



**BEZWYKOPOWA BUDOWA**

# PLANOWANIE I REALIZACJA PROJEKTÓW HDD

CZĘŚĆ V: PRZEWÓD WIERTNICZY  
I OSPRZĘT DO WIERCENIA OTWORU PILOTOWEGO





**ROBERT OSIKOWICZ**  
ROE

(ur. 1966), absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Zajmuje się technologią wiercenia otworów kierunkowych i praktycznymi aplikacjami płynów wiertniczych w otworach różnego przeznaczenia. Jest autorem ponad 20 referatów wygłoszonych na międzynarodowych konferencjach technicznych, a także szeregu publikacji dotyczących konfiguracji sprzętu, optymalizacji techniki wiercenia, analiz rynku technologii bezwykopowych, zarządzania jakością i ryzykiem w działaniach wiertniczych, tworzenia harmonogramów i budżetów projektów. Od 2009 r. pracuje dla firmy Robert Osikowicz Engineering. Firma jest członkiem międzynarodowej branżowej organizacji wiertniczej Drilling Contractors Association (DCA-Europe).

Za dostarczenie oprzyrządowania wglębnego odpowiedniego typu i jakości odpowiada spółka wiertnicza. Wybór BHA (*Bottom Hole Assembly*) powinien być następstwem szczegółowej analizy raportu geologicznego i zaproponowanego profilu wiercenia. Konfiguracja wynika z praktyki, dotychczasowych doświadczeń i powinna być znana przed rozpoczęciem projektu. W niniejszym artykule zestawiono główne elementy wyposażenia stosowanego wewnątrz wierzonego otworu i podano kryteria wyboru bazujące na możliwie precyzyjnym dostosowaniu przewodu wiertniczego oraz narzędzi wiertniczych do warunków geologicznych, jak i możliwości mechaniczno-hydraulicznych zmobilizowanego sprzętu

## ELEMENTY PRZEWODU WIERTNICZEGO

Zgodnie z definicją stosowaną w przemyśle wiertniczym, za elementy przewodu uważa się: rury płuczkowe (ang. *Drill Pipe*), rury płuczkowe grubościenne (ang. *Heavy Weight Drill Pipe*), obciążniki (ang. *Drill Collar*), obudowy sondy pomiarowej (ang. *Sonde Housing*), łącznik napędowy na wrzecionie oraz wszelkie łączniki wiertnicze, stabilizatory spiralne, amortyzatory drgań, łączniki cyrkulacyjne i łączniki zawierające zawory zwrotne. Do przewodu nie są wliczane narzędzia (świdry, poszerzacze, centralizatory typu RING i silniki wglębne).

## CECHY IDENTYFIKUJĄCE

Rura płuczkowa składa się z odcinka rury bezszwowej spęczanej na końcach, do której dogrzewa się tarciowo zworniki wyposażone w czop i mufę z naciętymi gwintami. Parametrami, dzięki którym możemy klasyfikować przewód, jest jego geometria (średnica calizny rury, średnica zewnętrzna i wewnętrzna zwornika, grubość ścianki calizny rury), gatunek stali, z której został wykonany zwornik, i calizna oraz typ połączenia gwintowego. Standardowy przewód wiertniczy API dostępny jest w zakresie średnic calizny rury od 2 <sup>3</sup>/<sub>8</sub>" (60 mm) do 7 <sup>5</sup>/<sub>8</sub>" (193 mm). W małych urządzeniach HDD (*Horizontal Directional Drilling*) stosuje się jednak

również przewód z zakresu od 1" (25 mm) do 2 <sup>1</sup>/<sub>4</sub>" (57 mm), a w ekstremalnie dużych wiertnicach przewód o średnicy calizny od 8" (203 mm) do 8 <sup>3</sup>/<sub>4</sub>" (222 mm). Przewód wiertniczy wykonywany jest potencjalnie z kilku dostępnych na rynku gatunków stali: E, X, G, S, Z lub V różniących się pomiędzy sobą wytrzymałością mechaniczną. Najpopularniejszym obecnie materiałem w wiertnictwie kierunkowym HDD jest stal S-135, stosowana przez około 80% podmiotów funkcjonujących na rynku. Liczba stowarzyszona z literą oznacza minimalną granicę plastyczności materiału calizny rury i powiązaną z nią wytrzymałość na rozciąganie podawaną w tysiącach psi (funtów na cal kwadratowy). Geometria zwornika jest powiązana z materiałem calizny rury i typem połączenia. Im wyższa jakość stali użytej do produkcji rury, tym zwornik musi charakteryzować się wyższą wytrzymałością mechaniczną. Także wielkość i typ połączenia gwintowego naciętego na zworniku pozostaje w ścisłej korelacji ze średnicą calizny rury.

## RODZAJE ELEMENTÓW I ICH PRZEZNACZENIE

Przewód wiertniczy służy do wywierania nacisku na narzędzie poprzez funkcję pchania, jak i ciągnięcia oraz przenoszenia momentu obrotowego niezbędnego do prowadzenia operacji wiertniczej. Wnętrzem przewodu do narzędzia dostarczana jest też

Calizna rury płuczkowej					Zwornik				
Średnica zewnętrzna	Ciężar jednostkowy	Spęczenie	Gatunek stali	Grubość ścianki	Połączenie gwintowe	Średnica zewnętrzna	Średnica wewnętrzna	Długość zwornika czop	Długość zwornika mufa
cale	lbs/ft	-	-	cale	-	cale	cale	cale	cale
2 3/8	6,65	EU	S-135	0,280	NC26	3 5/8	1 3/4	9	10
2 7/8	10,40	EU	S-135	0,447	NC31	4 3/8	1 5/8	9	11
3 1/2	13,30	EU	S-135	0,368	NC38	5	2 1/8	10	12 1/2
	15,50	EU	S-135	0,449	NC40	5 1/2	2 1/4	10	12 1/2
4	14,00	EU	S-135	0,330	NC46	6	3	9	12
	15,70	EU	S-135	0,380	NC46	6	3	9	12
4 1/2	16,60	IEU	S-135	0,337	NC46	6 1/4	2 3/4	9	12
	20,00	IEU	S-135	0,430	NC46	6 1/4	2 1/4	9	12
5	19,50	IEU	S-135	0,362	NC50	6 5/8	2 3/4	9	12
	19,50	IEU	S-135	0,362	NC50DS	6 5/8	3 1/4	9	12
	25,60	IEU	S-135	0,500	NC50	6 5/8	2 3/4	9	12
	25,60	IEU	S-135	0,500	5 1/2" FH	7 1/4	3 1/4	10	12
5 1/2	21,90	IEU	S-135	0,361	5 1/2" FH	7 1/2	3	10	12
	24,70	IEU	S-135	0,415	5 1/2" FH	7 1/2	3	10	12
	24,70	IEU	S-135	0,415	5 1/2" FHDS	7 1/2	3	10	12
5 7/8	23,40	IEU	S-135	0,361	5 1/2" FHDS	7	3 3/4	10	12
	26,30	IEU	S-135	0,415	5 1/2" FHDS	7 1/4	3 1/2	10	12
6 5/8	25,20	IEU	S-135	0,330	6 5/8" FH	8 1/2	4 1/4	10	13
	27,70	IEU	S-135	0,362	6 5/8" FH	8 1/2	4 1/4	10	13
	27,70	IEU	S-135	0,362	6 5/8" FHDS	8 1/2	4 1/4	10	13
7 5/8	33,70	IEU	S-135	0,430	6 5/8" FHDS	8 1/2	4 1/4	13	15
	39,00	IEU	S-135	0,500	6 5/8" FHDS	8 3/4	4	13	15
	33,70	IEU	S-135	0,430	6 5/8" H90DS	8 1/2	3 1/2	13	15
8 3/4	54,30	IEU	S-135	0,625	7 5/8" H90DS	10"	5	12	18

TAB. 1. | Geometryczne parametry przewodu wiertniczego wg specyfikacji API 5DP (źródło: Superior Drillpipe)

płuczka, która także odgrywa kluczową rolę w procesie wiercenia. Przewód służy również innym czynnościom technologicznym w otworze, w tym związanym z instalacją rurociągów i kabli.

Podstawowym składnikiem kolumny przewodu jest rura płuczka (ang. *Drill Pipe*), potocznie nazywana także żerdzią wiertniczą. Składa się ona z trzech elementów: zwornika z połączeniem zewnętrznym (czop), calizny rury oraz zwornika z połączeniem wewnętrznym (mufa). Dla rur płuczkowych stosowanych w segmencie HDD średnica zwornika jest zawsze większa niż średnica calizny rury.

Poza przewodem konwencjonalnym

w HDD spotykamy także przewód grubościenny (HWDP) przeznaczony do montażu w tych odcinkach kolumny przewodu (są one narażone na podwyższone obciążenia mechaniczne). Rury płuczki grubościenne charakteryzują się nie tylko zwiększoną grubością ścianki, ale także dłuższymi zwornikami i uzbrojonym spęczeniem w części środkowej rury, zabezpieczającym przewód przed wycieraniem. Ich stosowanie zwiększa stabilność dolnej części przewodu wiertniczego. Przewód HWDP występuje w podobnym typoszeregu średnic co przewód konwencjonalny, przy czym najmniejszą dostępną średnicą calizny jest 2 7/8" (73 mm), a największą standardową średnicą jest

6 5/8" (168 mm).

Kolejnym elementem przewodu ulokowanym w jego dolnej części w trakcie wiercenia otworu pilotowego są stalowe, grubościenne obudowy sond pomiarowych pracujących w systemach radiowych i żyrokompasowych. Alternatywnym rozwiązaniem są obciążniki wykonane ze stopów chromowo-molibdenowo-niklowych, w których zapuszczane są narzędzia pomiarowe magnetycznych systemów nawigacji. Poza funkcją ochrony narzędzi służących do nawigacji, obciążniki służą usztywnieniu zestawu i skuteczniejszemu przekazywaniu sił osiowych do czoła narzędzia wierzącego. Obciążnik niemagnetyczny, w zależności od przyjętej techniki wiercenia,

łączony jest krzywym łącznikiem (ang. *Bend Sub*), łącznikiem orientującym sondę pomiarową (ang. *Orienting Sub*) lub łącznikiem wyposażonym w porty do pomiaru ciśnienia wgłębego (ang. *PWD Sub*).

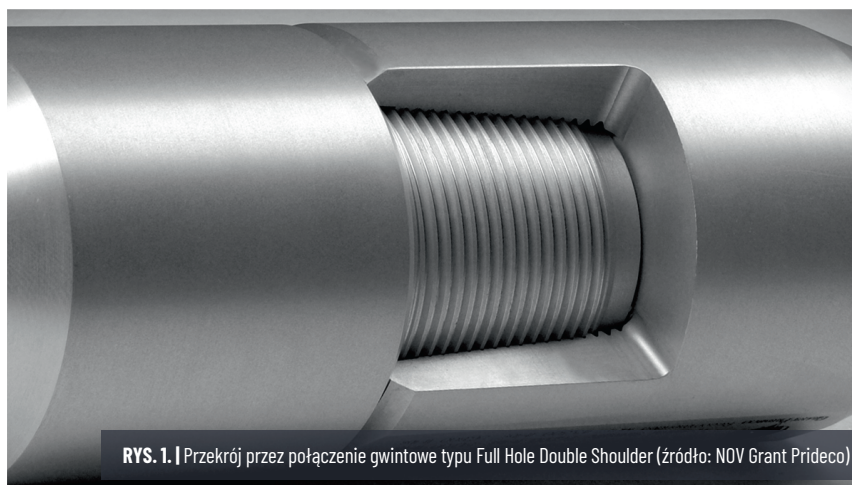
Innym ważnym, a zarazem niezbędnym elementem kolumny przewodu, są stalowe łączniki wiertnicze wykonane z jednego kawałka obciążnika, na którym nacina się połączenia gwintowe. Służą one do łączenia elementów przewodu i narzędzi o tym samym typie połączenia gwintowego (ang. *Sub Saver*) lub dwóch różnych typów połączeń (ang. *X-Over*). Łączone elementy przewodu mogą pełnić nie tylko różne funkcje, ale mogą mieć różną średnicę zewnętrzną i wewnętrzną. Łączniki wykonywane są w trzech typach: czop × mufa, czop × czop, mufa × mufa. Długość stosowanych łączników wiertniczych wynika z funkcji, jaką spełniają w kolumnie przewodu wiertniczego.

W trakcie wiercenia pilotowego można wykorzystywać także nietypowe elementy. Należą do nich spiralne stabilizatory przewodu wiertniczego. Umieszczenie ich w warunkach skalnego wiercenia pozwala na przekazywanie na narzędzie większych nacisków, stabilizuje pracę świdra oraz zmniejsza tendencję do niekontrolowanego odchodzenia od założonej trajektorii. Elementami wykorzystywanymi w zaawansowanym wiertnictwie kierunkowym są amortyzatory drgań (ang. *Shock Tool*). Ich zadaniem jest niedopuszczenie do przeniesienia drgań i uderów z narzędzia wierzącego na przewód wiertniczy i dalej na urządzenie wiertnicze.

*Przewód wiertniczy służy do wywierania nacisku na narzędzie poprzez funkcję pchania, jak i ciągnięcia oraz przenoszenia momentu obrotowego niezbędnego do prowadzenia operacji wiertniczej*



FOT. 1. | Przewód wiertniczy ze zwornikami uzbrojonymi w hardbanding (źródło: NOV Grant Prideco)



RYC. 1. | Przekrój przez połączenie gwintowe typu Full Hole Double Shoulder (źródło: NOV Grant Prideco)

## PROCES PRODUKCJI

Przewód spełniający normę API wykonywany jest najczęściej w technologii zgrzewania tarcowego (ang. *Forged-Friction Welded*). Spęczana na końcach rura płuczkowa jest łączona w kontrolowanym procesie ze zwornikiem. Spęczenie rury ma na ogół charakter na zewnątrz (ang. *EU, External Upset*) lub zarówno na zewnątrz, jak i do wewnątrz (ang. *IEU, Internal External Upset*). Dzięki temu uzyskuje się optymalną grubość ścianki w miejscu połączenia ze zwornikiem. Materiały służące do produkcji rury i zworników przewodu są zwykle różne. Dąży się przy tym do zrównoważenia mechanicznej wytrzymałości zwornika i calizny rury płuczkowej. W czasie produkcji cała długość rury przechodzi obróbkę cieplną i podlega wielokrotnej kontroli jakości. Para zworników – czop i mufa wykonane są oddzielnie. Zworniki przed połączeniem posiadają nacięte gwinty. Ich utwardzone powierzchnie są obrobione

cieplnie i chemicznie. Opcjonalnie zworniki po stronie mufy są wzmocniane poprzez wykonanie napawania (ang. *Hardbanding*). Odcinki rur płuczkowych o długościach do 5 m, stosowane przed urządzenia wiertnicze klasy mini i midi, mogą być wyprodukowane także w jednym kawałku z wykorzystaniem techniki kucia (ang. *One Piece Forged*).

## EKSPLOATACJA POŁĄCZENIA GWINTOWEGO

Połączenie gwintowe przed jego obciążeniem roboczym powinno być skręcone określonym **momentem skręcenia**, który wywołuje w połączeniu na skutek wzajemnego oddziaływania czół wstępne naprężenia rozciągające w czopie i ściskające w mufie. Każde połączenie gwintowe wymaga skręcenia z kontrolowanym i wymaganym (określonym w tabelach API lub w tabelach producenta) momentem. Wartość zalecanego momentu skręcającego zawiera



się w przedziale od 55 do 60% wytrzymałości zwornika na skręcanie (granicy plastyczności materiału). Zastosowanie prawidłowego momentu skręcającego jest jednym z podstawowych warunków prawidłowej pracy połączenia. Zabezpiecza to przewód przed powstaniem niebezpiecznego zjawiska, jakim jest rozchwianie połączenia i utrata szczelności. O szczelności połączenia decyduje wielkość docisku na kontaktujących się ze sobą czochach czopa i mufy. Rozchwianie powoduje nie tylko utratę szczelności, ale również niesie za sobą ryzyko uszkodze-

nia i deformacji gwintu, a w konsekwencji zmniejszenie jego wytrzymałości i skrócenie czasu możliwej eksploatacji. Gwinty należy czyścić po każdej aplikacji w otworze, a następnie smarować każdorazowo przed ponownym połączeniem. Należy stosować certyfikowany smar i dostosowane do geometrii połączenia ochraniacze gwintów zewnętrznych i wewnętrznych. Urządzenia wiertnicze i szczęki mobilne powinny być wyposażone w precyzyjne zegary dla kontroli momentu stosowanego w trakcie skręcania i rozcinania połączeń gwintowych.

## WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNA - ZMĘCZENIE PRZEWODU

Z wytrzymałością mechaniczną przewodu wiążą się maksymalne dopuszczalne obciążenia (siły osiowe, moment obrotowy i momenty zginające), jakie mogą zostać zastosowane w trakcie operacji wiertniczych. Przewód w trakcie pracy podlega działaniu różnych sił:

- siły rozciągającej powstającej pod wpływem ciągnięcia narzędzia wiertniczego lub rurociągów w otworze;

Calizna rury nowa				Zwornik nowy					Zwornik Premium		
Średnica	Ciężar jednostkowy	Wytrzymałość na skręcanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Połączenie	Geometria zwornika OD/ID		Wytrzymałość na skręcanie	Wytrzymałość na rozciąganie	Max. moment skręcający połączenie	Średnica zewn. OD	Max. moment skręcający połączenie
cale	lbs/ft	kNm	kN	-	cale		kNm	kN	kNm	cale	kNm
2 3/8	6,65	15,2	1100	NC26	3 5/8	1 1/2	12,1	1730	6,6	3 13/32	5,0
2 7/8	10,40	28,2	1710	NC31	4 3/8	1 5/8	23,1	2770	13,6	4 1/16	10,3
3 1/2	13,30	45,2	2220	NC38	5	2 1/8	35,7	3740	19,6	4 13/16	17,0
	15,50	51,4	2580	NC38	5	2 1/8	35,7	3740	19,6	4 13/16	17,0
	15,50	51,4	2580	NC40	5 1/2	2 1/4	37,5	4350	26,4	5 3/32	19,5
4	14,00	56,8	2280	NC46	6	3	52,9	4660	31,6	5 9/16	21,3
	15,70	63,0	2590	NC46	6	3	52,9	4660	31,6	5 21/32	24,4
4 1/2	16,60	75,2	2640	NC46	6 1/4	2 3/4	60,5	5260	35,9	5 25/32	28,6
	16,60	75,2	2640	NC50	6 5/8	3 1/2	60,2	4930	35,9	6 1/16	28,3
5	19,50	100,5	3160	NC50	6 5/8	2 3/4	85,6	6690	51,3	6 5/16	38,4
	19,50	100,5	3160	NC50 DS	6 5/8	3 1/4	96,7	5640	58,0	6 1/32	38,9
	25,60	127,5	4240	NC50 DS	6 5/8	3 1/4	96,7	5640	58,0	6 5/32	47,9
	25,60	127,5	4240	5 1/2" FH	7 1/4	3 1/4	102,8	7910	63,7	6 15/16	47,8
5 1/2	21,90	123,7	3490	5 1/2" FH	7 1/2	3	117,8	8560	70,2	6 15/16	47,8
	24,70	138,1	3980	5 1/2" FH	7 1/2	3	117,8	8560	70,2	7 1/32	52,5
	24,70	138,1	3980	5 1/2" FHDS	7 1/4	3 1/2	136,9	7200	82,0	6 5/8	55,9
5 7/8	23,40	143,0	3750	5 1/2" FHDS	7 1/4	3 1/2	136,9	7200	82,0	6 5/8	55,9
	26,30	159,9	4270	5 1/2" FHDS	7 1/4	3 1/2	136,9	7200	82,0	6 3/4	61,8
6 5/8	25,20	172,3	3910	6 5/8" FH	8 1/2	4 1/4	147,4	9350	87,7	7 15/16	67,0
	27,70	186,2	4270	6 5/8" FH	8 1/2	4 1/4	147,4	9350	87,7	8 1/32	73,1
	27,70	186,2	4270	6 5/8" FHDS	8	4 1/2	169,8	8430	101,9	7 5/8	77,9
	27,70	186,2	4270	6 5/8" FHDS	8 1/2	4 1/4	230,5	10 130	138,3	7 23/32	96,6
	34,00	247,0	6000	6 5/8" FHDS	8 1/2	4 1/4	230,5	10 130	138,3	7 3/4	98,6
7 5/8	33,70	291,0	5830	6 5/8" FHDS	8 1/2	4 1/4	230,5	10 130	138,3	8	116,0
	39,00	329,5	6720	6 5/8" FHDS	8 3/4	4	257,0	11 070	153,9	8	122,9
	33,70	291,0	5830	6 5/8" H90DS	8 1/2	3 1/2	215,7	9160	129,0	7 1/2	124,0
8 3/4	54,30	531,0	9570	7 5/8" H90DS	10	5	254,0	11 320	151,2	9	147,1

TAB. 2. | Wytrzymałościowe parametry przewodu wiertniczego wykonanego ze stali S-135 (źródło: Superior Drillpipe)

Stan techniczny	Przewód nowy			Klasa Premium		Klasa 2	
Gatunek stali	Średnica zewnętrzna zwornika	Średnica wewnętrzna zwornika	Moment skręcający połączenie gwintowe	Średnica zewnętrzna zwornika	Moment skręcający połączenie gwintowe	Średnica zewnętrzna zwornika	Moment skręcający połączenie gwintowe
	cale	cale	kNm	cale	kNm	cale	kNm
E-75	6 5/8	3 3/4	30,9	5 7/8	21,4	5 13/16	19,1
X-95	6 5/8	3 1/2	37,9	6 1/32	27,3	5 15/16	23,7
G-105	6 5/8	3 1/4	42,1	6 3/32	29,7	6	26,1
S-135	6 5/8	2 3/4	51,6	6 5/16	38,5	6 3/16	33,4

**TAB. 3. |** Dane techniczne zworników przewodu 5" (połączenie NC50, ciężar jednostkowy 19,50 lbs/ft, grubość ścianki 9,19 mm) z podziałem na klasy zużycia przewodu i gatunki stali wykorzystanej do produkcji calizny rury. W tabeli zaznaczono maksymalny moment skręcający wynikający z geometrii zwornika (źródło: Superior Drillpipe)

- siły ściskającej wywołanej wywieraniem nacisku na świder lub narzędzie poszerzające;
- sił rozciągających i ściskających pochodzących od zginania na skutek istnienia krzywizn otworu i charakteru prac narzędzia (lub zestawu narzędzi);
- sił rozciągających i ściskających powstałych na skutek pchania przewodu i jego wyboczenia (odchylenia osi przewodu od osi otworu);
- sił ciśnienia hydraulicznego powstającego wewnątrz przewodu w trakcie tłoczenia płuczki;
- momentu skręcającego wywołanego momentem oporowym pochodzącym od narzędzia i tarcia przewodu w otworze;
- zmiennych sił różnego rodzaju pochodzących od zjawisk dynamicznych obserwowanych w trakcie komplikacji lub w stanach awarii.

W wiertnictwie kierunkowym całość przewodu pozostaje w skomplikowanym i złożonym stanie naprężeń. W zależności od fazy robót, przewód podlega ściskaniu, rozciąganiu, skręcaniu i zginaniu. Szczególnie niebezpieczna dla przewodu jest faza wiercenia pilotowego i poszerzania w trybie PUSH, kiedy to kolumna przewodu narażona jest na wyboczenia i nieodwracalne deformacje. Przewód wiertniczy przy wykonywaniu prac w otworze, w czasie których jest poddawany ściskaniu, przyjmuje formę zależną od wartości sił, jakie są wywierane przez mechanizm nacisku. Skomplikowany charakter pracy elementów przewodu wynika ze złożoności procesu wiertniczego.

Wprowadzany w ruch obrotowy i ruch posuwisty przewód przemieszcza się przez zakrzywioną trajektorię otworu. Przewód pracuje nie tylko w trakcie rzeczywistej akcji wiertniczej, ale również w trakcie operacji dźwigowych (zapuszczanie i wyciąganie z otworu). W przewodzie powstają naprężenia zmienne wynikające z ruchu obrotowego, ciągnięcia, pchania, zginania, tarcia o ścianę otworu, ciśnienia wewnętrznego, które mogą wzajemnie się nakładać. Przewód podlega cyklicznym obciążeniom, które w konsekwencji będą determinowały czas życia (liczbę cykli pracy) poszczególnych elementów składających się na kolumnę przewodu wiertniczego. Obciążenia zmienne (dynamiczne), jakie dominują w procesie wiertniczym, doprowadzają do uszkodzeń przewodu w miejscu największej akumulacji naprężeń. Dobrze jest znać możliwości wytrzymałościowe przewodu, aby można było właściwie określać parametry jego pracy.

### DOPUSZCZALNE PROMIENIE KRZYWIZNY

Istnieje silna korelacja pomiędzy średnicą zewnętrzną calizny rury a dopuszczalnym minimalnym promieniem krzywizny otworu. Biorąc pod uwagę złożony stan naprężeń, rekomenduje się, aby minimalny promień krzywizny otworu, kalkulowany jako złożenie promienia wynikającego z łuków wykonywanych w płaszczyźnie pionowej i poziomej, nie był mniejszy niż iloczyn  $1000 \times$  średnica stosowanej rury płuczkowej. Dla przewodu 5" będzie to więc 127 m, a dla przewodu 6 5/8" promień wyniesie 168 m. Należy wziąć też pod uwagę, że jeśli w zestawie przewo-

du znajdują się grubościennne elementy (obciążnik niemagnetyczny, przewód HWDP) lub silnik węglowy (ang. *Mud Motor*), rekomendowana wartość promienia krzywizny ulegnie zwiększeniu zgodnie ze specyfikacją producenta stosowanego osprzętu.

### KLASYFIKOWANIE PRZEWODU

Przewód wiertniczy może zostać zakwalifikowany ze względu na swój stan techniczny do czterech klas; nowy (klasa 1), Premium, klasa 2 i klasa 3. Przewód powinien podlegać procesowi okresowej inspekcji. Istotnym problemem jest zużycie zewnętrznych powierzchni przewodu na skutek tarcia o ściany otworu. Należy okresowo sprawdzać, czy nie występują znaczące wytarcia zmniejszające przekrój i wytrzymałość. Najlepszym sprawdzianem są pomiary zużycia i porównanie z wymiarami wyjściowymi. Stopień zużycia gwintów należy skontrolować certyfikowanymi przyrządami. Gwinty zużyte mogą być regenerowane poprzez nacięcie nowego gwintu na tym samym końcu rury płuczkowej.

Inspekcji i ocenie podlega zarówno calizna rury, jak i zwornik. Stopień zużycia powyżej 20% grubości ścianki w caliznie powoduje przeklasyfikowanie przewodu do klasy 2. Również dla każdej geometrii zwornika i typu połączenia gwintowego określa się minimalną zewnętrzną średnicę zwornika jako klasyfikowanego jeszcze do klasy Premium. W wiertnictwie kierunkowym rekomendowane jest użycie wyłącznie przewodu nowego lub pozostającego w klasie Premium. Normy Amerykańskiego Instytutu Naftowego (API, *American Petroleum Institute*) pozwalają

określić aktualny stan techniczny poszczególnych elementów przewodu i związane z nim limity obciążeń. Elementy zużyte (poniżej klasy Premium) powinny być odrzucane, zanim dojdzie do ich zniszczenia pod ziemią. W tab. 3 zamieszczono porównanie geometrii zworników z naciętymi połączeniami NC50 (4 1/2" IF) w funkcji materiału calizny rury i stopnia zużycia.

*W wiertnictwie kierunkowym całość przewodu pozostaje w skomplikowanym i złożonym stanie naprężenia. W zależności od fazy robót, przewód podlega ściskaniu, rozciąganiu, skręcaniu i zginaniu*

## NARZĘDZIA SŁUŻĄCE DO WIERCENIA PILOTOWEGO

Selekcja narzędzi (optymalizacja wyboru) dla określonego projektu musi opierać się na analizie zastanych warunków geologicznych, dostępnej technice wiercenia, długości i średnicy otworu, planowanych promieniach krzywizn, parametrach mechanicznych urządzenia wierniczego i parametrach hydraulicznych pompy płuczkowej, średnicy

zworników przewodu wierniczego, zakresie rekomendowanych obrotów narzędzia oraz wymaganej trwałości narzędzia w kontekście planowanego marszu.

Narzędzia wierzące ze względu na przeznaczenie można podzielić na dwie kategorie: świdry do drażenia otworu pilotowego o pełnym przekroju oraz na poszerzacze służące do rozszerzenia średnicy otworu pilotowego, kalibracji otworu i instalacji przewodów rurowych.

Z kolei podziału świdrów wiernicznych dokonujemy według dwóch kryteriów. Jednym z nich są rozwiązania konstrukcyjne, drugim sposób urabiania formacji.

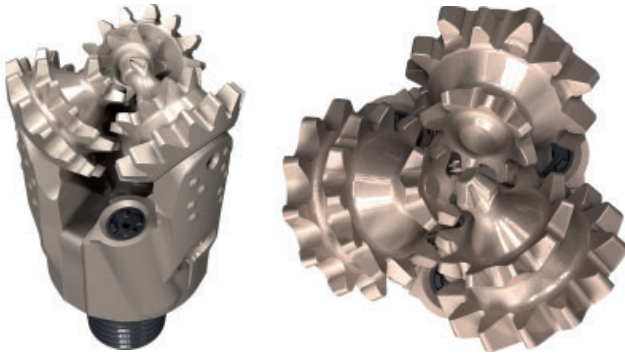
- **Niesymetryczne (skośne) głowice wyposażone w dysze i płytki sterujące o różnej geometrii i stopniu uzbrojenia** – narzędzia tego typu stosowane są powszechnie w konfiguracjach wiernic klasy mini i, sporadycznie, midi. Podstawowym sposobem ich działania jest akcja hydrauliczna wynikająca z ataku płuczki przyspieszanej w dyszach narzędzia. Mechaniczne odpajanie ma charakter najczęściej skrawający. Głowice wierzące tego typu nie posiadają łożyskowanych elementów (gryzów). Świdry asymetryczne jako stosunkowo proste narzędzia wykorzystywane są jedynie w trybie wiercenia jetting i nie znajdują zastosowania w kombinacji z silnikami płuczkowymi (ang. *Mud Motor*).
- **Świdry trójgryzowe** składają się z trzech segmentów zespawanych ze sobą. Każdy segment wyposażony jest w czop, na którym osadzony jest gryz uzbrojony wariantowo

we frezowane stalowe zęby MT (*Milled Tooth*) lub słupki TCI. W segmentach świdra wydrążone są kanały doprowadzające płuczkę wierniczą. Kanały płuczko-we zakończone są wymiennymi dyszami. Ilość dysz uzależniona jest od konstrukcji i średnicy świdra. W większości konstrukcji do średnicy 12 1/4" (311 mm) spotykamy trzy dysze ulokowane pomiędzy gryzami. W świdrach większych dodatkowo stosuje się czwartą dyszę o centralnym położeniu. Cechą charakterystyczną świdrów trójgryzowych wykorzystywanych w technice HDD jest posiadanie uszczelnionych łożysk ślizgowych lub tocznych. Jak już wspomniano, struktura tnąca świdra może być wykonana z wyciętych ostrzy (frezów) lub ze słupków z węglika wolframu ułożonych w formie wieńców. Warunkiem konstrukcyjnym jest to, aby wieńce jednego gryza wchodziły pomiędzy wieńce sąsiedniego gryza, zapewniając właściwą akcję wierniczą i jednocześnie samooczyszczanie się czoła narzędzia. Każdy typ świdra posiada charakterystyczne własności konstrukcyjne uzębienia (wysokość i kąt zaostrenia zębów, podziałkę, ilość zębów, zbrojenie oraz kształt wieńców kalibrujących).

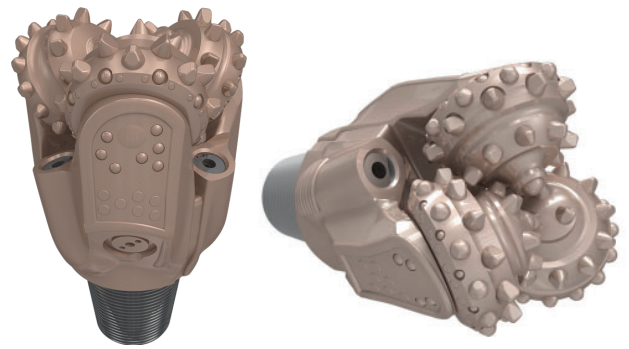
Dla zabezpieczenia narzędzia przed utratą średnicy wzmacnia się jego boczne segmenty węglikami lub pokrywa się je diamentem. Świdry trójgryzowe jako najbardziej uniwersalne narzędzia do wiercenia pilotowego mogą być wykorzystywane zarówno w konfiguracji jetting assembly, jak



FOT. 2. | Niesymetryczne głowice wierzące i nakładki sterująco-urabiające (źródło: Ditch Witch)



**FOT. 3.** | Świdry trójgryzowe MT wyposażone w stalowe ostrza frezowane (źródło: NOV ReedHycalog)



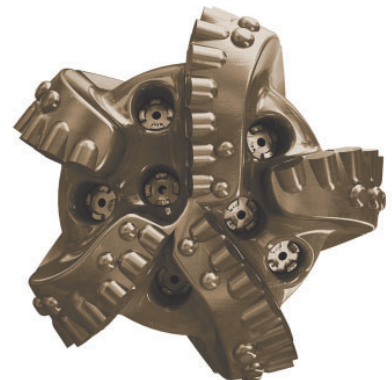
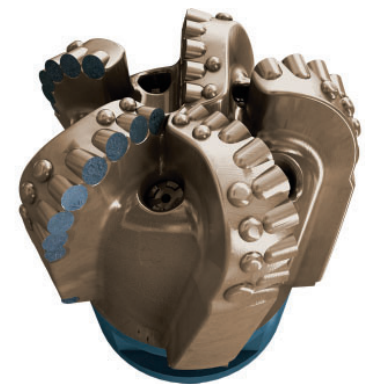
**FOT. 4.** | Świdry trójgryzowe TCI wyposażone w słupki z węglików wolframu (źródło: NOV ReedHycalog)

i motor assembly. W opcji jetting assembly akcja wiertnicza świdra trójgryzowego opiera się głównie na hydromonitorowym (płuczkowym) oddziaływaniu na formację. Wykorzystuje się do tego celu jedną lub dwie dysze, pozostałe pozostawiając zamknięte. W opcji motor assembly możemy mówić o mechaniczno-hydraulicznej pracy narzędzia, przy czym mechaniczny sposób oddziaływania na formację wykształconą w postaci litej skały polega na kruszeniu, a oddziaływanie na spoiste formacje ilaste zbliżone jest bardziej do skrawania. Wszystkie dysze świdra pozostają w tym przypadku otwarte. Świdry trójgryzowe szczególnie predestynowane są do kruszenia formacji skalnej. Uzbrojony gryz świdra toczy się po dnie otworu, a każdy ząb pod wpływem nacisku i uderzenia wgłębia się w ścianę, niszcząc tym samym jej strukturę. Następuje przy tym ścinanie skały, które w konsekwencji doprowadza do rozkruszenia i defragmentacji formacji. Do prawidłowej pracy na dnie świdry wymagają stosunkowo wysokich nacisków, optymalnej prędkości obroto-

wej i adekwatnej do średnicy świdra hydraulicznej. Do identyfikacji oraz odpowiedniego doboru świdra trójgryzowego służy klasyfikacja wynikająca z trzycyfrowego kodu opracowanego przez IADC (*International Association of Drilling Contractors*). Pierwsza cyfra kodu określa stopień twardości (zwiercalności) formacji. Cyfry od 1 do 3 zarezerwowane są dla świdrów frezowych (od miękkich do twardych), cyfry od 4 do 8 dla świdrów słupkowych (od miękkich do twardych). Druga cyfra kodu (od 1 do 4) oznacza podgrupę w ramach grupy głównej. Cyfra trzecia (od 1 do 7) określa typ zastosowanych łożysk. Kod 517 określa świdrowi słupkowy do wiercenia w formacjach średnio twardych, wyposażony w uszczelnione łożyska ślizgowe. Kod 135 definiuje świdrowi ze stalową, frezową strukturą tnącą, dostosowany do zwiercania skał miękkich. Jest on wyposażony w uszczelnione łożyska toczne.

- **Świdry typu PDC** (ang. *Polycrystalline Diamond Compact*) charakteryzują się stalowym lub matrycowym kadłubem (ang. *Body*) oraz segmentowym, żebrowym lub

skrzydłowym rozmieszczeniem ostrzy. Świdry PDC z ostrzami z polikrystalicznych diamentów różnicują się także za pomocą kształtu roboczej powierzchni kadłuba świdra oraz wysokości ostrza wystającego ponad powierzchnię bode. Ich charakter pracy określany jest jako skrawanie. Narzędzia PDC odznaczają się potencjalnie wyższymi postępami wiercenia i osiąganymi długościami marszy. Stawiają jednak wiele warunków, których spełnienie w branży HDD może okazać się kłopotliwe. Świdry PDC prowadzi się



**FOT. 5.** | Świdry skrawające PDC - Fixed Cutters Bit (źródło: NOV ReedHycalog)

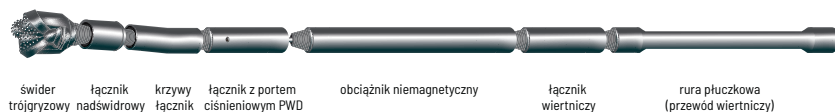
Średnica świdra	Średnica świdra	Połączenie gwintowe	Min. moment skręcający	Max. moment skręcający
cale	mm	-	kNm	kNm
4 5/8-5 1/2	117-140	2 7/8" API REG czop	6,0	7,4
5 5/8-7 3/8	143-187	3 1/2" API REG czop	9,5	12,0
7 1/2-9	190-228	4 1/2" API REG czop	16,2	21,6
9 1/2-14 1/4	241-362	6 5/8" API REG czop	38,0	43,2
14 1/2-20	368-508	7 5/8" API REG czop	46,0	54,0

**TAB. 4.** | Rekomendowany zakres momentów skręcających połączenia gwintowe świdrów trójgryzowych





**RYS. 2. |** Konfiguracja dolnego zestawu przewodu wiertniczego dla fazy wiercenia pilotowego w opcji Motor Drilling Assembly



**RYS. 3. |** Konfiguracja dolnego zestawu przewodu wiertniczego dla fazy wiercenia pilotowego w opcji Jetting Drilling Assembly

przy niższych naciskach niż ma to miejsce w przypadku świdrów trójgryzowych. Wymagania hydrauliczne (przepływ i moc hydrauliczna na cal kwadratowy otworu) są jednocześnie wyższe. Niezwykle istotnym wymaganiem dla prawidłowej eksploatacji jest odprowadzenie dużej ilości ciepła powstającego w wyniku pracy na spodzie otworu. Narzędzia tego typu mogą być wykorzystywane wyłącznie w trybie motor assembly lub RSS (ang. *Rotary Steerable System*). Czas życia świdra PDC jest teoretycznie wyższy niż świdra rolkowego ze względu na brak ułożyskowanych części ruchomych.

*Szczególnie niebezpieczna dla przewodu jest faza wiercenia pilotowego i poszerzania w trybie push, kiedy to kolumna przewodu narażona jest na wyboczenia i nieodwracalne deformacje*

Sposób doboru typu narzędzia i techniki wiercenia zależy w największym stopniu od spodziewanych warunków geologicznych, parametrów mechaniczno-hydraulicznych zmobilizowanego sprzętu wiertniczego oraz kompetencji i stopnia wykształcenia zaangażowanego personelu. Największy zakres stosowania mają przy tym świdry trójgryzowe. Jak już wspomniano, dla określenia rodzaju świdra i typu jego struktury tnącej należy stosować terminologię IADC, która za pomocą cyfrowych i literowych kodów określa

dopasowanie świdra do formacji i techniki wiercenia.

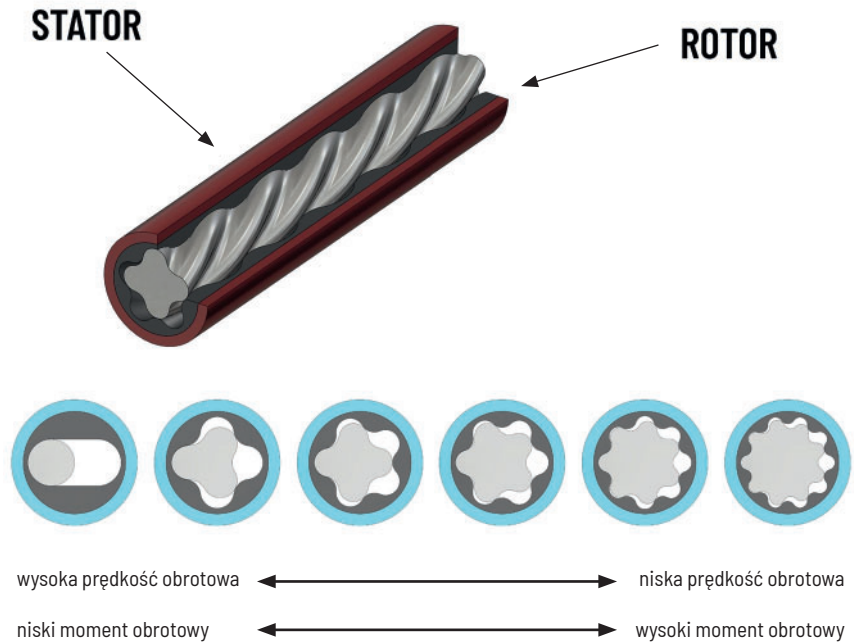
Technika HDD korzysta z dwóch możliwych koncepcji i strategii postępowania w trakcie wiercenia pilotowego: wiercenie hydromonitorowe (ang. *Jetting Assembly*) i, jako alternatywa, wiercenie z użyciem silnika wgłębny (ang. *Motor Assembly*). W pierwszej opcji wykorzystuje się świder trójgryzowy z krzywym łącznikiem (lub skośną asymetryczną głowicę pilotową). Urabianie formacji dokonuje się głównie dzięki działaniu strumienia płuczki wypływającej z dysz narzędzia pilotowego. Metoda hydromonitorowa jest powszechnie wykorzystywana w trakcie wiercenia przez warstwy niespoiste, z dominującym udziałem frakcji piaskowej. W opcji drugiej świder trójgryzowy jest mocowany bezpośrednio do wrzeciona motoru. W tym przypadku charakter pracy można określić jako mieszany: mechaniczno-hydrauliczny. Zoptymalizowane dla potrzeb HDD modele silników charakteryzują się wysokim momentem obrotowym, regulowaną w szerokim zakresie prędkością obrotową narzędzia oraz nastawną krzywizną dolnej części korpusu. Ich ekonomicznie uzasadnione użycie związane jest z formacjami skalnymi o wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe powyżej 10 MPa, ale także z kohezijnymi formacjami o wysokiej zawartości frakcji ilowej i pyłowej. Silniki wykorzystuje się w segmencie midi, maxi i mega. W segmencie maszyn o sile ciągnięcia do 300 kN, częściej w warunkach litej skały, spotyka się wiercenie metodą podwójnej żerdzi (ang. *All Terrain*), która dla uzyskania satysfakcjonującego postępu wiercenia wymaga niższych przepływów niż silniki płuczkowe z zakresu średnic 3 3/4–4 3/4" (95–121 mm).

Powszechnie wykorzystywane przez średnie i duże urządzenia wiertnicze silniki wgłębne pozwalają wiercić zakrzywione od-

cińki (sterować trajektorią) w formacjach, które nie podlegają skutecznemu wypłukiwaniu. Również w formacjach mieszanych, gdzie mamy do czynienia z warstwami niespoistymi i spoistymi, wybór silnika może być optymalnym rozwiązaniem. Silnik wgłębny pozwala znacząco zwiększyć postęp wiercenia. Energia hydrauliczna dostarczana do silnika jako konsekwencja przepływu i spadku ciśnienia jest zamieniana na energię mechaniczną i przekazywana jest bezpośrednio na świder w formie rotacji oraz dostępnego momentu obrotowego. W sekcjach wiercenia orientowanego (po łuku) nie istnieje konieczność obracania przewodem dla uzyskania postępu. Prędkość obrotowa świdra jest funkcją geometrii silnika oraz strumienia przepływu płuczki i jest ona znacząco wyższa niż przy konwencjonalnym wierceniu typu jet. Wiercenie motorem pozwala na stabilną pracę narzędzia na skutek znaczącej redukcji wibracji. Skutkiem stabilnej pracy jest optymalne wykorzystanie świdra. Uzyskiwany postęp i czas życia narzędzia jest przewidywalny. Wiercenie z użyciem motoru pozwala obniżyć tempo zużycia przewodu wiertniczego, nie tylko ze względu na zmniejszoną ilość wibracji, ale dzięki zmniejszeniu wymaganej prędkości obrotowej całej kolumny przewodu. Zakłada się, że w trakcie pracy z motorem zawartość fazy stałej w płuczce zatłaczanej do otworu jest kontrolowana, a zawartość frakcji piaskowej nie powinna być wyższa niż 1% objętościowo. Parametry pracy i tendencja do budowania krzywizny są szczegółowo opisane w karcie informacyjnej silnika. Urządzenie to powinno podlegać okresowym przeglądom i serwisowi w specjalistycznym warsztacie. Czas pracy pomiędzy przeglądami określa producent i mieści się w przedziale od 150 do 200 godz. pracy na dnie otworu.

Wgłębny silnik płuczkowy (ang. *Mud Motor*) składa się z kilku istotnych elementów:

- łącznik górny (ang. *Top Sub/Dump Sub*);
- sekcja silnikowa stator-rotor (ang. *Power Section*) odpowiedzialna za dokonanie konwersji energii hydraulicznej na mechaniczną składa się zasadniczo z dwóch elementów: statora wykonanego z elastomeru i stalowego rotora. Ilość krzywek (ang. *Lobe*) statora jest większa o jeden niż ilość krzywek rotora. Dostępne konfiguracje zmieniać się mogą od podziału 1:2 (duża prędkość obrotowa/niski moment obrotowy) do 9:10 (niska prędkość obrotowa/wysoki moment obrotowy). Długość pojedynczej spirali statora (ang. *Stage*) będzie również czynnikiem wpływającym na parametry pracy silnika. Wielokrotność długości pojedynczej spirali decyduje o ciśnieniu roboczym motoru i determinuje dostępny moment na wrzecionie;
- sekcja wału napędowego i nastawnego krzywego łącznika (ang. *Adjustable Drive-shaft Assembly*) ma za zadanie konwersję ekscentrycznego ruchu wału wynikającego z konstrukcji sekcji silnikowej na ruch centryczny wymagany dla prawidłowej pracy świda. Wiele typów silników dysponuje możliwością zmiany nastaw kątowych (stopnia odchylenia) dolnej części motoru. W praktyce wiertniczej HDD najczęściej stosuje się nastawy z przedziału od 1,5 do 2,3 stopnia. Im większy kąt skrzywienia silnika, tym większa potencjalna tendencja do budowania krzywizny (mniejszy promień trajektorii). Z kolei im większy dokręcony do silnika świder, tym mniejsza tendencja do budowania krzywizny;
- sekcja łożyskowa (ang. *Bearing Assembly*) jest odpowiedzialna za przekazanie rotacji oraz nacisku na świder. Przenosi zarówno obciążenia ściskające wynikające z procesu wiercenia, jak i obciążenia rozciągające pojawiające się w trakcie podciągania przewodu lub podczas operacji wyciągowych. Jednocześnie zabezpiecza przed negatywnym wpływem obciążeń promieniowych i momentów zginających. Spotyka się silniki z sekcją łożyskową w pełni uszczelnioną, smarowaną olejem, jak i smarowaną płuczką wiertniczą. Dolną część silnika jest wrzecionem zaopa-



**RYS. 4.** | Możliwe konfiguracje sekcji silnikowej stator-rotor (źródło: NOV Downhole)

trzonem w mufę z gwintem typu Regular. Do niej przykręcany jest świder trójgryzowy lub skrawający z momentem rekomendowanym przez producenta narzędzia.

W tab. nr 5 i 6 podano rekomendacje dotyczące konfiguracji dolnego zestawu przewodów wiertniczych w obszarze narzędzi w kontekście dominującej w profilu wiercenia formacji geologicznej. W przypadku dużego zróżnicowania geologicznego możliwe jest

wykonywanie otworu pilotowego sekcjami i zmiana oprzyrządowania w trakcie wiercenia (wyciąganie zestawu i zapuszczanie do otworu po zmianie konfiguracji). Dokonano rozróżnienia na cztery klasy wiertnic HDD i stowarzyszonych z nimi geometrii przewodów wiertniczych – przypisując każdej z nich zakres użytecznych średnic przewodu wiertniczego. Zakłada się przy tym, że dostępne wysokociśnieniowe pompy płuczkowe spełniają warunki hydrauliczne do współpracy

Formacja	Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe	Min. średnica silnika wgłębego	Rekomendowany typ świda
Niespoiste (piaski/pospółki, żwiry)			Jet bit/MT
Spoiste (gliny, iły)		3 3/4"	Jet bit/MT
Rumosz skalny		4 3/4"	Jet bit/MT
Skały bardzo miękkie	< 5 MPa	2 7/8"	Jet bit/MT
Skały miękkie	5–35 MPa	3 3/4–4 3/4"	TCI
Skały średnie	35–70 MPa	4 3/4–6 3/4"	TCI/PDC
Skały twarde	70–150 MPa	6 3/4–8"	TCI/PDC
Skały bardzo twarde	> 150 MPa	8–9 5/8"	TCI/PDC

Legenda:

Jet bit – niesymetryczna głowica (świder) hydromonitorowy

MT – trójgryzowy świder typu frezowego

TCI – trójgryzowy świder typu słupkowego

PDC – świder skrawający z ostrzami z polikrystalicznych diamentów

**TAB. 5.** | Typy formacji geologicznych vs metoda wiercenia otworu pilotowego

Klasa urządzenia wiertniczego	Średnica calizny przewodu wiertniczego	Średnica motoru	Połączenie gwintowe dla świdra	Średnica narzędzia pilotowego jet	Średnica narzędzia pilotowego motor	Średnica obudowy sondy dla systemu walk over	Średnica obciążnika dla systemu MGS lub GST
	cale	cale	-	cale	cale	cale	cale
MINI PF < 300 kN TQ < 15 kNm	2 3/8	-	2 7/8" REG	4 3/4-5 1/2	-	3	-
	2 7/8	3 1/8-3 3/4	2 7/8" REG 3 1/2" REG	5-6 1/2	4 3/4-6 1/2	3 1/2	3 3/4
	3 1/2	4 3/4	3 1/2" REG	5 7/8-7 3/8	6-7 7/8	3 3/4	3 3/4-4 3/4
MIDI 300-800 kN 15-50 kNm	3 1/2	4 3/4	3 1/2" REG 4 1/2" REG	6-8 3/4	6-8 3/4	4 3/4	3 3/4-4 3/4"
	4	6 3/4	3 1/2" REG 4 1/2" REG	6 1/2-8 3/4	7 7/8-8 3/4	5	4 3/4
	5	6 3/4	4 1/2" REG	8 1/2-9 7/8	8 1/2-9 7/8	6 3/4	6 3/4
MAXI 1000-2500kN 60-100 kNm	5	6 3/4	4 1/2" REG 6 5/8" REG	8 1/2-10 5/8	8 1/2-10 5/8	-	6 3/4"
	5 1/2	7 3/4-8	6 5/8" REG	9 7/8-12 1/4	9 7/8-13 3/4	-	6 3/4-8
	6 5/8	7 3/4-8	6 5/8" REG 7 5/8" REG	10 5/8-14	10 5/8-16	-	8
MEGA > 2500 kN > 120 kNm	5 7/8	7 3/4-8	6 5/8" REG	10 5/8-13 3/4	10 5/8-14 3/4	-	8
	6 5/8	8-9 5/8	6 5/8" REG 7 5/8" REG	12 1/4-14 3/4	12 1/4-17 1/2	-	8
	7 5/8	9 5/8	6 5/8" REG 7 5/8" REG	12 1/4-17 1/2	14-20	-	8-9 5/8

TAB. 6. | Konfiguracja dolnej części przewodu wiertniczego (BHA, Bottom Hole Assembly) w trakcie wiercenia otworu pilotowego

z silnikami wgłębnyymi o dedykowanej geometrii.

## SYSTEMY NAWIGACJI, POMIARÓW WGŁĘBNYCH I KONTROLI TRAJEKTORII

Jak wynika z poprzednich artykułów naszego cyklu, dla wykonania skomplikowanej trajektorii otworu kierunkowego niezbędne jest zmobilizowanie adekwatnych do skali przedsięwzięcia elektronicznych instrumentów służących lokalizacji sondy pomiarowej i nawigowaniu w otworze. Do praktycznej aplikacji można wybrać jeden z kilku dostępnych na rynku systemów. W pierwszym z nich (radiowy system walk over) mamy do czynienia ze śledzeniem i kontrolowaniem trajektorii. Sonda pomiarowa (nadajnik) emituje sygnał radiowy odbierany przez lokalizator powierzchniowy. Lokalizacja dokonywana jest z powierzchni

znajdującej się bezpośrednio nad sondą lub, w przypadku braku takiej możliwości, także z pewnego oddalenia od założonej osi otworu. Pomiar offsetowy jest użyteczny zwłaszcza w sytuacji, gdy utrudnione lub niemożliwe jest zajęcie pozycji nad nadajnikiem. Dokładność systemu i jego zasięg wgłębny są uzależnione w znacznym stopniu od rodzaju zastosowanej sondy. Te relatywnie proste w obsłudze i interpretacji systemy dostarczają informacji dotyczących aktualnej głębokości sondy pomiarowej (w stosunku do powierzchni nadległego terenu), inklinacji (pochylenia względem poziomu), orientacji czoła narzędzia, temperatury pracy sondy oraz stopnia naładowania baterii. Wiele dostępnych na rynku sond może współpracować z zasilaniem kablowym, dając możliwość realizacji dłuższych otworów bez konieczności wykonywania operacji związanych z wyciąganiem i zpuszczaniem przewodu do otworu. Dane

dotyczące pozycji, w jakiej znajduje się sonda, odbierane są przez operatora systemu i podlegają transmisji do odbiornika umieszczonego obok stanowiska wiertacza. Informacja o odległości horyzontalnej (AWAY) i głębokości szacowanej dla pozycji, w której znajduje się odbiornik, pozwala na dokładne realizowanie trajektorii zaplanowanej w układzie dwuwymiarowym, gdzie nie wykonuje się istotnych zmian azymutu. Dokładność pomiaru systemem walk over maleje wraz z głębokością, na której znajduje się sonda. System nie pozwala na precyzyjne określenie zmian azymutu (kierunku wiercenia). Jego wykorzystanie w praktyce ogranicza się do otworów o długościach do 500 m realizowanych na głębokościach do 30 m. System ten nie znajduje praktycznego zastosowania przy otworach wierconych po łukach o promieniach o długości powyżej 600 m, przy zmiennym azymucie o kontrolowanym promieniu krzywiz-



zny lub przy przekraczaniu rzek, kanałów czy innych przeszkód o znacznej rozciągłości. Urządzenia radiowej lokalizacji znajdują się na wyposażeniu większości urządzeń wiertniczych klasy mini (do 300 kN siły ciągnięcia) i częściowo także klasy midi (od 300 do 800 kN siły ciągnięcia).

*Technika HDD korzysta z dwóch możliwych koncepcji i strategii postępowania w trakcie wiercenia pilotowego: wiercenie hydromonitorowe (Jetting Assembly) i, jako alternatywa, wiercenie z użyciem silnika węgelnego (Motor Assembly)*

W przypadku projektów realizowanych przez urządzenia klasy maxi/mega, a także bardziej skomplikowanych przekroczeń zaplanowanych pod wiertnice należące do segmentu midi, powszechnie stosuje się systemy nawigacji magnetycznej MGS (*Magnetic Guidance System*). Metody te należą do kategorii MWD (*Measurement While Drilling*), umożliwiających ciągły pomiar parametrów wiercenia kierunkowego i ich transmisję w czasie rzeczywistym. Sondy pomiarowe zawierają wbudowane akcelerometry i magnetometry mierzące inklinację i azymut na danej głębokości. Pomiaru te muszą zostać powiązane ze stałym układem odniesienia, aby było możliwe wykonanie kalkulacji określających przebieg trajektorii otworu i oddających wszelkie rejestrowane zmiany kątowe dotyczące: czoła narzędzia (*tool face*), inklinacji (kąt pionowy) oraz azymutu (kąt horyzontalny). Sondy systemów MGS umieszczane są w obciążnikach wykonanych z wysokogatunkowych stopów niemagnetycznych. Sygnał sondy przekazywany jest, w większości przypadków, kablem jednożyłowym montowanym sukcesywnie wraz z postę-

pem wiercenia wewnątrz przewodu wiertniczego. Oprócz węgelnego sondy pomiarowej na system MGS składa się konsola wiertacza, interfejs, komputer i drukarka. Obciążnik niemagnetyczny łączy jest z pozostałymi elementami dolnego zestawu, takimi jak: łącznik orientujący (ang. *Orientation Sub* lub *PWD Sub*), krzywy łącznik w przypadku stosowania świda do techniki urabiania formacji strumieniem płuczki (ang. *Jetting Assembly*) lub silnik węgelną napędzający świder (ang. *Motor Assembly*). System charakteryzuje się wysoką dokładnością oraz niezawodnością działania. Pomiar inklinacji jest pewny i niezakłócony. Pomiaru azymutu dokonuje się w oparciu o ziemskie naturalne pole magnetyczne lub sztucznie stworzone na powierzchni terenu pole magnetyczne. Pomiar w pętli weryfikującej rozłożonej na powierzchni terenu wzdłuż osi otworu umożliwia nie tylko potwierdzenie pozycji narzędzia ustalonej na podstawie geometrycznych kalkulacji, ale pozwala na nawigowanie w obszarze, w którym występują istotne zakłócenia czy anomalie magnetyczne. W przypadku braku możliwości rozłożenia powierzchniowej pętli, można posiłkować się alternatywnym źródłem pola, jakim jest solenoid (*AC Beacon*). Jest on szczególnie często aplikowany w obszarze przeszkód wodnych o dużej rozciągłości lub w trakcie wiercenia pod niedostępnymi obszarami bagiennymi. Najpopularniejsze systemy MGS obsługu-

jące technikę HDD to Paratrack (źródło: Vector Magnetics) i Tensor – Tru Tracker (*Tensteer/Sharewell*). Obydwa systemy magnetyczne można zakupić lub wynająć od jednej z licencjonowanych firm serwisowych.

W przypadku silnych zakłóceń pola magnetycznego, które mogą wynikać z bliskiej obecności stalowych obiektów podziemnych (fundamenty, rurociągi), linii energetycznych, linii kolejowych, poruszających się powyżej linii wiercenia jednostek pływających, istnieje możliwość wykorzystania systemu odpornego na takie oddziaływanie. System DrillGuide GST (ang. *Gyro Steering Tool*) został opracowany i wdrożony przez spółkę serwisową Brownline. DrillGuide GST jest szczególnie przydatny w trakcie precyzyjnego wiercenia otworów kierunkowych w warunkach silnych zakłóceń pola magnetycznego. Kluczową rolę odgrywają tu żyroskopy. Dokładność takiego systemu sięga  $0,05^\circ$  w zależności od mierzonego parametru i jest teoretycznie (choć niekoniecznie w praktyce) wyższa niż dla systemów MGS starszej generacji. System żyrokompasowy nie jest zależny w swoim działaniu od północnego bieguna magnetycznego. Nie wykazuje też ograniczeń w zakresie głębokości wiercenia i, podobnie jak systemy magnetyczne, zapewnia ciągłą transmisję danych o aktualnym położeniu świda. Co do zasady, położenie sondy wynika z kalkulacji i nie jest weryfikowane przez pętlę



**RYŚ. 5.** Elementy systemu nawigacji magnetycznej Paratrack (źródło: Prime Horizontal)

powierzchniową. Zasięg wiercenia systemem żyrokompasowym GST, podobnie jak i systemami magnetycznymi, oceniany jest obecnie na około 5 km, natomiast udowodniona głębokość wiercenia przekracza 300 m.

W ostatnich latach kanadyjska firma Direct Horizontal Drilling zaadaptowała dla techniki HDD system nawigacji i pomiarów wgłębnych EM MWD. Wykorzystane narzędzie nawigujące nie wymaga montażu kabla transmitującego sygnał wewnątrz przewodu wiertniczego, co jest charakterystyczne dla innych metod nawigacji stosowanych w HDD. Firma wykorzystuje narzędzie elektromagnetyczne (*EM MWD Tool*) wyprodukowane i zmodyfikowane przez firmę Boregyde Inc. System EM zawiera wysokiej klasy, bardzo dokładne sensory odpowiadające za pomiary parametrów wiercenia kierunkowego oraz zintegrowane z nimi sensory ciśnieniowe. Narzędzie jest tylko nieco dłuższe od konwencjonalnych magnetycznych sond pomiarowych zasilanych kablem, jednak dzięki jego zastosowaniu można zyskać na dokładności pomiarów. Sonda jest zasilana za pomocą pakietu baterii. Informacje do inżyniera kierunkowego przekazywane są za pomocą opatentowanego systemu WETS (ang. *Windows Electro-Magnetic Telemetry System*) poprzez przewód wiertniczy. System pracuje z różną częstotliwością próbkowania danych zawierających informacje o położeniu czoła narzędzia (*tool face*), inklinacji i azymucie. Kompletna transmisja sekwencji danych i dokładne ustalenie pozycji jest zakończone przed dołożeniem kolejnego odcinka przewodu wiertniczego. Dla podniesienia precyzji nawigacji można zastosować też powierzchniowe pętle pomiarowe zasilane prądem stałym.

Chęć połączenia zalet dwóch systemów nawigacji – żyrokompasowego i magnetycznego, legła u podstaw opracowania instrumentów hybrydowych. Jednym z takich systemów jest zaprezentowany przez firmę Sharewell produkt o nazwie Opti-Trac Gyro. W zamyśle jest kombinacją dwóch układów pomiarowych: magnetycznego o wysokiej rozdzielczości i pakietu Fibre Optic Gyro (FOG). Do niezakłóconej pracy wymaga

umieszczenia sondy pomiarowej w obciążniku wykonanym ze stopów niemagnetycznych.

Dzięki stosowaniu systemów magnetycznych, żyrokompasowych i mieszanych (hybrydowych) możliwe jest korzystanie z metody Intersect (ang. *Meeting in the Middle*) polegającej na wierceniu dwóch otworów, których trajektorie przecinają się w wyznaczonym (zaplanowanym) miejscu na głębokości kilkudziesięciu czy nawet ponad 100 m pod powierzchnią. Magnetyczny system nawigacji wspierany jest przy tym przez dodatkowe źródła pola (np. rotating magnet, axial magnet), a system żyrokompasowy przez tryb Radar. Nawigacja w otworze powinna być prowadzona przez wyspecjalizowanego w tej dziedzinie inżyniera. Jego rola, jako operatora systemu i jako interpretatora, jest kluczowa z punktu widzenia powodzenia projektu.

*Wybór elementów przewodu wiertniczego i narzędzi wiertniczych jest krytycznym etapem w procesie planowania projektów HDD*

Systemy nawigacji wzbogacane są o szereg czujników informujących o ciśnieniu panującym wewnątrz przewodu wiertniczego i w przestrzeni pierścieniowej otworu pilotowego. Pomiar ciśnienia wgłębnego rejestrowany jest i przekazywany w czasie rzeczywistym razem z danymi wiercenia kierunkowego. W czasie, gdy sonda jest podłączona do zasilania, system w sposób ciągły rejestruje ciśnienia w obrębie dolnej części przewodu. Na podstawie wartości ciśnień mierzonych w stanach statycznych i dynamicznych (w trakcie przepływu płuczki) można wnioskować o stanie technicznym otworu, kontrolować skuteczność transportu zwiercin, wdrażać procedury naprawcze, monitorować odporność formacji na ciśnienie, a także określać maksymalną dopuszczalną prędkość wiercenia.

Monitorowanie ciśnień wgłębnych znalazło powszechne zastosowanie w realizacji większości dużych projektów wiertniczych.

Do wgłębnych systemów pomiarowych należy zaliczyć też pomiar inklinacji w czasie rzeczywistym, odbywający się w obrębie dolnej części silnika wgłębnego, pomiar rzeczywistych nacisków wywieranych na narzędzie wierzące oraz moduły tensometryczne umożliwiające pomiar rzeczywistych sił instalacyjnych. Te ostatnie montuje się w bezpośredniej bliskości rurociągu.

## PODSUMOWANIE

Wybór elementów przewodu wiertniczego i narzędzi wiertniczych jest krytycznym etapem w procesie planowania projektów HDD. Decydujące znaczenie ma tutaj praktyka wiertnicza i doświadczenie kontraktora zdobyte w dotychczasowej działalności. Bezkompromisowe podejście do tego problemu skutkuje obniżeniem ryzyka wystąpienia komplikacji i awarii wiertniczych. Dbłość o jakość procedur eksploatacyjnych osprzętu wgłębnego oraz prawidłowa selekcja i konfiguracja dolnego zestawu przewodu wiertniczego jest istotnym wyróżnikiem profesjonalnych podmiotów. Planując projekt, powinniśmy wybierać elementy z pewnym zapasem i współczynnikiem bezpieczeństwa, adekwatnym do skali powierzonych nam zadań. Warto pamiętać, że nie wszystkie typy narzędzi są do zastosowania przez każdą spółkę wiertniczą. Nie ma też narzędzi na tyle uniwersalnych, że możemy je stosować bez względu na napotkane warunki geologiczne i dostępną technikę wiercenia. |

W najbliższych numerach kwartalnika „Inżynieria Bezwykopowa” zostaną opublikowane kolejne części artykułu poświęcone następującym zagadnieniom:

**Część 6:** Narzędzia do poszerzania otworów i instalacji rurociągów

**Część 7:** Programy technologiczne i technika wiercenia

**Część 8:** Dokumentacja i raporty. Wymagania kompetencyjne

**Część 9:** Zarządzanie projektem. Harmonogram i budżet