

**Antoni Frodyma\*, Zenon Wilk\*\***

## **METODY PERFORACJI KUMULACYJNEJ W UDOSTĘPNIANIU ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW**

### **1. WSTĘP**

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 złożeń) prowadzonych w otworach wiertniczych na głębokości do 10 km. Technika wydobywania ropy naftowej z biegiem lat ulegała ciągłym ulepszeniom. Postęp w dziedzinie techniki udostępniania złożeń poprzez odwierty geologiczne przedstawiono chronologicznie na rysunku 1.

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 umieszczano na dnie szybu ładunek silnego kruszącego materiału wybuchowego, początkowo ciekłej nitrogliceryny oraz, nieco później, dynamitu A. Nobla. Wybuch powodował powstanie kawerny w szybie i spękanie dalszych obszarów otaczającego złoża, dzięki czemu powiększał się wypływ medium. Po lokalnym wyczerpaniu złoża, dalsze pogłębianie storpedowanego szybu było niemożliwe z powodu nieodwracalnego zniszczenia struktury geologicznej złoża. Zabieg taki jest zwany torpedowaniem złoża roponośnego.

Postępujący wzrost zapotrzebowania na ropę naftową 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. Taki zabieg nazywa się perforacją

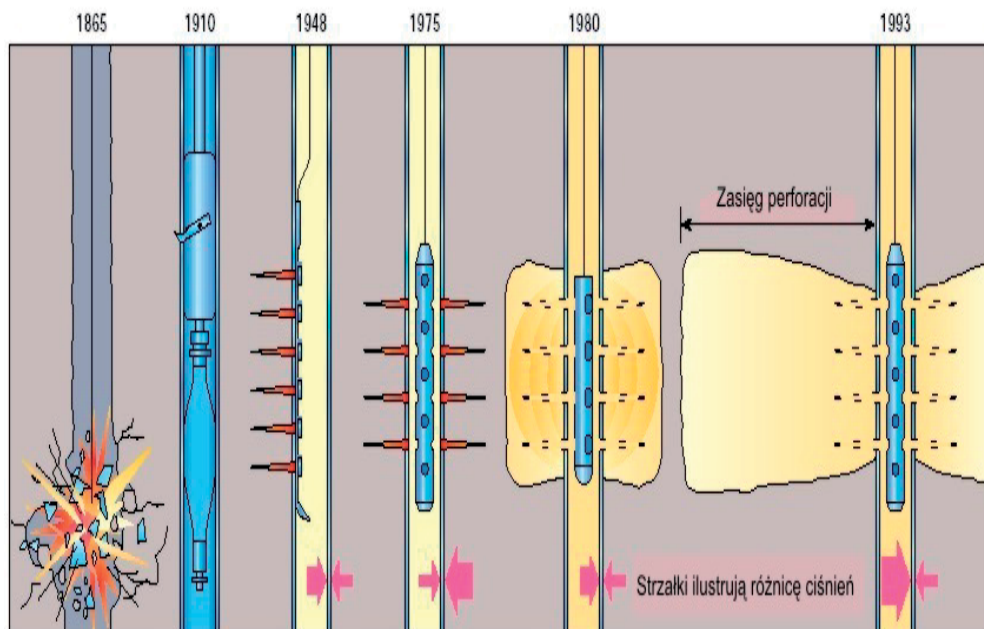
---

\* Instytut Nafty i Gazu, Kraków

\*\* Instytut Przemysłu Organicznego Warszawa, Oddział Krupski Młyn

rur okładzinowych. Proponowano różne rozwiązania urządzeń do perforacji orurowania: mechaniczne, elektromechaniczne lub hydrauliczne.

Pojawiły się również rozwiązania proponujące wykorzystanie energii materiałów wybuchowych. W latach 30. XX w. zastosowano tzw. metodę pociskową. Polegała ona na wystrzeliwaniu pocisków ze specjalnego urządzenia, podobnego do krótkolufowego moździerza, prostopadle w kierunku rur okładzinowych odwiertu. Pociski wystrzelwane były promieniowo do obwodu orurowania w niewielkich odstępach w osi odwiertu.



Rys. 1. Rozwój techniki perforacji odwiertów geologicznych [2]

Wprowadzenie perforacji pociskowej było postępem 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 pogłębienie.

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 czasie wiercenia otworów.

## 1.1. Rys historyczny zastosowania kumulacji wybuchowej do perforacji odwiertów

Efekt kumulacyjnego działania MW wykorzystywano przy pracach strzałowych w górnictwie już w XVIII wieku. Było to jednak wynikiem praktycznych doświadczeń a nie świadomej wiedzy o zjawisku. Pierwsze udokumentowane eksperymenty z wydrążonymi ładunkami MW wykonał niemiecki porucznik von Foerster w 1883 r. Także zastosowanie zjawiska kumulacji związane jest z wynalezieniem spłonki do pobudzania detonacji posiadającej łuskę metalową zakończoną półkolistym zagłębieniem – patent zgłosił w Dusseldorfie w 1886 r. G. Bloem.

Za odkrywcę zjawiska kumulacji wybuchowej uważany jest jednak amerykański inżynier Charles E. Munroe, który w 1888 r. opublikował w *American Journal of Science* (36:48-50) swoje doświadczenia z wydrążonymi ładunkami MW. Z tego względu przez długi okres zjawisko kumulacji wybuchowej zwane było „efektem Munroe”.

Pomijając wynalazek spłonki w łusce metalowej z półkolistym zagłębieniem w denku (G. Bloem, 1886r.), pierwsze zastosowania ładunków MW z wydrążeniem pokrytym metalem przypisuje się również C.E. Munroe. Jednak nie analizował on takiej konstrukcji ładunku pod względem fizyki zjawiska. Tego rodzaju prace pod koniec XIX w. wykonywał amerykański fizyk R. Wood, który badał zjawisko lokalnej zwiększonej kumulacji energii MW działającego na wklęsłe powłoki metalowe. Od tego okresu przyjęto nazywać ten proces fizyczny wybuchowym efektem kumulacyjnym lub kumulacją [2].

Wkrótce po II wojnie światowej, uzyskane doświadczenia w konstrukcji ładunków kumulacyjnych zostały wykorzystane dla przemysłu naftowego. Opracowane zostały różnego rodzaju systemy perforacji i inne środki strzałowe z ładunkami kumulacyjnymi jak np. do obcinania rur okładzinowych, wykonywania szczelin wzdłużnych lub do usuwania twardych przeszkód w czasie wiercenia.

Najwcześniejsze spotykane w literaturze przedmiotu rozwiązanie dotyczące zastosowanie ładunku kumulacyjnego do perforacji rur okładzinowych otworu wiertniczego dotyczy patentu US2399211 z 1942r. autorów: Clyde O. Davisa i Lawton A. Burrowsa wg [10].

Pierwsze doniesienia o szerszym komercyjnym zastosowaniu na polach naftowych Kalifornii w USA nowej technologii – tzw. perforacji kumulacyjnej pochodzą z 1946 r. Przedstawił je Robert H. McLemore w *The Oil Weekly* [4].

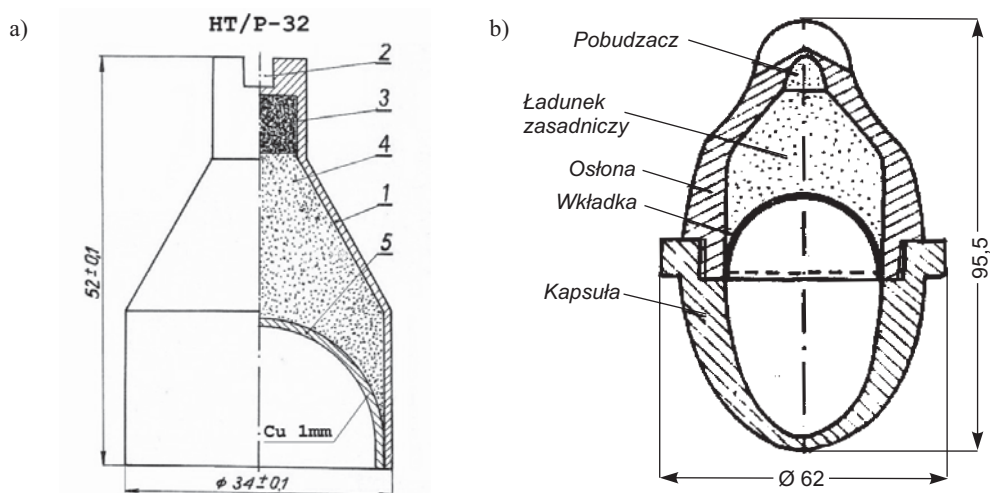
Perforatory z ładunkami kumulacyjnymi okazały się bardzo efektywne i w krótkim czasie wyparły stosowane dotychczas perforatory pociskowe.

## 1.2. Historia zastosowania perforacji kumulacyjnej odwiertów w krajowym górnictwie

W Polsce, od 1955 r. badaniami, opracowywaniem konstrukcji i produkcją małotonażową środków strzałowych dla potrzeb górnictwa nafty i gazu zajmuje się Instytut Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie, który w tej dziedzinie stale współpracuje z Instytutem Nafty i Gazu w Krakowie.

Pod kierunkiem dr Wiktora Załachowskiego opracowane zostały w 1957 r. pierwsze zestawy środków strzelniczych do perforacji kumulacyjnej, po raz pierwszy użyte w połowie

1958 r. Rozwiązania pierwszych polskich konstrukcji ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych przedstawia rysunek 2.



**Rys. 2.** Górniczy ładunek kumulacyjny otwarty HT/P-32 do perforatora rurowego (a) i ładunek kumulacyjny zamknięty HT/P-35z w obudowie z tworzywa (bakelit) (b). Oznaczenia: 1 – osłonka ładunku z tworzywa sztucznego, 2 – rowek na lont detonujący, 3 – ładunek pobudzenia: pentryt, 4 – ładunek MW: heksogen/trotyl(90/10) – 20g (HT/P-32) lub 30 g (HT/P-35z), 5 – wkładka kumulacyjna sferyczna, tłoczona z miedzi [8]

Do badań ładunków kumulacyjnych stosowanych do perforacji, jako materiał standardowy przegrody przyjęto stosować stal miękką (gat. St-3). Przyjęto również stosowanie zasady stałości warunków badania: odległość podstawy wkładki kumulacyjnej od przegrody jest równa 1,5 średnicy wkładki.

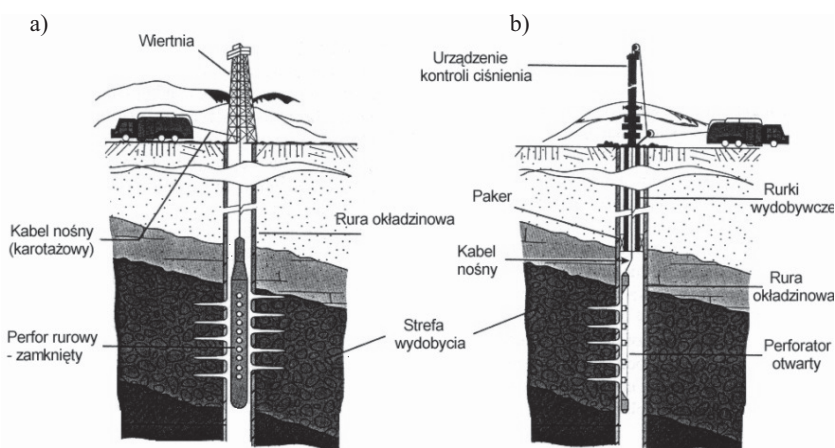
Dla oceny zdolności perforacji ładunki strzelano na zestawach w postaci przegrody warstwowej, np.: stal (12 mm) – cement (35 mm) – stal (12 mm) – cement. Np. dla ładunku typu HT/P-32 (o zdolności przebicia 55 mm w miękkiej stali) uzyskiwano głębokość przebicia zestawu ok. 100–120 mm. Dla ładunku typu HT/P-35z uzyskiwano przebicie na wylot (w 85%) płyty 70 mm z miękkiej stali St-3.

Pierwsze krajowe zestawy środków strzałowych do perforacji odwiertów posiadały odporność na temperaturę do 125°C, a odporność na ciśnienie hydrostatyczne do 40 MPa.

## 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, pobierając w trakcie wiercenia próbki złóż z różnych

głębokości. Równoległe z wierceniem wprowadza się do szybu współśrodkowe kolumny stalowych rur okładzinowych. Przestrzeń między rurą i odwiertem wypełnia się wprowadzonym pod ciśnieniem płynnym cementem, który stabilizuje i uszczelnia otwór wydobywczy. Po ukończeniu prac wiertniczych, przystępuje się do perforowania rur okładzinowych w celu otworzenia drogi dla wypływu ropy lub gazu ze złoża do wnętrza orurowania i dalej na powierzchnię ziemi. Przykłady urządzeń do perforacji kumulacyjnej opuszczanych do odwiertu za pomocą kabla nośnego przedstawia rysunek 3.



**Rys. 3.** Działanie perforatora z ładunkami kumulacyjnymi w otworze wiertniczym. Przykład zamkniętego perforatora rurowego opuszczonego do otworu na kablu nośnym z przewodem do odpalania elektrycznego (a) oraz perforator otwarty o małej średnicy opuszczany do czynnego odwiertu poprzez rury wydobywcze (b) [11]

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.

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).

Efektem perforacji jest udostępnienie złoża lub poprawienie produktywności odwiertu przez utworzenie drożnych kanałów do złoża mineralnego poprzez wydrążenie jednorodnych otworów wlotowych w rurach okładzinowych i w warstwie cementu oraz w przyległej części skały uszkodzonej w trakcie procesu wiercenia. Umożliwia to dalsze prowadzenie innych zabiegów intensyfikacji wydobywania np. szczelinowania hydraulicznego, kwasowania oraz kontrolowania zapiaszczenia przy wydobywaniu 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 pewność działania) spowodowały powstanie licznych zespołów i ośrodków badawczych-naukowych zajmujących się zagadnieniami konstrukcji, technologii i badań dotyczących ŁK do perforacji odwiertów. Ośrodki te głównie związane są z koncernami naftowymi lub branżowymi instytutami naukowymi.

## 2.1. 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 wydobywania 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 wydobywania 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 znacznie przekraczać może 100°C. ŁK lub perforatory muszą więc być hermetycznie zamknięte a MW musi mieć cechy wysokiej termoodporności chwilowej i wytrzymywać wielogodzinną ekspozycję w temperaturze do 150°C, a nawet ponad 200°C.

Ze względu na konstrukcję otworu geologicznego oraz małą odległość od przebijaonej, 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 nie przekraczającej 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 zmniejsza to efektywność perforacji i produktywność odwiertu. 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.



### 3. METODY ZAPUSZCZANIA

Jeżeli interwał przeznaczony do perforacji jest stosunkowo niedługi (do 12 m), otwór pionowy lub o nachyleniu nieprzekraczającym  $60\div 65^\circ$ , a sama perforacja może być wykonana w warunkach nadciśnienia lub równowagi ciśnień, to najszybszą i najtańszą metodą jest zapuszczanie zestawu perforującego na kablu strzałowym. Nie jest tutaj konieczne ustawianie wieży (urządzenia wiertniczego), natomiast wystarczy wyciąg karotażowy. Jeżeli interwał jest dłuższy, lub podzielony na wiele horyzontów udostępnianych, to zabiegi na linie wymagają wykonania więcej niż jednego marszu, co uniemożliwia zastosowanie podciśnienia w trakcie kolejnych marszów z perforatorami. W miarę wzrostu odchylenia otworu od pionu czas zabiegu zwiększa się, szczególnie jeżeli ciężar zestawu perforującego nie jest duży i stosowane jest napowierzchniowe przyrządowanie do kontroli ciśnienia, takie jak np. śluza.

W otworach o dużym nachyleniu zapuszczanie perforatorów na kablu strzałowym może się nie powieść (uznaje się, że jeżeli odchylenie otworu od pionu przekracza  $60\div 65^\circ$ , to zapuszczenie perforatorów na kablu strzałowym stwarza zbyt duże problemy, aby planować taki zabieg bez dodatkowych urządzeń wspomagających zapuszczenie). W takim wypadku można się posiłkować traktorem ciągnącym, który sprawdzi się również w przypadku otworu poziomego – takie rozwiązania stosowane są przez wiodące firmy światowe (np. Schlumberger, Baker Hughes).

W przypadku otworu poziomego, jeżeli nie stosuje się wglębnego traktora ciągnącego, oczywista jest konieczność użycia innych metod zapuszczania zestawu perforującego. Dostępne są następujące opcje:

- 1) Zapuszczanie na przewodzie wiertniczym lub rurach produkcyjnych (TCP – Tubing Conveyed Perforation), również w formie tzw. PCP – stałego uzbrojenia perforującego, zapuszczania całego łańcucha produkcyjnego z podpiętymi na końcu perforatorami, które nie są wyciągane po wykonaniu strzelania.

Zalety:

- możliwość zapuszczania do otworów o dowolnym nachyleniu;
- elastyczność stosowania różnych warunków ciśnienia w trakcie perforacji (nadciśnienie, równowaga, podciśnienie, zapewniająca możliwość optymalnego oczyszczenia kanałów perforacyjnych);
- możliwość natychmiastowego podjęcia produkcji przez przewód wydobywczy;
- bogactwo możliwych do zastosowania opcji wyposażenia wglębnego (pakery, zawory, przyrządy pomiarowe, itp.);
- możliwość łatwiejszego zachowania kontroli nad kierunkiem wykonywanych kanałów perforacyjnych;
- możliwość zapuszczania bardzo długich zestawów perforujących. W przypadku bardzo długich interwałów udostępnianych ogólny czas zabiegu jest krótszy, niż możliwy do uzyskania przy zastosowaniu zapuszczania na kablu strzałowym.

Wady:

- długi czas zapuszczania do głębokości zabiegu, związany z koniecznością zestawiania przewodu z pasów rur;

- związany z tym długi czas narażenia środków strzałowych (ładunki, lont) na oddziaływanie temperatury i idąca za tym możliwość pogorszenia sprawności działania ładunków, ewentualnie konieczność stosowania ładunków z materiałem wybuchowym o większej odporności termicznej, ale zarazem znacznie droższego;
  - znacznie większe koszty zabiegu, czas pracy wieży, załogi itp.;
  - w przypadku otworów poziomych i długich zestawów perforujących, bardzo często konieczne jest wyciągnięcie całego zestawu perforującego w celu zapuszczenia uzbrojenia wydobywczego na długości udostępnionego interwału; przy takim zabiegu konieczne jest zachowanie kontroli nad odwiertem przez utrzymanie nadciśnienia, co często prowadzi do uszkodzenia przepuszczalności w strefie świeżo wykonanych kanałów perforacyjnych.
- 2) Zapuszczanie na przewodzie zwijanym (Coiled Tubing CT), wyposażonym dodatkowo w linię elektryczną, lub bez takiej linii.

Zalety:

- stosunkowo krótki czas zapuszczania, możliwość zapuszczania do otworów o dowolnym nachyleniu, możliwość stosowania sił pchających i ciągnących;
- elastyczność stosowania różnych warunków ciśnienia w trakcie perforacji (nadciśnienie, równowaga, podciśnienie, zapewniająca możliwość optymalnego oczyszczania kanałów perforacyjnych);
- wiele możliwych do zastosowania opcji wyposażenia wglębnego (pakery, zawory, przyrządy pomiarowe itp.);
- możliwość łatwiejszego zachowania kontroli nad kierunkiem wykonywanych kanałów perforacyjnych;
- możliwość zapuszczania długich zestawów perforujących, nie tak długich jednak jak w przypadku (1), gdyż jest ograniczona zjawiskiem wybożenia śrubowego przewodu zwijanego; w takich przypadkach konieczne jest zastosowanie przewodu zwijanego z linią elektryczną i traktora ciągnącego.

Wady:

- w warunkach krajowych urządzenia CT nie są jeszcze szeroko dostępne w takim wyborze średnic i wyposażenia, jak na Zachodzie;
- znacznie większy koszt pracy urządzenia CT, niż w przypadku wyciągu kablowego.

Metoda perforacji polegająca na zapuszczaniu zestawu perforującego (na kablu, lub na przewodzie zwijanym – CT) poprzez kolumnę rur produkcyjnych (TTP – Through Tubing Perforation) jest stosowana przede wszystkim przy pierwszym udostępnieniu lub kolejnych reperforacjach w otworach, które są już uzbrojone w produkcyjny zespół dennej, z celem podjęcia produkcji natychmiast po wykonaniu perforacji. Można wówczas zastosować warunki podciśnienia o wartości optymalnej dla uzyskania czystych kanałów perforacyjnych o dobrym wskaźniku produktywności, zachowując jednocześnie przez cały czas całkowite panowanie nad ciśnieniem w otworze.

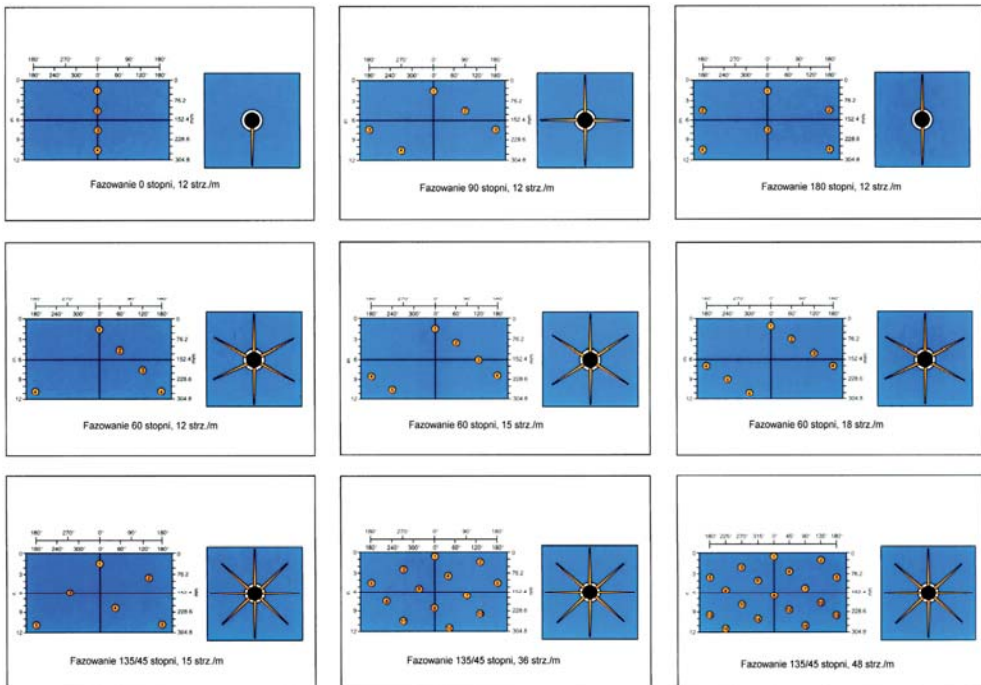
Zabiegi reperforacji wykonywane perforatorami małośrednicowymi poprzez rury produkcyjne mają również tą zaletę, że unika się konieczności wyciągania rur produkcyjnych.



cyjnych przed zabiegiem, oraz późniejszego, ponownego jej zapuszczenia do otworu w celu podjęcia produkcji po wykonaniu perforacji urządzeniem normalnośrednicowym; w takiej sytuacji dodatkowym niekorzystnym czynnikiem jest zazwyczaj konieczność utrzymania nadciśnienia w otworze, skutkującego pogorszeniem warunków przepływu medium złożowego do otworu.

Metoda perforacji poprzez rury oprócz wyżej przedstawionych zalet, ma oczywiście również niekorzystne strony, mianowicie:

- Wymusza stosowanie perforatorów małośrednicowych w których siłą rzeczy stosowane muszą być ładunki perforacyjne o mniejszych wymiarach, zawierające mniej materiału wybuchowego, tym samym o mniejszej skuteczności.
- Perforator małośrednicowy po wyjściu z kolumny rur produkcyjnych i ustawieniu w głębokości planowanego odpalenia zajmuje ponadto pozycję niekorzystną z punktu widzenia optymalnego dystansu od atakowanego celu – ścianki rury okładzinowej, który przyjmuje się najczęściej jako 3/2 kalibru wkładki kumulacyjnej ładunku. Aby poprawić położenie perforatora małośrednicowego względem atakowanego celu stosuje się decentralizatory – najczęściej w formie sprężyny ślizgowej, lub mimośrodowego obciążnika – metodą grawitacyjną. Taka metoda orientowania perforatora w przestrzeni otworu wymusza jednak stosowanie fazowania 0° ładunków kumulacyjnych (zob. rys. 4).



**Rys. 4.** Układ przestrzelin na rurze okładzinowej oraz w przekroju poprzecznym otworu, w zależności od fazowania i gęstości strzałów [1]

Innym rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie perforatorów z dużymi ładunkami, które w trakcie zapuszczania zestawu perforującego są „schowane” i ustawione w osi wzdłużnej perforatora dzięki przegubowemu zawieszeniu w jego konstrukcji nośnej, natomiast po wyjściu z kolumny rur produkcyjnych obracają się o  $90^\circ$  z jednoczesnym przybliżeniem do ścianek otworu. To rozwiązanie jest jednak droższe od standardowego, i zasadniczo nie jest możliwe uzyskanie większej gęstości strzałów niż 12/metr z ładunkami zorientowanymi co  $180^\circ$ .

### 3.1. Metody odpalania

Do odpalania perforatorów stosowane są dwa rodzaje detonatorów:

- 1) detonatory elektryczne,
- 2) detonatory uderzeniowe, uruchamiane grawitacyjnie lub ciśnieniowo.

Odpalanie elektryczne, stosunkowo najprostsze w realizacji, może być jednak wykorzystywane tylko w przypadku gdy jest do dyspozycji żyła prądowa, a więc przy zapuszczaniu perforatorów na kablu strzałowym, albo na przewodzie zwijającym wyposażonym w dodatkowy kabel elektryczny. Innymi słowy, odpalanie elektryczne przy zapuszczaniu na kablu pozostaje do dyspozycji w otworach kierunkowych o nachyleniu do  $65^\circ$ , oraz w przypadku zapuszczania perforatorów na przewodzie zwijającym (CT) wyposażonym w kabel elektryczny – tutaj w otworach o dowolnym nachyleniu.

Jeżeli chodzi o detonatory uderzeniowe, to ich uruchamianie może zachodzić za pośrednictwem zbijaka wrzucanego do otworu po zapuszczeniu zestawu perforującego TCP (*Tubing Conveyed Perforation* – perforacja na przewodzie skręcanym), lub CT (w wersjach o większych średnicach) na głębokość zabiegu i docierającego do głowiczki udarowej (ta metoda, uwarunkowana grawitacyjnym opadaniem zbijaka, ograniczona jest do otworów kierunkowych), albo przez zadanie ciśnienia hydrostatycznego w przewodzie lub przestrzeni międzyrurowej, zależnie od wersji głowiczki udarowej. Istnieje tutaj wiele różnorodnych rozwiązań możliwych do zastosowania, np. uruchamianie pod działaniem różnicy ciśnień przestrzeń – przewód, głowiczki podwójne – redundantne, głowiczki z opóźnionym zapłonem (np. w celu wytworzenia podciśnienia przez wymianę płynów, po hydraulicznym uruchomieniu głowiczki).

Stosuje się również systemy odpalające zapuszczane na kablu strzałowym lub przewodzie zwijającym już po zapuszczeniu samego zestawu perforującego i przypinane do niego po dojściu do zestawu. Jest to rozwiązanie bardzo bezpieczne, bo cały zestaw perforujący, zawiera wyłącznie materiały wybuchowe wtórne – o niskiej czułości, nie stwarzające ryzyka przedwczesnej detonacji.

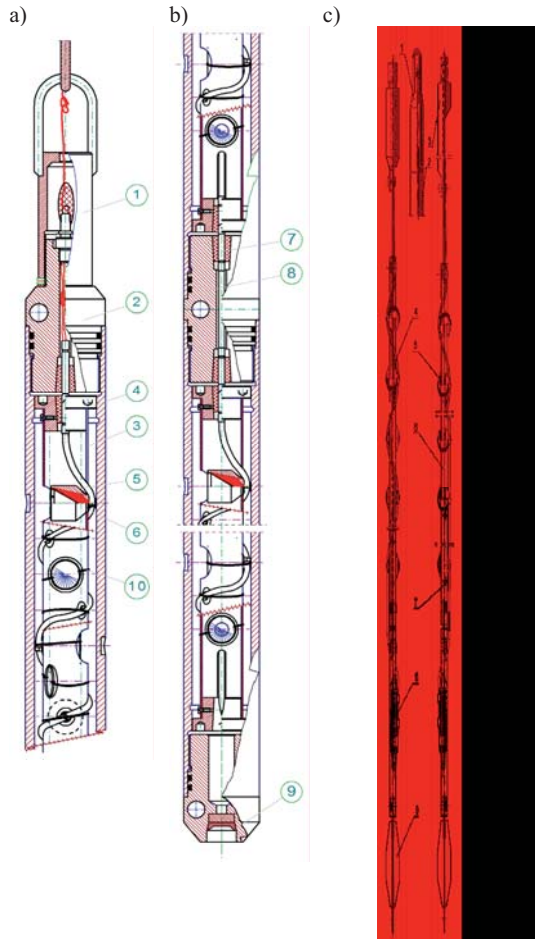
### 3.2. Konstrukcje perforatorów

Zasadniczo wyróżnia się dwie podstawowe linie konstrukcyjne perforatorów:

- 1) urządzenia zamknięte – korpusowe, w których środki strzelnicze przenoszone są na miejsce odpalania w zamkniętym, szczelnym korpusie rurowym, chroniącym je zarazem przed oddziaływaniem ciśnienia, mediów otworowych i częściowo temperatury;

- 2) urządzenia otwarte – bezkorpusowe, w których konstrukcję nośną stanowi najczęściej taśma stalowa lub aluminiowa albo druty; środki strzelnicze zbrojące taki perforator muszą być zamknięte we własnych osłonach odpornych na ciśnienie i zapewniających odpowiednią szczelność.

Na rysunku 5 przedstawiono takie dwie wersje rozwiązania konstrukcyjnego perforatorów, na przykładzie linii perforatorów PRS (korpusowe, segmentowe) oraz linii perforatorów PBB (bezkorpusowe), opracowanych w Zakładzie Techniki Strzelniczej Instytutu Nafty i Gazu



**Rys. 5.** Konstrukcje perforatorów na podstawie serii PRS – perforator korpusowy, (a, b) i PBB (c). Elementy składowe (a i b): 1 – kołpak, 2 – głowica górna, 3 – żerdź nośna ładunków, 4 – rura korpusu, 5 – lont detonujący, 6 – ładunek kierunkowy otwarty, 7 – przekaźnik detonacji, 8 – łącznik segmentów, 9 – głowica dolna, 10 – zapinka. Elementy składowe (c): 1 – kołpak, 2 – obciążnik prosty, 3 – obciążnik – decentralizator, 4 – lont detonujący, 5 – ładunek kierunkowy zamknięty, 6 – taśma nośna, 7 – zapinka, 8 – głowiczka zapalnikowa, 9 – przewodnik – pióro. Przedstawione na rysunku perforatory przystosowane są do zapuszczenia na kablu strzałowym

w Krakowie, zbrojonych środkami strzelniczymi opracowanymi przez Instytut Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie.

Perforatory korpusowe, produkowane na świecie w zakresie średnic od 1 9/16" do nawet 7" [1], przedstawiają następujące zalety:

- mogą być zapuszczane z użyciem wszystkich trzech wcześniej podanych metod: na kablu strzałowym, na przewodzie skręcanym i na przewodzie zwijanym;
- umożliwiają względnie łatwe panowanie nad ciśnieniem w otworze – perforacja przy podciśnieniu, nadciśnieniu lub równowadze ciśnień, podciśnienie dynamiczne;
- ograniczają do minimum ilość zanieczyszczeń poperforacyjnych pozostawianych w otworze;
- pozwalają na stosowanie dużych gęstości perforacji, sięgających nawet 50 strz/metr w największych urządzeniach;
- w przypadku zestawu perforującego zapuszczanego na przewodzie produkcyjnym (skręcanym) pozwalają na kompletowanie niemal dowolnie długich zestawów perforujących, np. firma Schlumberger przytacza przykład perforacji zestawem o długości ok. 2600 metrów uzbrojonym 25 000 ładunków perforujących, wykonanej w otworze poziomym w jednym marszu;
- pozwalają na stosowanie ładunków kierunkowych zoptymalizowanych jak chodzi o masę MW i geometrię pod względem zadania perforacyjnego planowanego do wykonania.

Ich wada to przede wszystkim znacznie większy koszt niż perforatorów bezkorpusowych, związany tak z kosztem samego urządzenia, jak i kosztami związanymi z wykonaniem zabiegu, zwłaszcza w przypadku zapuszczania perforatora na przewodzie skręcanym, gdzie zachodzi konieczność użycia urządzenia wiertniczego. Dłuższy czas zapuszczania i przebywania środków strzałowych w warunkach zwiększonej temperatury może również wymuszać stosowanie materiałów wybuchowych o wyższej stabilności termicznej, co oczywiście również powoduje wzrost ceny ładunku i zabiegu.

Perforatory bezkorpusowe, które najczęściej wykonywane są w zakresie średnic 1 9/16" do 2 7/8" (choć spotyka się i większe – tutaj można wymienić stosowane chętnie do mniej odpowiedzialnych zadań perforatory z ładunkami w osłonach szklanych serii HPS 32Z o średnicy 3 1/2"), są ogólnie tańsze (nie ma korpusu), zapuszczane na kablu strzałowym – z czym wiąże się szybkość wykonania i mniejsze koszty zabiegu i zbrojone – jak wspomniano wyżej, środkami zamkniętymi w odpornych na ciśnienie i temperaturę, szczelnych osłonach własnych.

Szybkość wykonania zabiegu i relatywnie niski jego koszt są jednak okupione pewnymi wadami, wśród których można wymienić:

- ograniczenie długości perforacji wykonywanej w jednym marszu, w zasadzie trudno jest zapuścić i odpalić zestaw dłuższy niż 8÷10 m; chcąc wykonać zabieg przy kontrolowaniu ciśnienia w otworze należy stosować służę z dławikiem na kabel strzałowy, co w dalszym stopniu ogranicza długość jednorazowo zapuszczanego zestawu; w przypadku perforatorów o mniejszych średnicach (a tym samym lżejszych) często napotyka się trudności w ich zapuszczaniu na planowaną głębokość wykonania zabiegu;
- jeżeli zachodzi konieczność perforacji interwału dłuższego niż wspomniane 8÷10 m, to kolejne odpalenia (poza pierwszym) nie mogą być już wykonywane przy podciśnieniu (otwarte perforacje z pierwszego marszu)

- po wykonaniu perforacji w otworze pozostaje znaczna ilość odpadków poperforacyjnych (z obudów ładunków i niekiedy z konstrukcji nośnej), co może powodować niekiedy problemy w trakcie kolejnych prac wykonywanych na otworze
- środki strzałowe w perforatorze zapuszczanym na większą głębokość są narażone na urazy mechaniczne w trakcie marszu – co może spowodować np. zamknięcie lontu i jego deflagrację, skutkującą niepowodzeniem zabiegu i koniecznością późniejszej likwidacji niewypału.

#### **4. WYMAGANIA STAWIANE PERFORACYJNYM ŁADUNKOM KIERUNKOWYM W ZALEŻNOŚCI OD ZADANIA GŁÓWNEGO PERFORACJI**

Zabieg perforacji zawsze polega na wykonaniu otworu, jednak cele, jakie chce się osiągnąć poprzez wykonanie tych otworów w orurowaniu mogą być różne. I tak, zadania perforacji mogą być następujące:

- 1) Otwarcie złoża (utworzenie kontaktu hydraulicznego) udostępnionego odwierconym i orurowanym otworem, w celu rozpoczęcia eksploatacji medium złożowego.
- 2) Przygotowanie otworu do założenia filtra żwirowego (tzw. gravel pack), stabilizującego ściany i strukturę skały złożowej (przeciwdziałanie zapiaszczeniu otworu) w trakcie eksploatacji medium złożowego.
- 3) Przygotowanie otworu do zabiegu intensyfikacji wydobywania metodą szczelinowania hydraulicznego, lub ciśnieniem gazów prochowych z generatora ciśnienia.
- 4) Zabiegi techniczne – przywrócenie cyrkulacji w otworze, utraconej np. wskutek odłożenia się ciężkich węglowodorów (parafina) lub zapiaszczenia otworu.

Ładunki perforacyjne stosowane do wykonania zadania (1) muszą przede wszystkim dysponować odpowiednim zasięgiem radialnym, umożliwiającym przekroczenie przez kanał perforacyjny strefy uszkodzonej w trakcie wiercenia.

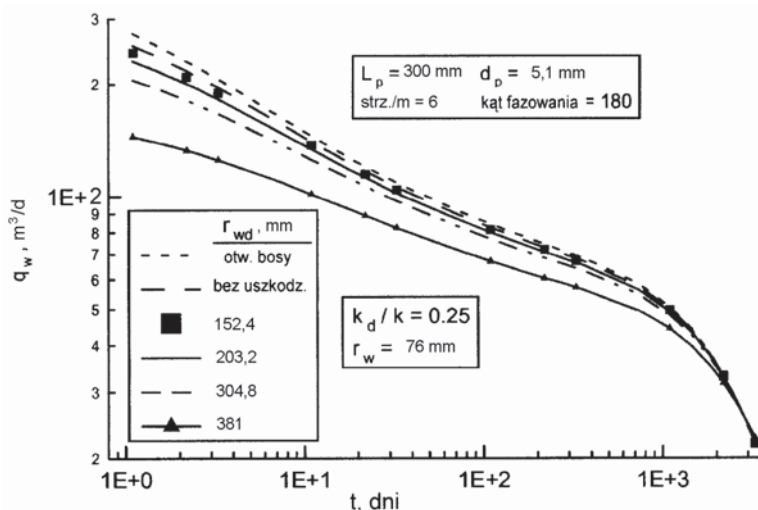
W opracowaniu [15] poświęconym między innymi zagadnieniu wpływu uszkodzenia formacji na efektywność przepływu w sperforowanych otworach, zbadano na podstawie modelu matematycznego wpływ zmniejszenia przepuszczalności spowodowanego uszkodzeniem formacji wokół otworu poziomego. Dla założeń, że przepuszczalność w strefie uszkodzonej wynosi 25% pierwotnej, gęstość strzałów jest 6 strz./m, długość kanału perforacyjnego 30,5 cm, średnica kanału 0,5 cm, kąt fazowania 180°, promień strefy uszkodzonej wokół otworu zmienia się od 15 do 38 cm. Wyniki modelowania zestawiono w tabeli 1 i można na ich podstawie zaobserwować, że tak długo, jak długo kanały perforacyjne sięgają poza strefę uszkodzenia przepuszczalności ( $r_{wd} = 15, 23$  i 30,5 cm), spadek produktywności jest mniejszy niż 10%. Jeżeli zasięg kanału perforacyjny nie przekracza strefy uszkodzenia, spadek produktywności jest znacznie bardziej dotkliwy. Ilustrację tych rezultatów zamieszczono na rysunkach 6 i 7.

Zadanie perforacyjne (2) wymaga zastosowania ładunków, tworzących otwory wlotowe o dużej średnicy. Ładunki kierunkowe jakie konstruuje się do tego celu tworzą otwory wlotowe o średnicach do ok. 15÷20 mm i zasięgu radialnym do ok. 200 mm.

**Tabela 1**

Wpływ uszkodzenia formacji na skumulowaną produkcję, wskaźnik produktywności oraz współczynnik *skin-efektu*

Promień strefy uszkodzonej $r_{wd}$ (cm)	Produkcja roczna (m <sup>3</sup> )	Produkcja 5-letnia (m <sup>3</sup> )	Wskaźnik produktywności	Współczynnik <i>skin-efektu</i>
Otwór bosi	49286	168971	1,000	–
Bez uszkodzenia	48141	166300	0,980	0,060
15	47425	164680	0,965	0,097
23	46583	162660	0,948	0,144
30,5	44627	157670	0,910	0,257
38	38633	142611	0,794	0,674

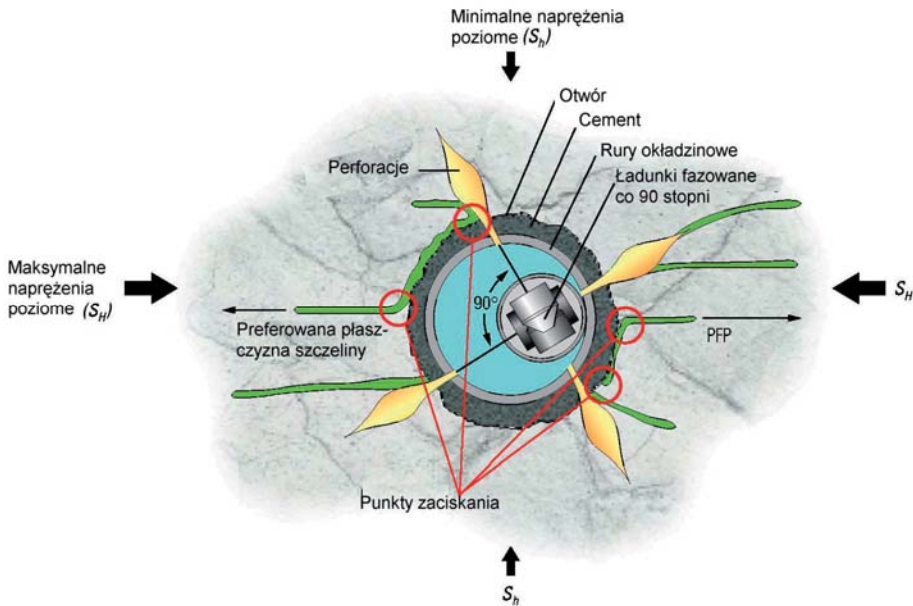


**Rys. 6.** Wpływ uszkodzenia formacji na wydatek (m<sup>3</sup>/dobę) z perforowanego otworu poziomego ( $r_{wd}$  – promień strefy uszkodzonej,  $r_w$  – promień otworu,  $c_{d_1}$  – przepuszczalność strefy uszkodzonej,  $k$  – przepuszczalność pierwotna,  $L_p$  – długość kanału perforacyjnego,  $d_p$  – średnica kanału) [15]

Zadanie perforacyjne (3) wymaga utworzenia otworów, których średnice wlotowe będą jak najbardziej zbliżone do siebie. Dzięki temu uzyskuje się równomierny rozkład przepływu i ciśnienia szczelinowania, zmniejszenie naprężeń w orurowaniu, mniejsze ciśnienie zapoczątkowania tworzenia szczeliny, itp. Bardziej istotne jest tutaj jednak prawidłowe zorientowanie kanałów perforacyjnych względem tzw. preferowanej płaszczyzny szczeliny, pokrywającej się z płaszczyzną największych naprężeń górotworu.



Z zasad mechaniki górotworu wiadomo, że szczeliny hydrauliczne rozprzestrzeniają się w kierunku maksymalnego naprężenia poziomego ( $S_H$ ). Jeżeli perforacje nie będą leżeć w tej płaszczyźnie, to powstające szczeliny będą przemieszczać się wokół rur okładzinowych i cementu, tworząc skomplikowane ścieżki w dążeniu do osiągnięcia preferowanej płaszczyzny szczeliny. Powoduje to powstanie w strefie przyotworowej skomplikowanych ścieżek przepływu, o wielu punktach inicjowania szczelin i mikroprzestrzeni pierścieniowych z punktami zaciskania; skrzydła szczeliny są wykrzywione i nie leżą w osi perforacji i otworu. Powoduje to oczywiste utrudnienie przyływu medium do otworu i mniejszą jego produktywność (rys. 7).



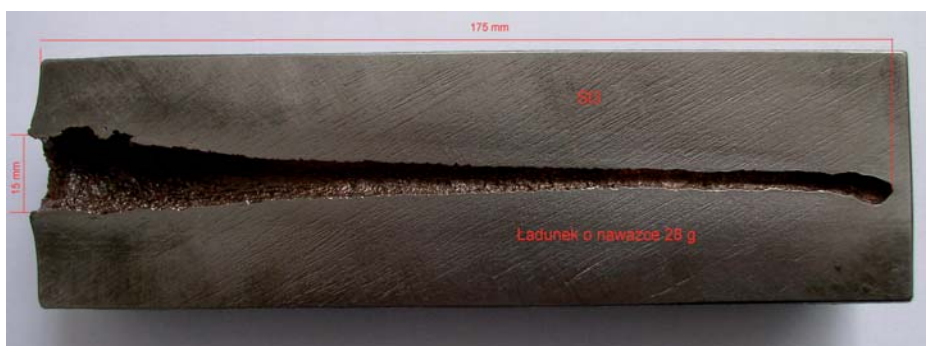
**Rys. 7.** Przebieg szczelin tworzących się w skale przy nieprawidłowym ukierunkowaniu perforacji względem preferowanej płaszczyzny szczeliny [9]

Testy laboratoryjne dotyczące inicjowania szczelin przez rzeczywiste perforacje wskazują ogólnie, że zapoczątkowanie szczeliny zachodzi u podstawy perforacji w przecięciu preferowanej płaszczyzny szczeliny (PFP) z otworem. Miejsce zainicjowania szczeliny zależy od orientacji perforacji względem PFP. Jeżeli ten kąt jest większy od  $30^\circ$ , to typowo szczeliny powstają tam, gdzie nie ma perforacji. Jeżeli szczelina nie zaczyna się od perforacji, to płyn szczelinujący i podsadzka muszą przemieszczać się wokół płaszczyzny kontaktu cementu i skały, co powoduje wzrost ciśnienia zabiegu oraz prawdopodobieństwo powstawania szczelin asymetrycznych i mnogich. Krętość powstających szczelin jest zatem wynikiem braku zorientowania kanałów perforacyjnych zgodnie z przebiegiem preferowanej płaszczyzny szczeliny.

Perforacje fazowane mają tendencję przyczyniania się do powstawania wielu współzawodni-  
czących szczelin. Oba te czynniki powodują wzrost ciśnienia szczelinowania.

Zadanie perforacyjne (4), w którym najczęściej chodzi o przywrócenie cyrkulacji  
w przewodzie produkcyjnym powyżej poziomu zapiaszczenia lub odłożenia osadów parafino-  
wych, wymaga zastosowania ładunku(-ów) kierunkowych o ograniczonym zasięgu radialnym,  
które przebiją rurę produkcyjną a jednocześnie nie naruszają w istotny sposób otaczającej ją  
rury okładzinowej.

Poniżej przedstawiono kanał perforacyjny utworzony w klocku stalowym przez ładunek  
kierunkowy głęboko penetrujący (zadanie perforacyjne 1, rys. 8), oraz przebicie rury  
produkcyjnej otoczonej przez rurę okładzinową bez naruszenia tej ostatniej, przez ładunek  
perforatora – przebijaka (rys. 9).



Rys. 8. Kanał perforacyjny utworzony przez ładunek kierunkowy głęboko penetrujący



Rys. 9. Przebicie rury produkcyjnej bez naruszenia rury okładzinowej,  
ładunek zbrojący perforator – przebijak

## 5. ŚRODKI STRZAŁOWE AKTUALNIE STOSOWANE I NOWE PRACE W TYM ZAKRESIE

W Polsce, od końca lat 50. XX w. projektowaniem i konstrukcją ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów zajmuje się Instytut Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie we współpracy z przedsiębiorstwami geofizycznymi i Instytutem Nafty i Gazu w Krakowie [16]. Ciągłość prowadzonych prac badawczych w tym temacie sprawia, że większość środków techniki strzelniczej dla polskiego górnictwa naftowego zostało zaprojektowanych, zbadanych i wdrożonych przez INiG oraz IPO [12].

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. Obecnie, produkcję doświadczalną i małotonażową w tym zakresie dla krajowych użytkowników prowadzi Oddział IPO w Krupskim Młynie. W latach 90. efektywne perforatory rurowe zostały opracowane również w HEIF sp. z o.o. w Warszawie we współpracy z Przedsiębiorstwem PETROMIN sp. z o.o. w Wołominie [3].

Instytut Przemysłu Organicznego jest producentem całego szeregu różnorodnych środków strzałowych odpornych temperaturę i wysokie ciśnienia, umożliwiających także przeprowadzenie perforacji odwiertów na dużych głębokościach.

**Do perforatorów bezkorpusowych – otwartych** oferowane są kompletne zestawy środków strzałowych: ładunki kumulacyjne w odpornych na ciśnienie obudowach szklanych, lont detonujący w powłoce metalowej i głowiczki zapalnikowe (MW na bazie heksogenu – RDX). Wszystkie elementy tego zestawu mogą być stosowane w temperaturze wewnątrz odwiertu do 130°C i przy ciśnieniu hydrostatycznym do 70 MPa. Opracowany jest również analogiczny zestaw środków strzałowych o większej odporności na temperaturę (MW na bazie oktogenu – HMX), który może być stosowany w temperaturze wewnątrz odwiertu od 190°C.

**Do perforatorów korpusowych – zamkniętych**, oferowane są kompletne zestawy środków strzałowych o wytrzymałości na temperaturę do 150°C (MW na bazie heksogenu – RDX): ładunki kumulacyjne w obudowach metalowych o wysokiej precyzji wykonania, lont detonujący i zapalnik. Opracowane są również analogiczne zestaw środków strzałowych o większej odporności na temperaturę, które mogą być stosowane w temperaturze wewnątrz odwiertu do 190°C ( MW na bazie oktogenu – HMX) a nawet do 250°C (MW na bazie PYX).

### 5.1. Ładunki kumulacyjne do perforacji – ogólna charakterystyka

Ładunki kumulacyjne są przeznaczone do stosowania w zakładach górniczych otworowych do wybuchowej perforacji otworów oraz na powierzchni przy wykonywaniu specjalistycznych prac wybuchowych. Wszystkie ładunki wykonane są na bazie heksogenu (RDX) lub oktogenu (HMX) według potrzeb, z dodatkiem fluoropolimerów. Zastosowano w nich wkładki kumulacyjne proskowe, co zapobiega zaczopowaniu otworów perforacyjnych.

W tabeli 2 zestawiono typy ładunków z podaniem ich charakterystycznych parametrów, wyszczególniono warunki stosowania oraz podano efekty przebicia stali i rdzenia skalnego.

**Tabela 2**

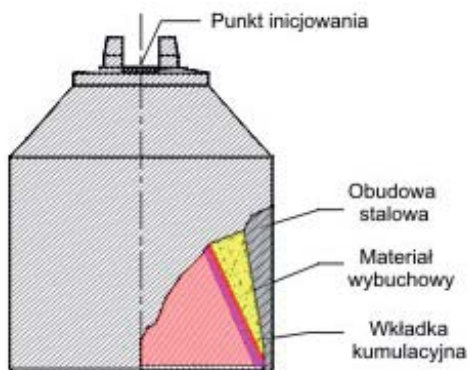
Ładunki kumulacyjne do perforacji i ich charakterystyka

Oznaczenie ładunku	Warunki stosowania $T_{\max}$ [°C] $P_{\max}$ [MPa]	Obudowa	Dł. [mm]	MW [g]	Głębokość przebiccia [mm]	
					stal	rdzeń skalny
ŁOKTC-H-PP-Sz-130-70	$T=130^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ $T=115^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ $T=105^{\circ}\text{C}/100\text{ h}$	szkło	82	20	60	150÷240
ŁOKTC-H-Sz-130-70				24	100÷120	250÷480
ŁOKTC-Fe-27-130-70		stal	43	14	65	160÷260
ŁOKTC-Fe-27p-130-70 (przebijak)	37		7	10	–	
ŁOKT-H-Fe-33-150	$T=150^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ $T=125^{\circ}\text{C}/48\text{ h}$ $T=115^{\circ}\text{C}/100\text{ h}$	stal	50	16	100	250÷400
ŁOKT-H-Fe-39-150			62	32	160	400÷720

## 5.2. Nowe komponenty w konstrukcji ładunków kumulacyjnych

Na parametry użytkowe prawidłowo skonstruowanego i wykonanego ładunku kumulacyjnego 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 IPO z szeregotypu ŁOKT-H-Fe-..., przedstawia rysunek 10.

W celu uzyskania maksymalnej efektywności perforacji, w ładunkach 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 określa również odporność ŁK na temperaturę.



**Rys. 10.** Schemat konstrukcji ładunku kumulacyjnego do perforacji typu ŁOKT- H-Fe-33-150 [12]

W Instytucie Przemysłu Organicznego w Warszawie oraz w Oddziale IPO w Krupskim Młynie opracowane zostały i zastosowane do produkcji środków strzałowych nowe materiały wybuchowe do prasowania z dodatkiem fluoropolimerów. Dzięki bardzo wysokiej odporności chemicznej i termicznej tych polimerów (np. teflonu, vitonu), możliwe jest prasowanie MW z ich dodatkiem w wyrobach o wymaganej wysokiej odporności na temperaturę, tj. w ładunkach kumulacyjnych stosowanych w poszukiwaniach nafty i gazu [5].

Drugi istotny element ładunku, metalowa wkładka kumulacyjna, jest elementem wykonanym z wysoką precyzją co do symetrii osiowej oraz przekrojów poprzecznych. Jej masa, kształt, wymiary geometryczne oraz rodzaj materiału, jego struktura i gęstość są wynikiem wieloletnich doświadczeń technologicznych i badań optymalizacyjnych [22–23]. Ładunki kumulacyjne osiowo-kierunkowe mogą być konstruowane w oparciu o wkładki otrzymane w różnego rodzaju technologiach. Mogą być one wykonywane techniką tłoczenia lub wyoblania z odpowiedniej blachy, metodą skrawania lub wykonywane z odpowiednich proszków techniką prasowania i/lub spiekania. W Oddziale IPO w Krupskim Młynie do produkcji wkładek kumulacyjnych stosuje się technologię metalurgii proszków metodą prasowania matrycowego. Metalami stosowanymi najczęściej, w postaci proszków czystych, stopów lub kompozycji są: miedź, nikiel, żelazo, tantal, ołów, cyna, wolfram, bizmut, a nawet zubożony uran. Do prasowania wkładek kumulacyjnych proszkowych do ładunków perforujących dla górnictwa otworowego stosuje się powszechnie głównie proszki miedzi elektrolitycznej (ozn. ECu), często z dodatkami wolframu i ołowiu. Wkładki wykonuje się w szerokim zakresie średnic: od 16 mm do 125 mm (rys. 11).



**Rys. 11.** Widok wkładek kumulacyjnych prasowanych z proszków metali [13]

Wkładki proszkowe mogą być otrzymywane przez zastosowanie stosunkowo prostych technik formowania na prasach, uzyskując bardzo dużą dokładność wymiarową co jest szczególnie istotne w produkcji precyzyjnych ładunków kumulacyjnych stosowanych w górnictwie

nafty i gazu. Bardzo ważną cechą wkładek kumulacyjnych proszkowych jest brak tworzenia się zbitki – perforacje wykonywane w otworach wydobywczych nie zaczopowują się, co ma znaczenie w zastosowaniach do perforacji odwiertów i zwiększa efektywność wydobywania. Technologia metalurgii proszków ma wiele zalet. Pozwala ona na stosowanie materiałów niemetalicznych, a także metali, których nie daje się tłoczyć, umożliwia także otrzymywanie wkładek o różnorodnej konstrukcji, np. warstwowych. Technologia ta pozwala na szybki i dokładny dobór składu wkładki oraz jej kształtu – możliwe jest otrzymywanie wkładek zawierających mieszaniny metali o dużej gęstości, wkładek zawierających materiały nie będące metalami, lub materiały mające na celu reagować chemicznie z otoczeniem [4, 8].

### 5.3. Przykłady nowych konstrukcji ładunków kumulacyjnych do perforacji

W najnowszych rozwiązaniach dotyczących konstrukcji i technologii produkcji ładunków kumulacyjnych o zwiększonej efektywności przyjęto do stosowania nowoczesne komponenty:

- wkładki kumulacyjne z prasowanych kompozycji proszków metali, w tym kompozycji o wysokich gęstościach (do  $15 \text{ g/cm}^3$ ) na bazie wolframu i miedzi oraz wkładki o konstrukcji warstwowej;
- materiały wybuchowe (MW) do prasowania, na bazie heksogenu lub oktogenu z dodatkiem fluoropolimerów typu tarflen i fluotar (odpowiedniki polskie teflonu i vitonu).

Na rysunkach 12–14 przedstawiono kilka przykładów nowej konstrukcji ładunków przeznaczonych do perforacji odwiertów, w którym zastosowano tego rodzaju nowe materiały.



ŁOKTC-H-Fe-33-150



ŁOKTC-H-Fe-39-150

**Rys. 12.** Widok ładunków kumulacyjnych przeznaczonych do perforatorów zamkniętych (rurowych) z typoszeregu ŁOKT-H-Fe... [5]



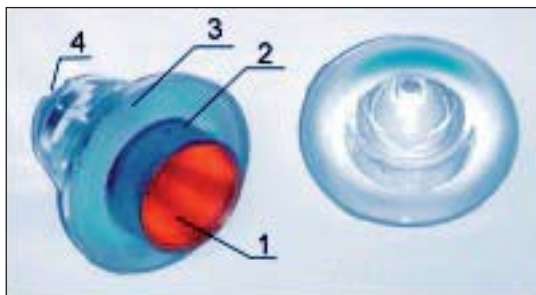


ŁOKTC-Fe-27-130-70 (perforujący)



ŁOKTC-Fe-27-130-70 (przebijak)

**Rys. 13.** Widok ładunków kumulacyjnych przeznaczonych do perforatora małośrednicowego, zapuszczanego do odwiertu poprzez rury wydobywcze [11, 14]



**Rys. 14.** Widok ładunku kumulacyjnego typu ŁOKTC-H-Sz-130-70, o zwiększonej efektywności, 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 [11]

## 6. PODSUMOWANIE

Pomimo że w tej pracy o przeglądowym charakterze, wielu zagadnień dotyczących perforacji nie udało się nawet zasygnalizować, to można jednak postawić kilka wniosków dotyczących kierunku dalszych prac rozwojowych, zmierzających do rozszerzenia i unowocześnienia oferty krajowej w tym zakresie.

- 1) Należy rozszerzyć zakres średnic oferowanych perforatorów korpusowych. Oprócz obecnie oferowanych średnic 88,9 i 114,3, widzimy potrzebę opracowania perforatorów o średnicach mniejszych – aż do 2 3/8 czy też 1 16/19", jakie są oferowane przez wiodące

- firmy w tej branży. Oczywiście ofertę należy budować w porozumieniu z przemysłem, według rozpoznania potrzeb w tym zakresie.
- 2) Widzimy potrzebę zróżnicowania konstrukcji ładunków, która powinna być optymalizowana do konkretnego zadania perforacyjnego, jak ładunki o maksymalnej penetracji, ładunki do przygotowania szczelinowania, gdzie liczy się średnica wlotowa i jednorodność średnic tworzonych otworów, ładunki tworzące duże otwory do przygotowania filtrów żwirowych.
  - 3) Prace w dziedzinie nowych technologii wkładek kumulacyjnych (warstwowe, zdolne do wykonania mikroszczelinowania w kanale perforacyjnych w drodze reakcji chemicznej materiału wkładki z płynem otworowym).
  - 4) Technologia zapuszczania perforatorów na przewodzie zwijanym, z odpowiednim rozszerzeniem metod odpalania.
  - 5) Opracowanie zagadnień związanych z perforacjami w otworach poziomych – głównie zagadnienia związane z zapuszczaniem długich zestawów perforujących, orientowanie perforatorów w przestrzeni odwiertu. itp.

## LITERATURA

- [1] Baker-Hughes: *Perforating Capabilities*. 1997
- [2] Behrmann L. i in.: *Quo Vadis, Extreme Overbalance?* Oilfield Review, nr 8, 1996
- [3] Derentowicz H., Bagrowski, J., Badura E., Manturo J., Stasiak S., Świetlik M., Wiechno T.: *Perforatory rurowe modułowe typu PRM stosowane do perforacji rur w otworach wiertniczych: badania, dopuszczenia, wykorzystanie*. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa – Konferencje: Nr 28, s. 163–176, Katowice, 1999
- [4] Griesgraber K., Wilk Z., Zakrzewski A.: *Perforacja kumulacyjna odwiertów naftowych połączona z dodatkową stymulacją złoża*. Materiały konferencyjne – GEOPETROL 2004, Zakopane, 2004
- [5] Griesgraber K., Wilk Z.: *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
- [6] Jach K., Świerczyński R., Wilk Z.: *Modelling of Perforation Process of Wellbore Pipes of Geological Wells Using Shaped Charges*. Journal of Technical Physics, 45, 1, s. 31–54 (2004)
- [7] Jach K., Trębiński Z., Wilk Z., Zygmunt B.: *Badania ładunków kumulacyjnych z wkładkami proskowymi do perforacji odwiertów naftowych*. IV Międzynarodowa Konferencja Uzbrowienia, strona: 103–104, Waplewo 9–11. 10. 2002 roku
- [8] Kupidura Z., Wilk Z., Zygmunt B.: *Badania granatów kumulacyjno-odłamkowych wymiar 38mm z dodatkowym efektem zapalającym*. Materiały konferencji AMUNICJA 2002 – Badania i rozwój systemu BM-21 oraz nowoczesnej amunicji, Kołobrzeg, 2002
- [9] *Orienting Perforations in the Right Directions*. Oilfield Review: Spring 2002. Publikacja Schlumberger, 2002 r.

- [10] Patent US2399211. *Method of Perforating Well Casing*. 1946
- [11] *Perforating Services*. Schlumberger Limited, Houston, Texas, 1993
- [12] Przybylik R., Wilk Z.: *Nowoczesne środki strzałowe do perforacji otworów wiertniczych w Polsce*. Gięda Technologi Chemicznej – Prochemia, Warszawa, 1994
- [13] Wilk Z. i in.: *Badania w zakresie technologii metalurgii proszków i wytwarzania spieków dla zastosowań w ładunkach kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych i dla celów specjalnych*. Sprawozdanie z pracy badawczej EMC 011400013, IPO Warszawa/Oddział Krupski Młyn, 2003
- [14] Wilk Z., Zygmunt B.: *Nowoczesne środki strzałowe do perforacji otworów wiertniczych*. New Trends in Research of Energetic Materials – Sec.Seminar, Pardubice, Czechy, 1999
- [15] Yildiz, T. : *Inflow Performance Relationship for Perforated Horizontal Wells*. Publ. SPE nr 88987, 2004
- [16] Załachowski W., Dąbrowski B., Majeran T., Rogowski R., Różański J.: *Zastosowanie ładunków kumulacyjnych w górnictwie*. Sprawozdanie z prac badawczych IPO Warszawa – Oddział w Krupskim Młynie, 1957–1958