



Zastosowanie ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych

ZENON WILK*, BOGDAN ZYGMUNT

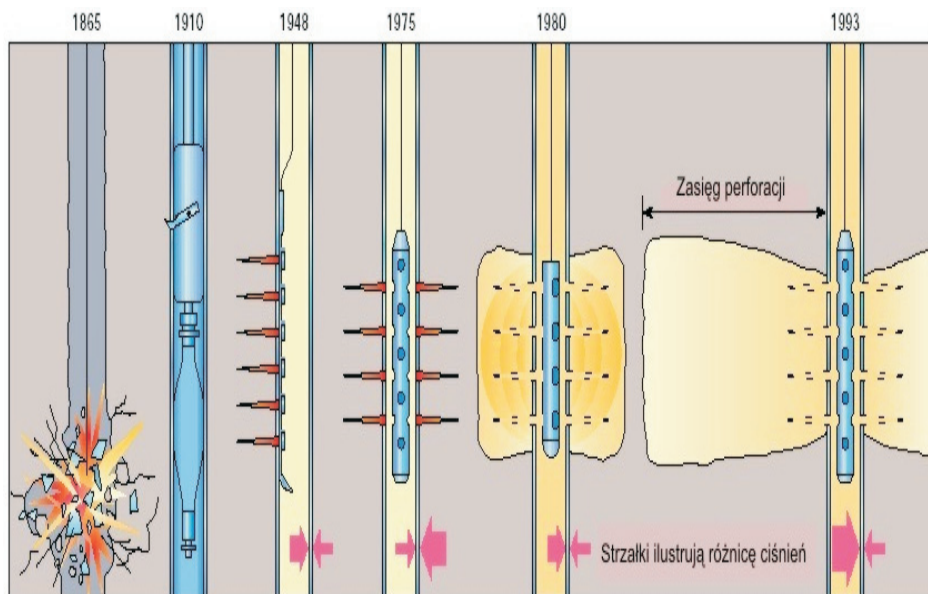
*Instytut Przemysłu Organicznego, Oddział Krupski Młyn,
03-236 Warszawa, ul. Annopol 6,
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy zaprezentowano charakterystykę wyrobów przeznaczonych dla prac strzałowych w otworach wiertniczych wykorzystujących ukierunkowane działanie materiałów wybuchowych. Przedstawiono przykłady nowych krajowych konstrukcji ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów z zastosowaniem nowoczesnych technologii produkcji wkładek kumulacyjnych o wysokich gęstościach prasowanych z proszków metali oraz wysokoenergetycznych materiałów wybuchowych zawierających fluoropolimery do prasowania ładunków o wysokiej gęstości.

Słowa kluczowe: ładunki kumulacyjne, materiały wybuchowe — zastosowania
Symbole UKD: 662.1/.4.004

1. Wprowadzenie

Górnictwo nafty i gazu jest jedną z dziedzin gospodarki, w której ukierunkowana energia detonacji materiału wybuchowego (MW) jest wykorzystywana na wielką skalę w celu wykonania pracy użytecznej. W dziedzinie tej technika strzelnicza znalazła zastosowanie przy pracach udostępniających, ratunkowych i specjalnych (np. torpedowanie lub szczelinowanie złoża) prowadzonych w otworach wiertniczych na głębokości do 10 km. Technika wydobywania ropy naftowej z upływem lat ulegała ciągłym ulepszeniom. Postęp w dziedzinie techniki udostępniania złóż poprzez odwierty geologiczne przedstawiono chronologicznie na rysunku 1 [1].



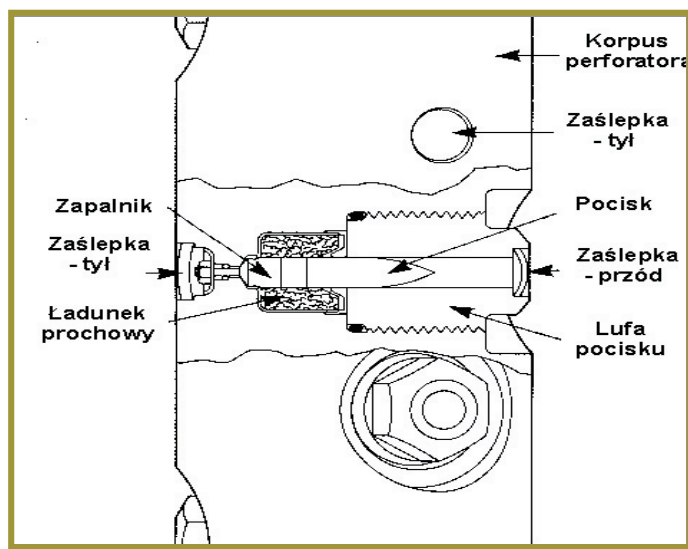
Rys. 1. Rozwój nowych technik stosowanych do perforacji odwiertów geologicznych

W początkowym okresie (XIX w.) wiercono szyby w miejscach, w których na podstawie obserwacji powierzchniowej spodziewano się obecności ropy naftowej. W wypadku dowiercenia się do złoża o słabej wydajności, na dnie szybu umieszczano ładunek silnego kruszącego materiału wybuchowego, początkowo ciekłej nitrogliceryny oraz, nieco później, dynamitu wynalezionej przez A. Nobla. Wybuch powodował powstanie kawerny w szybie i spękanie dalszych obszarów otaczającego złoża, dzięki czemu powiększał się wypływ medium. Operacja taka jest zwana torpedowaniem złoża ropnoślazowego. Po lokalnym wyczerpaniu złoża, dalsze pogłębianie storpedowanego szybu było niemożliwe z powodu nieodwracalnego zniszczenia struktury geologicznej złoża.

Postępujący wzrost zapotrzebowania na ropę naftową w początkach XX wieku wywołał gwałtowny rozwój techniki wiertniczej. Wykonywano coraz liczniejsze i coraz głębsze odwierty z wykorzystaniem stalowych rur okładzinowych, które stabilizowały ściany otworu geologicznego i umożliwiały precyzyjne udostępnianie wybranych poziomów wydobywczych. Zagadnieniem szczególnej wagi stało się skuteczne udostępnienie złoża, dzięki wykonaniu odpowiedniej ilości otworów w rurach okładzinowych na określonej głębokości. Operacja taka jest nazywana perforacją rur okładzinowych. Proponowano różne rozwiązania urządzeń do perforacji orurowania: mechaniczne, elektromechaniczne lub hydrauliczne. Później pojawiły się również rozwiązania proponujące wykorzystanie energii materiałów wybucho-

wych. W latach 30. XX wieku zastosowano tzw. metodę pociskową. Polegała ona na wystrzeliwaniu pocisków prostopadle w kierunku rur okładzinowych odwiertu z urządzenia podobnego do krótkolufowego moździerza. Przykład konstrukcji perforatora pociskowego przedstawiono na rysunku 2 [2].

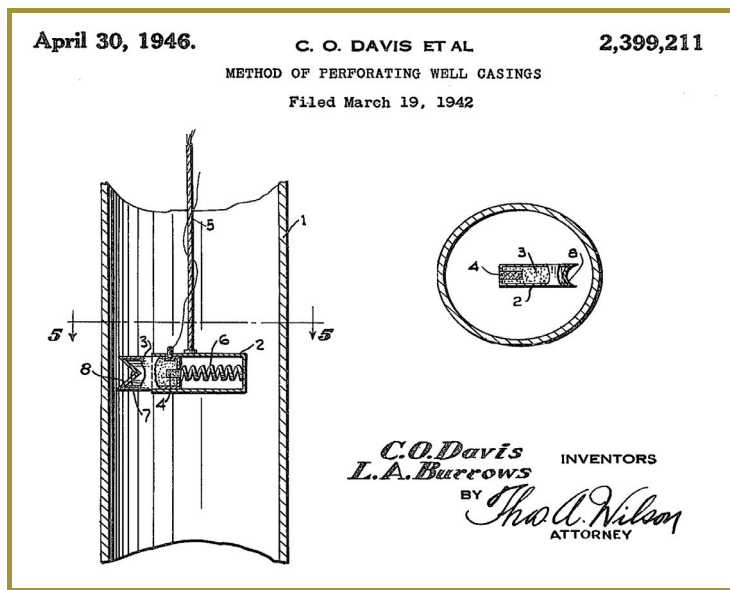
Pociski wystrzeliane były promieniowo do obwodu ururowania w niewielkich odstępach w osi odwiertu. Wprowadzenie perforacji pociskowej było postępowaniem w stosunku do dawniej stosowanego torpedowania i metod mechanicznych. Jednak metoda ta była kłopotliwa i nie dawała w pełni zadowalających rezultatów. Zabieg perforacji był pracochłonny przy stosunkowo małej efektywności. Pociski często nie tylko nie przebijały rur okładzinowych, ale uderzając pod kątem ostrym w ścianę rury, odbijały się od niej (rykoszet) i spadając na dno odwiertu, utrudniały dalsze jego pogłębianie.



Rys. 2. Przykład konstrukcji perforatora pociskowego

W krótkim czasie po II wojnie światowej, doświadczenia uzyskane w konstrukcji przeciwpancernych ładunków kumulacyjnych (ŁK) zostały wykorzystane do perforacji odwiertów naftowych. Opracowane i wypróbowane zostały różnego rodzaju systemy perforacji i inne środki strzałowe z ŁK służącymi do obcinania rur okładzinowych, wykonywania szczelin wzdłużnych lub do usuwania twardych przeszkód w trakcie wiercenia otworów. Na rysunku 3 przedstawiono najwcześniejsze spotykane w literaturze przedmiotu rozwiązanie dotyczące zastosowania ładunku kumulacyjnego do perforacji rur okładzinowych otworu wiertniczego według patentu amerykańskiego [3].

Pierwsze doniesienia o szerszym komercyjnym zastosowaniu na polach naftowych Kalifornii w USA nowej technologii — tzw. perforacji kumulacyjnej pochodzą z 1946 roku Przedstawił je Robert H. McLemore w *The Oil Weekly* [4]. Perforatory z ładunkami kumulacyjnymi okazały się bardzo efektywne i w krótkim czasie wyparły stosowane dotychczas perforatory pociskowe.



Rys. 3. Metoda perforacji rur okładzinowych odwiertu za pomocą ładunku kumulacyjnego [3]: 1 — stalowa rura okładzinowa; 2 — konstrukcja nośna ładunku; 3 — ładunek MW; 4 — detonator; 5 — lina nośna; 6 — mechanizm sprężynowy; 7 — wgłębienie kumulacyjne; 8 — stożkowa lub sferyczna metalowa wkładka kumulacyjna

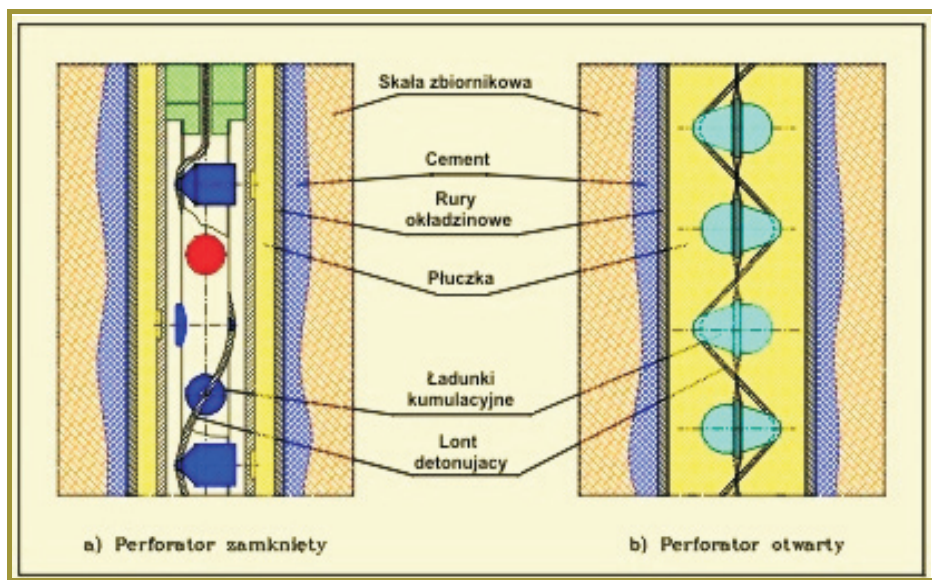
2. Technika perforacji kumulacyjnej odwiertów

Nowoczesne metody poszukiwań geologicznych pozwalają na określenie z dużym prawdopodobieństwem położenia złóż. W miejscu wskazanym przez geologów wiercony jest szyb na z góry określoną głębokość, w trakcie wiercenia pobiera się próbki złóż z różnych głębokości. Wiercony otwór wypełniony jest wodą z dodatkami (tzw. płuczką), której zadaniem jest usuwanie zwiercin oraz hydrostatyczne równoważenie ciśnienia występującego w złożu. Równoległe z wierceniem wprowadza się do szybu jedną lub dwie współśrodkowe kolumny stalowych rur, tzw. orurowanie. Przestrzeń między rurą i odwiertem, względnie między dwiema rurami i odwiertem, wypełnia się wprowadzonym pod ciśnieniem płynnym betonem, który po związaniu orurowania ze ścianką otworu stabilizuje mechanicznie otwór

wydobywcy. Po ukończeniu prac wiertniczych, przystępuje się do perforowania rur okładzinowych w celu utworzenia drogi dla wypływu ropy lub gazu ze złoża do wnętrza orurowania i dalej na powierzchnię ziemi.

Perforacja kumulacyjna jest obecnie powszechnie stosowaną metodą uzyskiwania połączenia pomiędzy złożem i otworem. Stosuje się ją również w celu udostępniania innych złóż, np. wód mineralnych, geotermalnych, siarki. Jest najbardziej efektywną pod względem kosztów metodą osiągnięcia tego celu. Technikę perforacji kumulacyjnej stosuje się zarówno w pracach poszukiwawczych nowych złóż, jak i w celu udostępniania złóż znanych oraz w celu zwiększenia wydajności wydobywania złoża już eksploatowanego.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat zastosowania dwóch podstawowych typów perforatora: zamkniętego i otwartego [5].



Rys. 4. Przekrój otworu wiertniczego z perforatorem kumulacyjnym: a) w systemie zamkniętym; b) w systemie otwartym

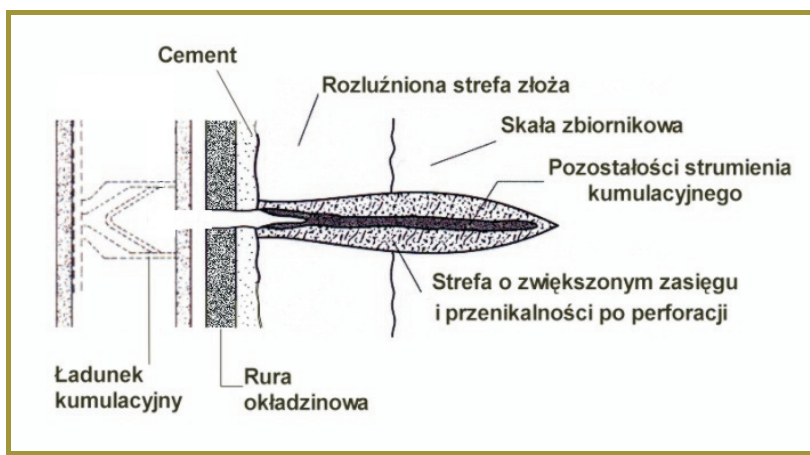
Perforatory typu zamkniętego, tzw. rurowe (rys. 4a) charakteryzują się tym, że ładunki kumulacyjne i środki inicjowania znajdują się wewnątrz hermetycznego rurowego pojemnika, tzw. perforatora, odpornego na wysokie ciśnienie. Po wykonaniu zabiegu perforacji pojemnik jest wyjmowany w całości z odwiertu, co gwarantuje brak metalowych pozostałości w otworze. Perforatory typu otwartego, tzw. bezkorpusowe (rys. 4b), charakteryzują się tym, że hermetyczne są zarówno ładunki kumulacyjne, jak i środki inicjowania, które montuje się w metalowej uprzęży

i opuszcza do otworu. Po zabiegu perforacji otwór jest zanieczyszczony pozostałościami konstrukcji nośnej oraz materiałem hermetycznej obudowy ładunków.

Niezbędnymi elementami zestawu środków strzałowych do każdego rodzaju perforatora są ładunki kumulacyjne i środki inicjowania detonacji odpowiednie do warunków panujących w otworze (temperatury i ciśnienia hydrostatycznego na określonej głębokości). Dla perforatora typu zamkniętego (rys. 4a) elementami zestawu są: ładunki kumulacyjne, lont detonujący i zapalnik o wymaganej wytrzymałości na temperaturę. Odporność na ciśnienie hydrostatyczne w otworze całemu zestawowi zapewnia odpowiednio wytrzymała konstrukcja obudowy perforatora. Dla perforatora typu otwartego (rys. 4b) elementami zestawu perforacyjnego są: ładunki kumulacyjne, lont detonujący i specjalny zapalnik, wszystkie o wymaganej wytrzymałości na temperaturę i ciśnienie hydrostatyczne.

Zasadę działania perforacji kumulacyjnej przedstawiono na przykładzie konstrukcji perforatora rurowego (rys. 5). Detonacja ładunków kumulacyjnych inicjowana jest za pomocą magistrali lontu detonującego o prędkości detonacji około 7000 m/s. Po detonacji ŁK następuje proces formowania się strumienia kumulacyjnego, który przebija kolejne warstwy: ściankę perforatora, przenika warstwę płuczki, przebija ściankę rury okładzinowej, warstwę cementu i penetruje skałę złoża. Większa część masy metalowej wkładki kumulacyjnej tworzy zwartą zbitkę. Poruszająca się z małą prędkością zbitka często może zaczopować uzyskany poprzez działanie strugi kumulacyjnej otwór perforacyjny, obniżając przez to znacznie skuteczność zabiegu.

Efektem perforacji jest udostępnienie złoża lub poprawienie produktywności odwiertu. Umożliwia to dalsze prowadzenie innych zabiegów intensyfikacji



Rys. 5. Przekrój otworu wydobywczego i otaczającego go złoża po perforacji wykonanej za pomocą ładunku kumulacyjnego umieszczonego w perforatorze zamkniętym

wydobycia, np. szczelinowania hydraulicznego, chemicznego trawienia złoża lub kontrolowania stopnia zapiaszczenia przy wydobyciu węglowodorów gazowych. Perforacja kumulacyjna znalazła powszechne zastosowanie do perforacji odwiertów geologicznych przede wszystkim ze względu na wysoką efektywność zabiegu. Ogromne ilości używanych ładunków kumulacyjnych, stawiane im wysokie wymagania ze względu na ekstremalne warunki stosowania (wysokie temperatury i ciśnienia, ograniczone wymiary, wymagana niezawodność działania) spowodowały powstanie licznych zespołów i ośrodków naukowo-badawczych zajmujących się zagadnieniami konstrukcji, technologii i badań dotyczących ŁK do perforacji odwiertów. Ośrodki te związane są głównie z koncernami naftowymi lub branżowymi instytutami naukowymi.

3. Wymagania stawiane ładunkom kumulacyjnym do perforacji odwiertów

Zabieg perforacji jest najbardziej krytyczną częścią procesu wykonania odwiertu geologicznego lub wydobywczego. Niewłaściwie przeprowadzona lub niepełna perforacja może prowadzić do błędnych wniosków wskutek obniżenia wydajności wydobycia, a nawet stwarza zagrożenie przeoczenia bogatego złoża. Prawidłowe przeprowadzenie perforacji odwiertu wymaga uwzględnienia wielu zagadnień: konstrukcji odwiertu, właściwości formacji skalnej, rodzaju i geometrii złoża oraz warunków fizykochemicznych panujących w odwiercie (wysokie ciśnienie i temperatura, kwasowość). Dla wyniku perforacji (tzn. rozmiarów, ilości i orientacji kanałów perforacyjnych) i związanej z tym wydajności wydobycia medium, szczególne znaczenie ma zastosowanie do perforacji ładunków kumulacyjnych o wysokiej efektywności w warunkach panujących w odwiercie. Na głębokości kilku tysięcy metrów ciśnienie płuczki wynosi kilkadziesiąt MPa, temperatura może znacznie przekraczać 100°C. ŁK lub perforatory muszą więc być hermetycznie zamknięte, a MW musi mieć cechy wysokiej termoodporności chwilowej i wytrzymywać wielogodziną ekspozycję w temperaturze do 150°C, a nawet ponad 200°C.

Ze względu na konstrukcję otworu geologicznego oraz małą odległość od przebijanej, wielowarstwowej przegrody, ŁK w odwiertach geologicznych stosowane są w warunkach daleko odbiegających od optymalnych. Ze względu na warunek unikania zniszczenia orurowania otworu, wymiary gabarytowe ładunków wynoszą od 30 do maksymalnie 80 mm przy masie ładunku MW nieprzekraczającej 7-40 g. Odległość ładunku kumulacyjnego od przegrody (tzw. dystans) z reguły nie przekracza wartości jednej średnicy ładunku. Dodatkowo, konstrukcja ładunku kumulacyjnego o ograniczonych wymiarach i zmniejszonej masie MW oraz niski impuls inicjujący pochodzący od lontu detonującego nie sprzyjają stworzeniu dobrych warunków dla dostatecznie silnego i pewnego pobudzenia detonacji.

Szczególnie istotnym i specyficznym wymaganiem dla perforacji kumulacyjnej odwiertów jest warunek, aby tworząca się z wkładki zbitka nie czopowała utworzonego przez strumień kumulacyjny kanału perforacyjnego, ponieważ stwarza to zagrożenie wyciągania fałszywych wniosków o wydajności złoża. W związku z tym istnieje potrzeba zastosowania do ładunków stosowanych w górnictwie otworowym i badaniach geofizycznych takich wkładek kumulacyjnych, które nie tworzą masywnej zbitki lub jest ona niewielka i krucha.

4. Krajowe rozwiązania w technice perforacji odwiertów

W Polsce, od końca lat 50. XX wieku projektowaniem i konstrukcją ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów zajmuje się Instytut Przemysłu Organicznego — Oddział w Krupskim Młynie we współpracy z przedsiębiorstwami geofizycznymi oraz Instytutem Nafty i Gazu w Krakowie [6, 7]. Ciągłość prowadzonych prac badawczych w tej dziedzinie sprawia, że większość środków techniki strzelniczej dla polskiego górnictwa naftowego została zaprojektowana, zbadana i wdrożona przez INiG oraz IPO [8]. Przez wiele lat producentem opracowanych w IPO środków strzałowych dla krajowego górnictwa nafty i gazu były Zakłady Tworzyw Sztucznych NITRON S.A. w Krupskim Młynie. W latach 90. efektywne perforatory rurowe zostały opracowane również przez HEIF sp. z o.o. w Warszawie we współpracy z Przedsiębiorstwem PETROMIN sp. z o.o. w Wołominie [9].

Od kilkunastu lat Oddział IPO prowadzi produkcję doświadczalną i wyrób środków strzałowych w tym zakresie dla krajowych odbiorców. IPO — Oddział w Krupskim Młynie jest producentem różnorodnych środków strzałowych odpornych na temperaturę i wysokie ciśnienia, umożliwiającymi także przeprowadzenie perforacji odwiertów na dużych głębokościach.

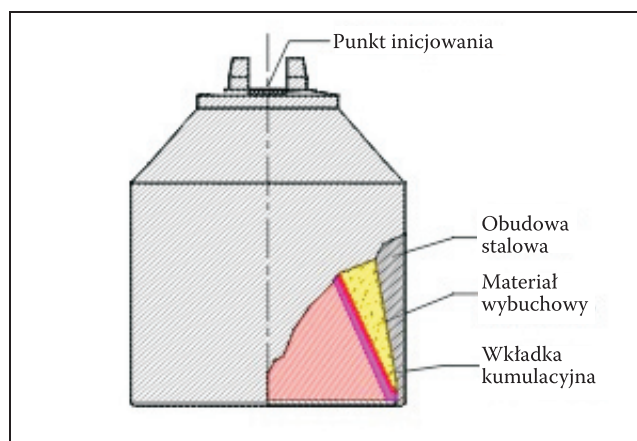
Do perforatorów bezkorpusowych — otwartych produkowane są kompletne zestawy środków strzałowych: ładunki kumulacyjne w odpornych na ciśnienie obudowach szklanych, lont detonujący w powłoce metalowej i głowiczki zapalnikowe. Wszystkie elementy tego zestawu mogą być stosowane w temperaturze wewnątrz odwiertu do 130°C i przy ciśnieniu hydrostatycznym do 70 MPa. Opracowany został również analogiczny zestaw środków strzałowych o większej odporności na temperaturę (z oktogenem), który może być stosowany w temperaturze do 190°C.

Do perforatorów korpusowych — zamkniętych produkowane są kompletne zestawy środków strzałowych o wytrzymałości na temperaturę do 150°C (z heksogenem): ładunki kumulacyjne w obudowach metalowych o wysokiej efektywności, lont detonujący i zapalniki. Opracowane są również analogiczne zestawy środków strzałowych o podwyższonej odporności na temperaturę, które mogą być stosowane w temperaturze wewnątrz odwiertu do 190°C (z oktogenem), a nawet do 250°C (z materiałem termoodpornym — PYX).

Prace badawcze w zakresie modernizacji środków strzałowych, nowych konstrukcji i technologii produkcji ładunków kumulacyjnych do efektywnej perforacji odwiertów naftowych Oddział Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie prowadzi, wychodząc naprzeciw potrzebom polskiego górnictwa nafty i gazu. W ostatnich latach wdrożone zostały metody analizy i optymalizacji konstrukcji ładunków kumulacyjnych z wykorzystaniem komputerowych metod obliczeniowych i symulacji zjawiska kumulacji w połączeniu z weryfikacją praktyczną za pomocą rentgenografii błyskowej. Dla realizacji programu badań w tym zakresie podjęto współpracę z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie [10-15].

4.1. Nowe elementy w konstrukcji ładunków kumulacyjnych

Na parametry użytkowe prawidłowo skonstruowanego i wykonanego ładunku kumulacyjnego (ŁK) decydujący wpływ wywierają dwa elementy: wkładka kumulacyjna oraz materiał wybuchowy, połączone w procesie technologicznym w jeden nierozłączny układ. Schemat konstrukcji ładunku kumulacyjnego na przykładzie jednego z wyrobów typu ŁOKT-H-Fe-33-150 przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat konstrukcji ładunku kumulacyjnego do perforacji typu ŁOKT-H-Fe-33-150

W celu uzyskania maksymalnego przebiecia należy stosować MW charakteryzujące się możliwie wysokim ciśnieniem detonacji, co w praktyce oznacza wysoką prędkość detonacji. Rodzaj materiału wybuchowego zastosowanego w ładunku kumulacyjnym przeznaczonym do perforacji determinuje również odporność ŁK na temperaturę.

W wyniku podjętych prac opracowane zostały i zastosowane do produkcji środków strzałowych nowe MW, składające się z krystalicznych wysokoenergetycz-

nych MW z dodatkiem krajowych fluoropolimerów. Dzięki wysokiej odporności chemicznej i termicznej tych polimerów (odpowiedniki teflonu i vitonu), możliwe jest prasowanie z ich dodatkiem ładunków MW o wymaganej wysokiej odporności na temperaturę do prac poszukiwawczych nafty i gazu na dużych głębokościach. Silne kruszące MW (heksogen, oktogen) z dodatkami fluoropolimerów, przeznaczone do prasowania ładunków otrzymały odpowiednio nazwy handlowe: *heksoflen* i *oktoflen* [16-20].

Drugi istotny element ładunku — metalowa wkładka kumulacyjna — jest wykonana z wysoką precyzją co do symetrii osiowej oraz przekrojów poprzecznych. Jego masa, kształt, wymiary geometryczne, rodzaj materiału, struktura i gęstość są wynikiem wieloletnich doświadczeń technologicznych i badań optymalizacyjnych [21]. Wkładki do ładunków kumulacyjnych osiowo-kierunkowych mogą być otrzymane z zastosowaniem różnego rodzaju technologii. Mogą być one wykonywane techniką tłoczenia lub wyoblania z odpowiedniej blachy, metodą skrawania lub wykonywane z wykorzystaniem technologii metalurgii proszków. W Oddziale IPO w Krupskim Młynie do produkcji wkładek kumulacyjnych stosuje się odmianę technologii metalurgii proszków — metodę prasowania matrycowego [22-24]. Wkładki wykonuje się w szerokim zakresie kształtów i rozmiarów, o średnicach od 16 mm do 125 mm (rys. 7).



Rys. 7. Asortyment wkładek kumulacyjnych wytwarzanych z proszków metali

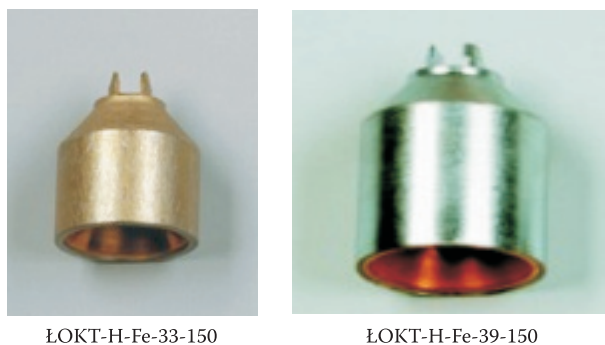
4.2. Przykłady nowych konstrukcji ładunków kumulacyjnych do perforacji

W najnowszych rozwiązaniach IPO dotyczących konstrukcji i technologii produkcji ładunków kumulacyjnych o zwiększonej efektywności przyjęto do stosowania nowe komponenty [25]:

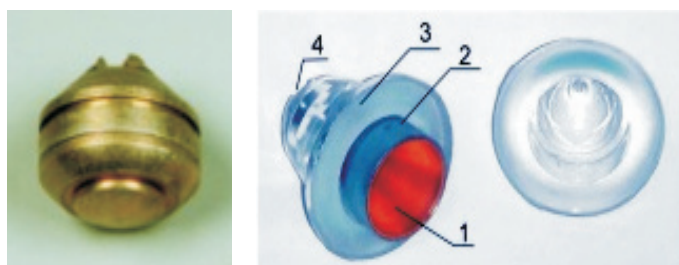
- wkładki kumulacyjne z prasowanych proszków metali, w tym kompozycji o wysokich gęstościach (do 15 g/cm^3) zawierające wolfram i miedź oraz wkładki o konstrukcji warstwowej,

- materiały wybuchowe (MW) do prasowania, zawierające heksogen lub oktogen z dodatkiem fluoropolimerów — polskich odpowiedników teflonu i witonu.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykłady nowych konstrukcji ładunków przeznaczonych do perforacji odwiertów.



Rys. 8. Widok ładunków kumulacyjnych przeznaczonych do perforatorów zamkniętych typoszeregu ŁOKT-H-Fe



Rys. 9. Widok ładunków kumulacyjnych przeznaczonych do perforatorów otwartych: a) typ ŁOKTC-Fe-27-130-70, w obudowie stalowej, do perforatora systemu małośrednicowego, opuszczanego do odwiertu poprzez rurki wydobywcze; b) typ ŁOKTC-H-Sz-130-70, w obudowie szklanej — widok przed zaklejeniem: 1 — wkładka kumulacyjna; 2 — korpus metalowy właściwego układu kumulacyjnego; 3 — obudowa szklana; 4 — rowek na lont — miejsce inicjowania ładunku

5. Podsumowanie

Oddział Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie prowadzi ciągle prace w zakresie projektowania, badań i produkcji doświadczalnej środków strzałowych dla potrzeb krajowego górnictwa otworowego. Szczególnie w ostatnich latach podjęto wiele prac w zakresie modernizacji konstrukcji i technologii

produkcji ładunków kumulacyjnych w celu zwiększenia efektywności ich działania. Zrealizowany został projekt badawczy celowy i dużo innych prac badawczych, które stały się podstawą realizowanej w IPO-Krupski Młyn pracy doktorskiej w tej dziedzinie.

W celu dokonania postępu technologicznego w dziedzinie ŁK do perforacji odwiertów, konieczne było dokonanie kompleksowych zmian konstrukcyjnych i materiałowych z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć nauki i technologii. W pierwszej kolejności należało zmodyfikować stosowany dotychczas w ładunkach materiał wybuchowy w kierunku podwyższenia jego odporności na temperaturę i parametrów detonacyjnych. Perspektywicznym kierunkiem było zastosowanie fluoropolimerów do flegmatyzacji krystalicznych MW oraz włączenie oktogenu jako składnika ładunków kumulacyjnych i lontów detonujących do prac strzałowych w głębokich wysokotemperaturowych odwiertach. Drugim ważnym kierunkiem niezbędnym do osiągnięcia założonego celu była zmiana technologii wytwarzania wkładek kumulacyjnych wytwarzanych dotychczas metodami obróbki mechanicznej przez tłoczenie z blachy lub przez wytaczanie z pręta. Duże możliwości kształtowania pożądanych cech użytkowych wkładek kumulacyjnych do ładunków dla celów geofizycznych stwarza technologia metalurgii proszków. Zaadaptowano tę technologię do wytwarzania precyzyjnych wkładek kumulacyjnych o właściwościach niemożliwych do uzyskania innymi technologiami.

Uznano również za niezbędne wykorzystanie nowoczesnych metod symulacji komputerowych opracowanych przez polskich naukowców z WAT do projektowania i optymalizacji opracowywanych konstrukcji ładunków kumulacyjnych. Przeprowadzone symulacje komputerowe detonacji ładunków kumulacyjnych oraz formowania się strumienia kumulacyjnego potwierdziły stosowalność funkcjonujących modeli oraz kodów komputerowych do prognozowania działania ładunków. Wprowadzone założenia do modeli pozwoliły uzyskać wyniki symulacji zbliżone do uzyskanych eksperymentalnie metodami rentgenografii błyskowej.

Opracowane, wdrożone do produkcji i stosowania ładunki kumulacyjne o nowych cechach użytkowych pozwalają na skuteczniejsze poszukiwania i eksploatację złóż ciekłych i gazowych surowców mineralnych przez krajowe przedsiębiorstwa nafty i gazu.

Artykuł wpłynął do redakcji 6.11.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w styczniu 2007 r.

LITERATURA

- [1] L. BEHRMANN i in., *Quo Vadis, Extreme Overbalance?*, Oilfield Review, nr 8, 1996.
- [2] *Atlas Wireline Services-Perforating Capabilities*, Western Atlas Int., Inc. (USA), 1990.
- [3] Patent US2399211. *Method of Perforating Well Casing*, 1946.

-
- [4] H. P. TARDIF, *Die Hohlladung*, Explosivstoffe 8, 1957, 155-166.
- [5] Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Nowoczesne środki strzałowe do perforacji otworów wiertniczych*, New Trends in Research of Energetic Materials — II Seminar, Pardubice, Czechy, 1999.
- [6] W. ZAŁACHOWSKI, B. DĄBROWSKI, T. MAJERAN, R. ROGOWSKI, J. RÓŻAŃSKI, *Zastosowanie ładunków kumulacyjnych w górnictwie*, Sprawozdanie z prac badawczych IPO Warszawa — Oddział w Krupskim Młynie, 1957-1958.
- [7] W. ZAŁACHOWSKI, W. KLARA, S. POCIEJ, *Dzisiejszy stan techniki perforowania Odwiertów*, Wiadomości Naftowe, nr 10 (72), 1961, 217-222.
- [8] R. PRZYBYLIK, Z. WILK, *Nowoczesne środki strzałowe do perforacji otworów wiertniczych w Polsce*, Giełda Technologii Chemicznej — Prochemia, Warszawa, 1994.
- [9] H. DERENTOWICZ, J. BAGROWSKI, E. BADURA, J. MANTURO, S. STASIAK, M. ŚWIETLIK, T. WIECHNO, *Perforatory rurowe modułowe typu PRM stosowane do perforacji rur w otworach wiertniczych: badania, dopuszczenia, wykorzystanie*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa — Konferencje: nr 28, Katowice, 1999, 163-176.
- [10] K. JACH, *Modelowanie komputerowe zjawisk kumulacyjnych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1990.
- [11] K. JACH, R. ŚWIERCZYŃSKI, E. WŁODARCZYK, *Symulacja komputerowa procesu tworzenia się strumienia kumulacyjnego i jego oddziaływania na pancierz*, Biul. WAT, 41, Warszawa, 1992, 43-59.
- [12] A. JACKOWSKI, S. CUDZIŁO, R. TRĘBIŃSKI, E. WŁODARCZYK, *Metodyka badań charakterystyk strumienia kumulacyjnych*, Biul. WAT, 4 (536), Warszawa, 1997, 57-72.
- [13] K. JACH, R. ŚWIERCZYŃSKI, Z. WILK, *Modelowanie działania ładunków kumulacyjnych w odwiertach geologicznych*, IV Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Waplewo 9-11.10.2002, 101-102.
- [14] K. JACH, R. TRĘBIŃSKI, Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Badania ładunków kumulacyjnych z wkładkami proszkowymi do perforacji odwiertów naftowych*, IV Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia, strona: 103-104, Waplewo 9-11.10.2002.
- [15] K. JACH, R. ŚWIERCZYŃSKI, Z. WILK, *Modelling of Perforation Process of Wellbore Pipes of Geological Wells Using Shaped Charges*, Journal of Technical Physics, 45, 1, 2004, 31-54.
- [16] B. ZYGMUNT, Z. WILK, W. SKÓRA, R. PRZYBYLIK, G. LIBERKA, T. KUŚNIERZ, Z. KUPIDURA, *Sposób otrzymywania ładunków materiału wybuchowego o zwiększonej gęstości*, Pat. RP nr 180696, 2001.
- [17] Z. WILK, *Charakterystyka wysokoenergetycznych materiałów wybuchowych flegmatyzowanych policzterofluoroetylene*, praca dyplomowa — Studia Podyplomowe; Wydział Chemiczny — Technologia Materiałów Wybuchowych, Politechnika Śląska, Gliwice, 1997.
- [18] Z. KUPIDURA, Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Zastosowanie wysokoenergetycznych kompozycji materiałów wybuchowych z policzterofluoroetylenem (PTFE) w dziedzinie kumulacji wybuchowej*, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, nr 65, Zielonka, 1998, 61-69.
- [19] Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Badania właściwości użytkowych heksogenu i oktogenu z dodatkiem fluoropolimerów*, III Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Waplewo, 11-13 października 2000.
- [20] Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Research of High Energy Explosives with Fluoropolymer Binders*, New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Czechy, 2001.
- [21] W. P. WALTERS, J. A. ZUKAS, *Fundamentals of Shaped Charge*, Wiley-Interscience Publication, New York, 1989.
- [22] Z. WILK, B. ZYGMUNT, W. SKÓRA, Z. KUPIDURA, M. KROCZEK, T. KUŚNIERZ, *Wkładka kumulacyjna do ładunków osiowo-kierunkowych*, Pat. RP nr 182314, 2001.

- [23] Z. KUPIDURA, J. LEGIEĆ, W. SKÓRA, Z. WILK, *Wkładki kumulacyjne z proszków metali do granatów kumulacyjno-odłamkowych*, Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji, nr 65, Zielonka, 1998, 107-110.
- [24] Z. KUPIDURA, Z. WILK, B. ZYGMUNT, *Badania granatów kumulacyjno-odłamkowych wymiar 38 mm z dodatkowym efektem zapalającym*, Materiały konferencji AMUNICJA 2002 — Badania i rozwój systemu BM-21 oraz nowoczesnej amunicji, Kołobrzeg, 2002.
- [25] K. GRIESGRABER, Z. WILK, *Nowe komponenty w wyrobach wykorzystujących ukierunkowane działanie materiałów wybuchowych dla prac strzałowych w otworach wiertniczych*, Materiały konferencji GEOPETROL 2002 — Problemy naukowo-badawcze i rozwojowe poszukiwań i eksploatacji złóż gazu ziemnego i ropy naftowej, Zakopane, 2002.

Z. WILK, B. ZYGMUNT

Application of hollow charges for geological wells perforation

Abstract. Short history of the development of geological wells perforation techniques has been described. The paper focused on the construction and features of shaped charges used for perforation. The achievements of Polish R&D institutions are reviewed.

Keywords: hollow charge, explosives — applications

Universal Decimal Classification: 662.1/.4.004