szerokość [mm]	91
	Wysokość [mm]	165
Waga [kg]		5,5
Zasilanie	Ciśnienie minimalne [MPa]	16
	Ciśnienie nominalne pracy [MPa]	Do 25
	Chłonność właściwa [cm ³ /obr.]	40
Prędkość obrotowa [obr./min]		50–900
Moment obrotowy [Nm]		90–160
Dopuszczalne obciążenie osiowe [kN]		1
Maksymalna średnica wiercenia [mm]		żerdź Ø42, raczek Ø48

w masie i generowanym momencie. Na podstawie analizy parametrów dostępnych na rynku wiertarek do przedmiotowego stanowiska wybrano wiertarkę H-WH1 firmy Hydromech SA. Wytypowana wiertarka posiada najkorzystniejsze parametry przy stosunkowo niewielkiej masie (tabela 2, rys. 1). Wiertarka H-WH1 charakteryzuje się maksymalnym momentem obrotowym 160 Nm (dla ciśnienia zasilania 25 MPa) przy prędkości obrotowej osiągającej 900 obr./min (dla wydajności zasilacza hydraulicznego 36 dm³/min). Opisująca wiertarka H-WH1 waży tylko 5,5 kg, co jest relatywnie niewielką wartością w porównaniu z wiertarkami innych producentów, a zwłaszcza z wiertarkami pneumatycznymi lub elektrycznymi.

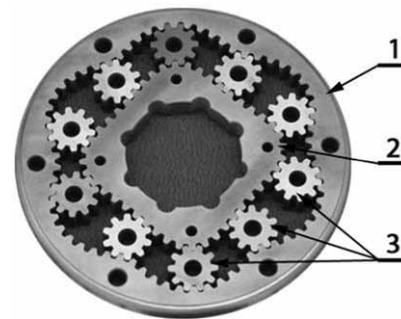
Omawiając przedmiotową wiertarkę, warto również zwrócić uwagę na zastosowanie opatentowanego wyłącznika typu „Hydromech”. Rozwiązanie to, według producenta, poprawia bezpieczeństwo oraz zwiększa komfort pracy operatora, eliminując w znacznym stopniu ryzyko kontuzji w przypadku zablokowania raczka lub żerdzi w otworze.

Napęd realizowany jest przez zębaty satelitowy silnik hydrauliczny, który przystosowano do zasilania emulsją olejowo-wodną lub olejem hydraulicznym. Schemat obieguo-krzywkowego silnika hydraulicznego pokazano na rys. 2. Zasilanie urządzenia może pochodzić bezpośrednio z instalacji obudów zmechanizowanych, z instalacji hydraulicznych innych maszyn znajdujących się w wyrobisku lub z niezależnego agregatu hydraulicznego.

Zasada działania silnika satelitowego (planetarnego) polega na doprowadzaniu cieczy pod ciśnieniem do komór roboczych, utworzonych przez elementy zębate (1) i (2) oraz koła satelitowe (3). Z komór roboczych o zmniejszających się objętościach ciecz odprowadzana jest kanałem powrotnym. Doprowadzenie



Rys. 1. Budowa wiertarki H-WH1 firmy Hydromech SA: 1 - kierownica; 2 - hydrauliczny silnik satelitowy; 3 - wyłącznik typu „Hydromech”



Rys. 2. Podstawowe elementy hydraulicznego silnika satelitowego Hydromech SA: 1 - obwodnica o uzębieniu wewnętrznym; 2 - planeta o uzębieniu zewnętrznym; 3 - satelity

cieczy z zasilania do komór o rosnących objętościach powoduje powstanie momentu obrotowego na wale silnika. Taka konstrukcja silnika charakteryzuje się dużą stabilnością pracy, odpornością na jakość cieczy oraz zanieczyszczenia i korzystnym wskaźnikiem ciężaru do mocy.

3. Projekt stanowiska

Podstawy teoretyczne procesu wiercenia obrotowego skał oraz budowa i parametry hydraulicznej wiertarki obrotowej H-WH1 pozwoliły na określenie najważniejszych założeń stanowiska do badania wiertarek oraz procesu wiercenia. Ponadto podczas opracowywania koncepcji stanowiska założono prostą konstrukcję, przeznaczenie do realizacji prac naukowo-badawczych, przemysłowych oraz możliwość zastosowania dydaktycznego. W związku z powyższym sprecyzowano następujące założenia:

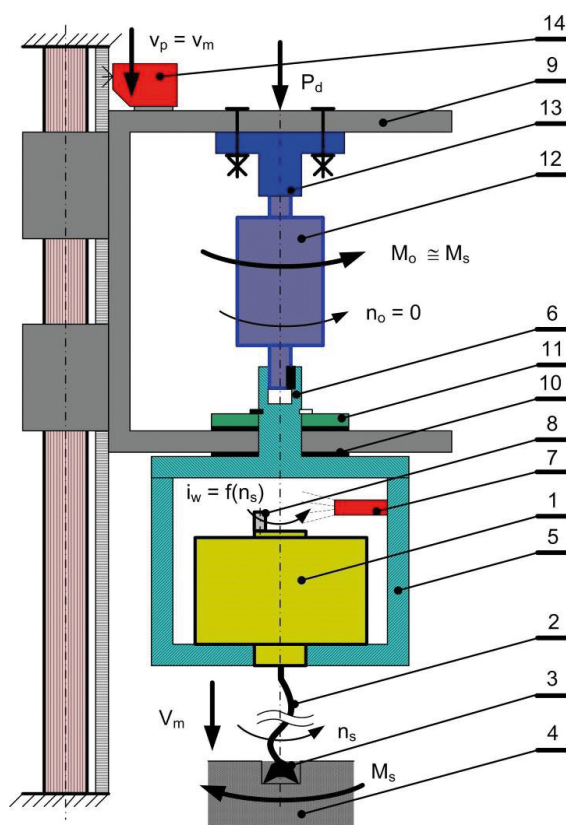
- wiercenie pionowo w dół i próbka nieruchoma podczas wiercenia;
- możliwość wykonania kilkudziesięciu otworów w jednej próbce;
- prosty mechanizm posuwu wiertarki podczas badań;
- usuwanie zwiercin nawojem śrubowym;
- siła docisku zadawana grawitacyjnie $P_d > 1200$ N;
- długość wierzonego otworu $L > 400$ mm;
- bezpośredni pomiar momentu obrotowego $M_o > 160$ Nm;
- pomiar prędkości obrotowej $n_o > 900$ obr./min;
- pomiar drogi z maksymalnym błędem $\delta = \pm 0,1$ mm;
- pomiar mechanicznej prędkości wiercenia $v_m < 5$ m/s;

- regulowane ciśnienie zasilania do $p = 25 \text{ MPa}$;
- regulowane natężeniu przepływu do $q = 36 \text{ dm}^3/\text{min}$;
- pomiar ciśnienia na zasilaniu i spływie;
- możliwość pomiaru natężenia przepływu.

Z kilku opracowanych koncepcji stanowiska wybrano wersję spełniającą wszystkie wymagania przy uwzględnieniu wysokiej funkcjonalności, prostej konstrukcji oraz łatwości użytkowania. Najpoważniejszym problemem było opracowanie metody pomiaru momentu obrotowego wiertarki w sposób bezpośredni i nieutrudniający realizacji procesu wiercenia. Typowe metody pomiarowe polegały na zastosowaniu przewodowego układu tensometrycznego na żerdzi, który ogranicza całkowitą liczbę obrotów oraz zlokalizowany jest między wiertarką a próbką badawczą. Drugim sposobem był pomiar momentu reakcji na elemencie roboczym (w tym przypadku na próbce) stosowany w hamowniach. Tak jedna, jak druga metoda nie spełniała oczekiwań, w związku z czym opracowano autorską metodę polegającą na pomiarze momentu reakcji w mocowaniu wiertarki do wózka mechanizmu posuwu. Rozwiązanie takie pozwala na bezpośredni i dokładny pomiar momentu wiercenia, a sam układ pomiaru zlokalizowany jest z tyłu wiertarki. Pozostałymi mierzonymi parametrami procesu wiercenia są droga, jaką pokonuje wiertarka (głębokość otworu, mechaniczna prędkość wiercenia), oraz prędkość obrotowa mierzona na wrzecionie, z tyłu wiertarki. Schematycznie sposób pomiaru wymienionych parametrów przedstawiono na rys. 3.

Najważniejszą częścią stanowiska, będącą również przedmiotem pomiarów, jest wiertarka (1), która standardowo wyposażona jest w żerdź spiralną (2) oraz raczek (3). Zestaw ten wykonuje podczas realizacji badań otwory w próbce (4). Wiertarka (1) została odłączona od fabrycznej kierownicy i zamocowana w obudowie (5). Obudowa (5) połączona jest sztywno z kołnierzem dolnym (6). Wewnątrz obudowy (5) znajduje się czujnik indukcyjny (7), który zlicza wystąpienia stalowego trzpienia (8) zamocowanego do wrzeciona w tylnej części wiertarki. Kołnierz górny (6) dociskany jest korpusem wózka (9) przez podkładkę ślizgową (10), przekazując siłę docisku z wózka przez wiertarkę na żerdź i raczek. Natomiast wewnątrz korpusu wózka (9), kołnierz górny (6) zablokowany jest osiowo blokadą (11), która utrzymuje obudowę z wiertarką podczas podnoszenia wózka. Kołnierz górny (6) przekazuje moment skrawania z wiertarki na momentomierz (12), który przez kołnierz górny (13) zamocowany jest do korpusu wózka (9). Wózek wyposażony jest w indukcyjny czujnik drogi (14), który wyznacza głębokość wierconego otworu i prędkość wózka. Mierzona prędkość wózka v_p równa jest mechanicznej prędkości wiercenia v_m .

Moment skrawania M_s generowany przez raczek przenoszony jest przez omówiony układ na momentomierz. Podczas wiercenia jedynie wrzeciono wiertarki, żerdź i raczek poruszają się obrotowo, dlatego też prędkość obrotowa wyznaczana jest przez czujnik indukcyjny w obudowie wiertarki. Siła docisku P_d przenoszona jest z wózka na wiertarkę przez podkładkę ślizgową. Rozwiązanie takie, ze względu na brak ruchu obrotowego tych elementów, wprowadza jedynie niewielki błąd do pomiaru momentu obrotowego M_o , którego wartość podczas wiercenia jest stała i nie przekracza 0,8% i może być skorygowana przez



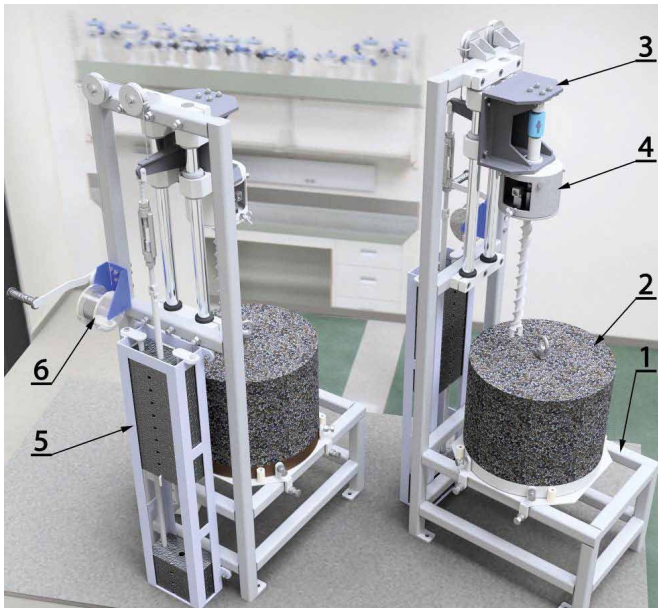
Rys. 3. Sposób pomiaru istotnych parametrów procesu wiercenia: 1 - wiertarka H-WH-1; 2 - żerdź spiralna; 3 - raczek; 4 - wiercona próbka; 5 - obudowa wiertarki; 6 - kołnierz dolny; 7 - indukcyjny czujnik obecności; 8 - trzpień wrzeciona; 9 - korpus wózka; 10 - podkładka ślizgowa; 11 - blokada osiowa; 12 - momentomierz; 13 - kołnierz górny; 14 - indukcyjny czujnik drogi

wzorcowanie lub odpowiednią poprawkę. Aby nie obciążać momentomierza siłą osiową, został on zamocowany suwliwie w kołnierzem dolnym. Oprócz podanych wartości, podczas badań mierzone są również ciśnienia w przewodach zasilającym i powrotnym wiertarki. Natomiast zastosowanie odpowiedniego przepływomierza pozwala na wyznaczenie natężenia przepływu.

Szereg przeprowadzonych prac skutkowało stworzeniem projektu stanowiska badawczego. Szczegółowy model 3D, który wykonano podczas realizacji projektu i wykorzystano do przeprowadzenia analiz sztywności stanowiska metodą elementów skończonych oraz opracowania dokumentacji technicznej, pokazano na rys. 4. Natomiast na rys. 5 zamieszczono zdjęcia stanowiska i jego wybranych podzespołów.

Elementem nośnym stanowiska jest rama (1) mocowana do podłoża przez podkładki wibroizolacyjne. Na ramie spoczywa zespół pozycjonowania próbki (2) z zabudowaną próbką naturalną lub wykonaną z betonu próbką walcową o wymiarach $\phi 500 \times 410$. Masa próbki przed rozpoczęciem badań wynosi ok. 190 kg.

Próbka za pomocą prostych blokad śrubowych pozycjonowana jest przed wykonaniem każdego otworu. Na ramie zabudowane są wałki precyzyjne, po których porusza się wózek (3)



Rys. 4. Stanowisko badawcze z oznaczonymi podstawowymi podzespołami: 1 - rama; 2 - próbka; 3 - wózek; 4 - zespół wiertarki; 5 - obciążniki; 6 - wciągnik

wyposażony w łożyska liniowe. Do wózka zamocowany jest zespół wiertarki (4). Siła docisku zadawana jest grawitacyjnie za pomocą dziesięciokilogramowych obciążników (5) o łącznej masie 120 kg. Podnoszenie wózka odbywa się za pomocą ręcznego wciągnika linowego z hamulcem (6). W zależności od potrzeb stanowisko może być zasilane z jednego z wielu zasilaczy hydraulicznych będących na wyposażeniu Katedry.

Najważniejszym mierzonym parametrem jest moment obrotowy, do pomiaru którego zastosowano dynamiczny, bezdotykowy czujnik momentu DFM22-175-S Megatron o dopuszczalnym momencie 175 Nm z maksymalnym błędem $\pm 0,1\%$. W zastosowanym układzie momentomierz nie obraca się, więc alternatywnie można zastosować tensometryczny pomiar momentu.

Drugim istotnym parametrem jest prędkość obrotowa, która ze względu na specyfikę stanowiska wyznaczana jest na podstawie impulsów z czujnika indukcyjnego PCID 2ZN Sels, co pozwala na pomiar prędkości obrotowej do 15000 obr./min (250 obr./s) z błędem $\pm 0,25$ obr./min. Do pomiaru prędkości przewidziano enkoder liniowy Lika SML z taśmą magnetyczną MT32 o maksymalnym błędzie $\pm 0,1$ mm. Ciśnienie na zasilaniu i spływie mierzone jest czujnikami MBS32-3615-1AB08 Danfoss, umożliwiającymi pomiar do 40 MPa z maksymalnym błędem $\pm 0,5\%$. Natomiast do pomiaru natężenia przepływu na zasilaniu wiertarki można zastosować dowolny przepływomierz turbinowy. Wartość siły docisku jest znana, jednak w śrubie rzymskiej przewidziano jej pomiar w celu określenia zmienności wynikającej z procesu wiercenia.

4. Podsumowanie

Ręczne wiertarki obrotowe znajdują szerokie zastosowanie w górniczych zakładach podziemnych. Ze względu na szereg korzystnych parametrów oraz wysoką funkcjonalność na



Rys. 5. Stanowisko badawcze po montażu

szczególną uwagę zasługują wiertarki hydrauliczne z silnikami zębatymi satelitowymi. Proces wiercenia obrotowego narzędziami skrawającymi stosowany jest szeroko również w lawetach i wozach wiertniczych i kotwiących. Zaproponowane stanowisko badawcze, będące w posiadaniu Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH, pozwala na realizację badań tak hydraulicznych wiertarek obrotowych, jak i narzędzi i procesu wiercenia. W praktyce stanowisko umożliwia określenie szeregu charakterystyk (mechaniczna prędkość wiercenia, moment skrawania itp.) w funkcji wybranych parametrów (siła docisku, rodzaj skały, rodzaj narzędzia, ciśnienie zasilania, natężenie przepływu). Kolejnym zastosowaniem stanowiska jest określanie podatności skał na zwiercanie, ścierności metodą wiercenia oraz oporów skrawania różnymi rozwiązaniami narzędzi skrawających przy założonych parametrach procesu. Istnieje również możliwość oceny szybkości zużycia narzędzi do wiercenia obrotowego oraz wpływu zużycia ostrzy na energochłonność i efektywność procesu wiercenia.

Prace zrealizowano w ramach Grantu Dziekańskiego, umowa numer 15.11.130.426.

Literatura

- [1] BOŁOZ Ł.: *Projekt i wykonanie stanowiska badawczego (...)*, Grant Dziekański AGH 15.11.130.426, Kraków, 2016 – niepublikowane.
- [2] BOŁOZ Ł., OSTAPÓW L.: *Samojezdny wóz kotwiący ze zintegrowanym układem do zabudowy obudowy powierzchniowej*. „Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze” 3(37)/2017.

dr inż. Łukasz Bołoz – AGH w Krakowie, e-mail: boloz@agh.edu.pl

artykuł recenzowany