

*Stefan Galczyński**, *Andrzej Wojtaszek***

PROJEKTOWANIE OBUDOWY KOTWIOWEJ WYROBISK PODZIEMNYCH

1. Wstęp

Podstawowym zadaniem projektanta obudowy wyrobiska podziemnego jest zapewnienie pełnego bezpieczeństwa zarówno wykonawcom robót geoinżynierskich, jak i użytkownikom tego wyrobiska [4].

Obudowa kotwiowa musi więc całkowicie eliminować lokalne obwały górotworu, a przede wszystkim wykluczyć globalny zawał części lub całego wyrobiska. O ile o zabezpieczeniu przed obwałami decyduje nośność poszczególnych kotwi i podtrzymywana nimi obudowa osłonowa (siatka, torkret itp.), o tyle zawałom może przeciwdziałać jedynie układ nośny uformowany całą grupą kotwi i zawartym między nimi górotworem jako materiałem konstrukcyjnym [1].

Projekt techniczny obudowy kotwiowej powinien wobec tego określać w pierwszej kolejności konstrukcyjne elementy nośne, a następnie sposoby zabezpieczenia osłonowego.

Główne czynniki to [5]:

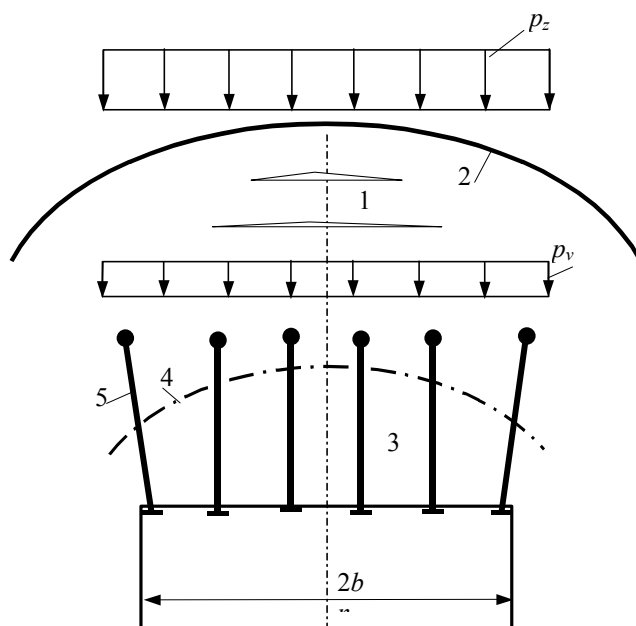
- zdolność przystosowania się układu kotwie — górotwór do zmieniających się warunków stanu zalegania górotworu naruszonego robotami podziemnymi,
- końcowy (docelowy) schemat (model) obliczeniowy z uwzględnieniem współpracy obudowy z naruszonym masywem skalnym,
- konstrukcyjne elementy obudowy decydujące o wielkości jej granicznej nośności (podporności) i trwałej stabilizacji (osłony) górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska podziemnego [2].

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

** Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska, Wrocław

2. Kształtowanie obudowy kotwiowej

Proces kształtowania obudowy kotwiowej jako bezpiecznego układu nośnego zależy przede wszystkim od właściwie przygotowanej technologii i racjonalnej realizacji robót podziemnych. To jedynie ściśle i skutecznie sterowane zabiegi techniczne umożliwiają uformowanie się, w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska, powłoki nośnej wyodrębnionej w górotworze jego zakotwieniem.



Rys. 1. Układ nośny zakotwionego stropu wyrobiska podziemnego: 1 — strefa górotworu naruszonego i odprężonego, 2 — naturalne sklepienie ciśnień, 3 — skotwiony górotwór nienaruszony, 4 — sklepienie nośne obudowy kotwiowej, 5 — kotew, b — połowa rozpiętości wyrobiska, p_z — ciśnienie pierwotne, p_v — ciśnienie odprężonego górotworu ($p_v \ll p_z$)

Zwykle masywna (bardzo gruba) powłoka skotwionego górotworu pracuje w stanie przedniszczeniowym i jest zdolna do przystosowania się do przenoszenia ciśnienia (oddziaływania) odprężającego się górotworu. Podstawowe cechy techniczne tak ukształtowanej konstrukcji to (rys. 1):

- zdolność do przenoszenia dużych trójosiowych naprężeń ściskających, co oznacza, że w układzie płaskich odkształceń, jako wiodące wyężenie konstrukcji, występuje jednoosiowe lub mimośrodowe jej ściskanie; taki układ nie jest czuły na lokalne przegrupowanie obciążeń czy sił wewnętrznych i sprzyja racjonalnej współpracy zdegradowanego górotworu z obudową;

- możliwość zrównoważenia wewnętrznych sił ścinających nie tylko spójnością górotworu, ale przede wszystkim jego tarciami wewnętrznymi wzbudzonymi dużymi siłami ściskającymi, co zapewnia ciągłość ustroju mimo jego wielowarstwowej, niejednorodnej, a nawet wręcz zdegradowanej spękaniami struktury wewnętrznej; komprymacja i nieciągłe dyslokacje zagęszczają i usztywniają strukturę układu nośnego, a degradacja otoczenia upodatkowuje jego podparcie (utwierdzenie) w masywie nienaruszonym;
- wstępne wzbudzenie biernych sił tarcia wewnętrznego poprzez początkowy naciąg kotwi lub natychmiastowe ich osadzenie w odsłoniętym wyrobisku górotworze przed jego odprężeniem; górotwór i spinające go kotwie tworzą wstępnie sprężony układ nośny zdolny do upodatkowania i przystosowania się do działających obciążeń, analogicznie jak w przypadku podatnej obudowy LP czy podatnych stojaków ciernych lub hydraulicznych.

Praktycznie w pierwszej kolejności jesteśmy w stanie ukształtować obudowę kotwio- wą jako obudowę osłonową stabilizującą górotwór w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska w jego stropie i ociosach, a rzadziej także w spągu. Taka obudowa chroni przed lokalnym obwałem, a o globalnej stateczności wyrobiska decyduje nośność masywu skalnego i stopień jego wyteżenia. Masyw pozostaje ośrodkiem ciągłym, a siły wewnętrzne w dowolnym jego przekroju nie przekraczają wytrzymałości górotworu na ściskanie, rozciąganie lub ścinanie. Nawet w warunkach uplastycznienia górotworu nie następuje przekroczenie pierwszego stanu granicznego — zniszczenie wyrobiska, a jedynie drugiego stanu — plastyczne płynięcie powodujące systematyczne jego zaciskanie.

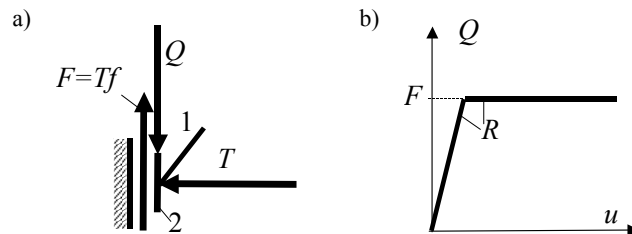
Proces zaciskania nie stanowi zagrożenia, ponieważ można nim sterować i dokładnie go przystosować do potrzeb użytkowników wyrobiska. Na tym etapie uplastycznieniu mogą ulegać również poszczególne kotwie. W projekcie należy jedynie określić ich indywidualną nośność graniczną.

Dopiero, choćby tylko lokalne, przekroczenie wytrzymałości górotworu, najczęściej na rozciąganie lub ścinanie, rozpoczyna proces degradacji masywu skalnego — jego nieciągłe deformacje lub dyslokacje — a w następnej kolejności proces redystrybucji sił wewnętrznych (naprężeń), co oznacza początek kształtowania się obudowy kotwiowej jako układu nośnego. Naruszony masyw górotworu staje się źródłem obciążeń wydzielonej kotwiami obudowy.

Na skutek postępującej degradacji masywu i coraz większego odprężenia górotworu obciążenia obudowy nie są siłami konserwatywnymi i sprzyjają jej odciążeniu, zwłaszcza w momencie, gdy podparcie (utwierdzenie w masywie) układu nośnego ulegnie upodatkowaniu.

W takim przypadku, oprócz nośności poszczególnych kotwi, musimy ustalić ich nośność grupową wraz z zakotwionym górotworem. Nośność ta musi przekraczać wytrzymałość utwierdzenia powstałej konstrukcji w masywie nienaruszonym, aby umożliwić jej upodatkowanie i odciążenie w wyniku nieskrępowanego odprężenia górotworu.

Schematem podatnej podpory obudowy kotwiowej może być „łyżwa” podobna do zamka ciernego stojaka lub podatnej obudowy LP (rys. 2).



Rys. 2. Schemat podpory — „łyżwy”: a) schemat podpory; b) wykres reakcji pionowej (R), F — siła tarcia, Q — siła ścinająca, T — rozpór sklepienia, u — przemieszczenie „łyżwy”, f — współczynnik tarcia, 1 — wezłowie sklepienia, 2 — „łyżwa”

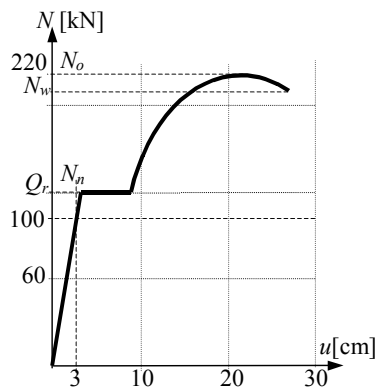
3. Dobór kotwi obudowy osłonowej

W obudowie osłonowej pojedyncze kotwie spełniają dwa podstawowe zadania:

- 1) podwieszają zakotwiony górotwór do masywu skalnego eliminując obwały bloków skały lub osłoniętego siatką gruzu skalnego; tworzą charakterystykę nośną zabudowanych kotwi;
- 2) spinają warstwy skalne zapobiegając ich rozwarstwieniu i pełnej degradacji; powodują wzmocnienie i usztywnienie rozwarstwiającego się górotworu.

3.1. Nośność pojedynczej kotwi

Charakterystykę nośną osadzonych w górotworze kotwi ustala się na ogół doświadczalnie, wrywając zabudowaną w nim kotwę (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyka nośna kotwi ekspansywnej (N): N_o i N_n — graniczna i nominalna nośność kotwi, N_w — siła osadzenia kotwi w górotworze, Q_r — granica plastyczności pręta, u — wydłużenie i wysuw kotwi

Z reguły ustala się trzy charakterystyczne wielkości pracy statycznej kotwi:

- 1) siłę wstępnego sprężenia, jakie nadajemy kotwi po jej zabudowie, aby uaktywnić jej współdziałanie z masywem skalnym (np. około 60 kN dla kotwi ekspansywnej);
- 2) nominalną nośność kotwi, którą ustala się na podstawie jej obciążenia siłą nominalną (np. 100 kN) z żądaniem, aby jej wydłużenie, a właściwie jej wysuw z otworu wiertniczego nie przekraczał ustalonej wartości (np. 2,5% lub 3 cm);
- 3) nośność graniczną (rzędu 220 kN) oznaczającą maksymalną siłę, przy której następuje albo zerwanie kotwi, albo jej wyrwanie z górotworu.

Racjonalnie zaprojektowana kotew powinna mieć równoważną wytrzymałość ciągła (pręta, rurki, kabla i liny) i zakotwienia w górotworze. Niszczące próby nośności kotwi powinny więc kończyć się normalnym rozkładem sił ich zerwania lub wyrwania. Nośność tak zaprojektowanej kotwi można określić na podstawie wytrzymałości jej ciągła, czyli

$$N_o = A_k R_r \leq N_w \quad (1)$$

gdzie:

- N_o — nośność graniczna kotwi,
- A_k — jej materialny przekrój poprzeczny,
- R_r — graniczna wytrzymałość na rozciąganie,
- N_w — siła osadzenia kotwi w górotworze.

Na podobnej zasadzie należy też ocenić nominalną nośność kotwi, przyjmując, że wyznacza ją granica plastycznego płynięcia ciągła, a więc

$$N_n = A_k Q_r \quad (2)$$

gdzie:

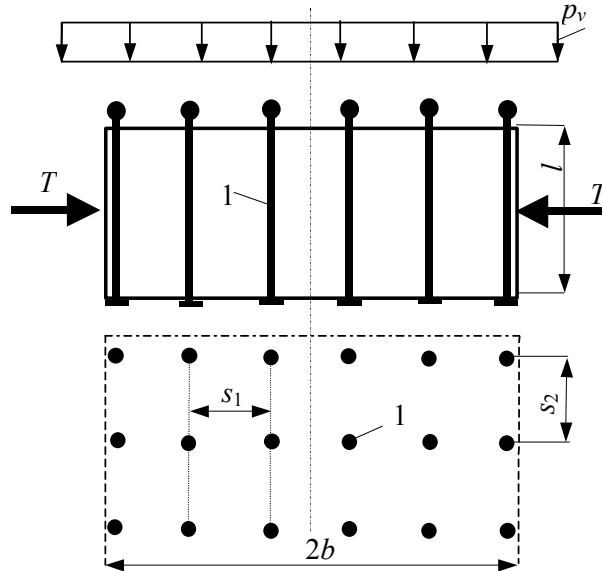
- N_n — nośność nominalna,
- Q_r — granica plastyczności przy rozciąganiu.

Kotew obudowy osłonowej, podwieszając skotwiony górotwór, musi zrównoważyć ciężar bloku przypadającego na każdą z nich (rys. 4)

$$G = l s_1 s_2 \gamma \quad (3)$$

gdzie:

- G — ciężar bloku,
- l — długość kotwi,
- s_1, s_2 — poprzeczny i podłużny rozstaw kotwi,
- γ — ciężar objętościowy górotworu.



Rys. 4. Rozstaw kotwi: s_1 — rozstaw w rzędzie, s_2 — rozstaw rzędów, 1 — kotwie, b — połowa rozpiętości wyrobiska, l — długość kotwi, p_v — obciążenie obudowy, T — rozpór górotworu skotwionego

Ze wzorów (1) i (3) wyznaczamy zależność parametrów geometrii obudowy osłono-
wej od fizycznych (mechanicznych) jej cech i właściwości górotworu

$$l s_1 s_2 \leq \frac{A_k R_r}{\gamma} \quad (4)$$

Po założeniu, konstrukcyjnie lub technologicznie, dwóch z trzech parametrów obudo-
wy ($l s_1$, $s_1 s_2$, $l s_2$) określamy trzeci z nich zgodnie z warunkiem (4).

3.2. Wzmocnienie skotwionego górotworu uwarstwionego

Poważnym zagrożeniem ze strony stropu wyrobisk podziemnych jest jego rozwarstwie-
nie, zwłaszcza odspajanie się bardzo cienkich warstewek, czy wręcz lamin uwarstwionego
górotworu. Poprzeczny wycinek o szerokości 1 m takiego górotworu utworzy warstwowo
zbudowaną belkę analogiczną do belki złożonej z niepołączonych warstw, a więc o małym
wskaźniku wytrzymałości i małej sztywności na zginanie. Wskaźnik wytrzymałości belki
złożonej z m jednakowych warstw o grubości h_w wynosi (rys. 5)

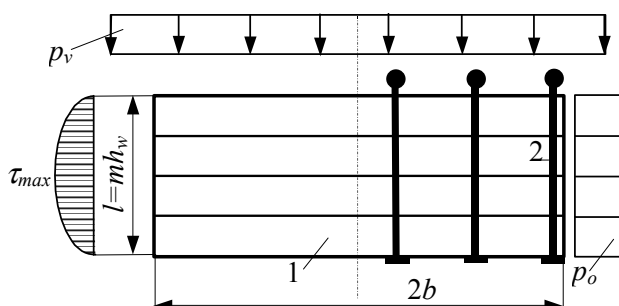
$$W = m \frac{h_w^2}{6} \quad (5)$$

a moment bezwładności

$$I = m \frac{h_w^3}{12} \quad (6)$$

gdzie:

m — liczba warstw,
 h_w — ich grubości.



Rys. 5. Schemat belki wielokrotnej: 1 — warstwy, 2 — kotwie, h_w — grubość warstw, m — ich liczba, τ_{max} — maksymalne poziome naprężenie ścinające, p_o — sprężenie warstw kotwiami

Charakterystyki te ewidentnie wzrosną po skotwieniu górotworu, podobnie jak po połączeniu desek gwoździami lub śrubami:

— wskaźnik wytrzymałości (m razy)

$$W = m \frac{(mh_w)^2}{6} = m^2 \frac{h_w^2}{6} \quad (7)$$

— moment bezwładności (m^2 razy)

$$I = \frac{(mh_w)^3}{12} = m^3 \frac{h_w^3}{12} \quad (8)$$

Jak widać, zarówno wytrzymałość na zginanie, jak i sztywność belki zespolonej jest wielokrotnie większa niż belki z niepołączonych ze sobą warstw. Jednak żeby belka stała się ustrojem zespolonym, między jej warstwami musi wystąpić tarcie równoważące siły ścinania działające poziomo wzdłuż jej osi obojętnej. Posłuży do tego wstępne sprężenie warstw górotworu naciągniętymi kotwiami.

Kotwie wstępnie sprężone lub hamujące odprężenie pierwotnie ściśniętego górotworu wywołują pionowe normalne ciśnienie p_o , które, dociskając warstwy górotworu, musi wy-

eliminować ewentualny ich poślizg wywołany maksymalnym naprężeniem ścinającym, działającym poziomo w osi obojętnej przekroju belki

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2l} \leq p_o f_1 \quad (9)$$

gdzie:

- τ_{\max} — maksymalne poziome naprężenie ścinające,
- Q — siła poprzeczna,
- l — długość kotwi (wysokość belki),
- p_o — ciśnienie od naciągu kotwi,
- f_1 — współczynnik tarcia między warstwami górotworu.

Po oszacowaniu równomiernego obciążenia belki

$$p_v \geq \gamma l \quad (10)$$

określamy siłę ścinającą

$$Q = b p_v \quad (11)$$

a następnie dopuszczalny sprężysty docisk warstw wynikający z zależności

$$p_o = \frac{n N_n}{2b} = \frac{n A_k Q_r}{2b} \quad (12)$$

gdzie:

- p_v — obliczeniowe ciśnienie górotworu [1],
- b — połowa rozpiętości wyrobiska,
- n — liczba kotwi w rzędach rozstawionych co 1 m,
- N_n — nominalna siła naciągu kotwi (2).

Z podstawienia zależności (11) i (12) do równania (9) wyznaczamy niezbędne parametry osłonowej obudowy kotwiowej — liczbę lub długość kotwi

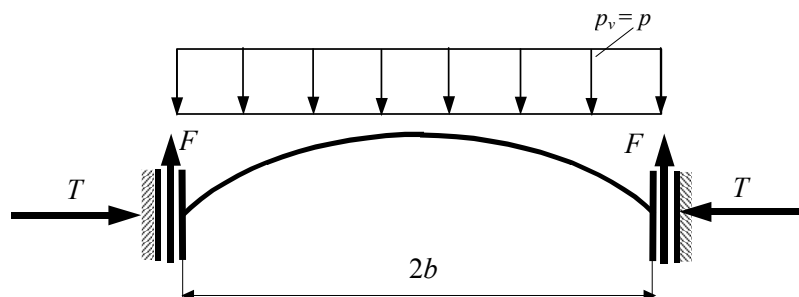
$$nl \geq \frac{3b^2 p_v}{A_k Q_r f_1} \quad (13)$$

Tak spięty kotwiami górotwór nie ulegnie rozwarstwieniu i nie rozpocznie się proces jego degradacji.

Zabezpieczona przed obwałami i rozwarstwieniem obudowa osłonowa może jednak ulec zawalowi na skutek pionowego ścięcia całej powłoki skotwionego górotworu. Jest to globalne zagrożenie wyrobiska, które wymaga obudowy nośnej.

4. Projektowanie parametrów obudowy nośnej

Docelowo nośną obudowę kotwioną projektujemy jako konstrukcją podatną, z upodmiotowieniem się jej podparciem (rys. 6). Schematem obliczeniowym obudowy jest racjonalne (bezmomentowe) sklepienie ciśnień podparte „łyżwami” i obciążone równomiernie rozłożonym ciśnieniem górotworu i ciężarem własnym. Modelem ilustrującym działanie takiej obudowy może być korek zamykający naczynie wypełnione cieczą gazowaną.



Rys. 6. Schemat podatnego sklepienia ciśnień: p_v — obciążenie równe nośności (p),
 T — rozpór, F — siła tarcia, b — połowa rozpiętości łuku

O skuteczności zakorkowania naczynia decyduje umiarkowana długość korka. Zbyt krótki korek ulegnie wysadzeniu, gdy nawet nieznacznie wzrośnie ciśnienie cieczy. Nadmiernie długi korek nie ustąpi przy wzroście ciśnienia i wówczas naczynie ulegnie rozsadzeniu. Korek o umiarkowanej długości zareaguje na wzrost ciśnienia nieznacznym wysunięciem się z otworu naczynia, zwiększy jego objętość i spowoduje wyraźny spadek ciśnienia cieczy, jako płynu nieściśliwego. Cechą skuteczności zakorkowania naczynia jest zatem zdolność przystosowania się korka do ciśnienia zawartej w nim cieczy gazowanej. Tak też należy rozumieć skuteczność zabezpieczenia wyrobiska podziemnego obudową kotwioną obciążoną ciśnieniem odprężającego się górotworu i jego ciężarem własnym.

Analogicznie do korka długość kotwi decyduje o możliwości upodmiotowienia obudowy i odprężenia górotworu, a w konsekwencji o skutecznym odciążeniu układu nośnego, czyli o jego przystosowaniu się do zmienionych warunków pracy statycznej. Długość ta powinna więc wynikać z warunku ścięcia podpory „łyżwy” w kierunku pionowym, wzdłuż maksymalnej siły ścinającej

$$Q = Tf \tag{14}$$

gdzie:

- Q — siła ścinania w wezłowie sklepienia (11),
- T — rozpór sklepienia,
- f — współczynnik suchego tarcia naruszonego górotworu.

Jak wiadomo, w bezmomentowym sklepieniu ciśnien rozpór wynosi [1]

$$T = \frac{p_v b^2}{2h_o} \quad (15)$$

gdzie:

- p_v — obciążenie sklepienia,
- b — połowa jego rozpiętości,
- h_o — strzałka wzniesienia klucza.

Strzałkę sklepienia uformowanego wewnątrz skotwionego górotworu wyznaczamy natomiast z dwóch warunków (rys. 7):

— granicznego ściskania jednoosiowego

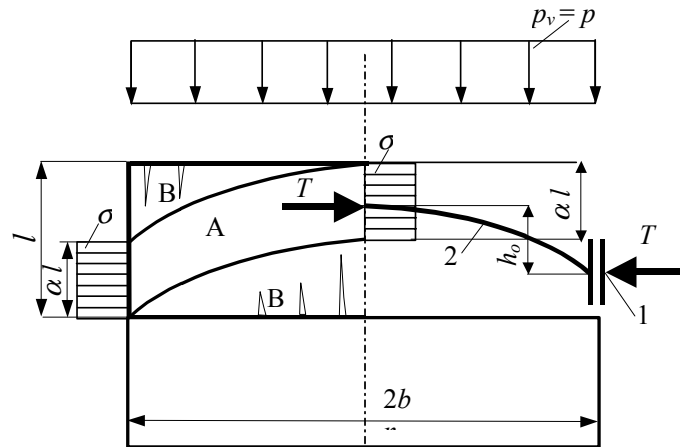
$$\sigma = \frac{T}{\alpha A} = \frac{T}{\alpha l} \leq R_c \quad (16)$$

— racjonalnego procesu degradacji górotworu

$$h_o = (1 - \alpha)l \quad (17)$$

gdzie:

- α — współczynnik degradacji przekroju poprzecznego powłoki spiętej kotwiami,
- A — przekrój poprzeczny powłoki skotwionego górotworu równy długości kotwi.



Rys. 7. Sklepienie ciśnien jako rezultat przystosowania się skotwionego górotworu: A — górotwór nienaruszony, B — górotwór zdegradowany, l — długość kotwi, α — współczynnik degradacji skotwionego górotworu, h_o — strzałka sklepienia, σ — jednoosiowe ściskanie sklepienia ciśnien, 1 — podpora „łyżwa”, 2 — sklepienie

Po wykorzystaniu związków (15), (16) i (17) wyznaczamy obciążenie obudowy

$$p_v = 2(1 - \alpha)\alpha \left(\frac{l}{b}\right)^2 R_c \quad (18)$$

Z warunku ekstremum tej funkcji $dp_v / d\alpha = 0$, przy $\alpha = 0,5$, otrzymujemy optymalną nośność (podporność) obudowy kotwiowej p . Nośność ta powinna spełniać następujące kryterium bezpieczeństwa zakotwionego stropu

$$\gamma l \leq p \leq \frac{R_c}{2} \left(\frac{l}{b}\right)^2 \quad (19)$$

co oznacza, że obudowa musi zrównoważyć ciśnienie statyczne, czyli ciężar skotwionego górotworu oraz część ciśnienia deformacyjnego odprężającego się masywu.

Z kolei, z równania (14) i (17) przy $\alpha = 0,5$ wynika optymalna długość kotwi obudowy podatnej

$$l = fb \quad (20)$$

a graniczną nośność (podporność) tej ostatniej określa zmodyfikowane kryterium (19)

$$\gamma bf \leq p \leq \frac{R_c}{2} f^2 \quad (21)$$

Dobór obudowy nośnej rozpoczynamy więc od ustalenia granicznej rozpiętości wyrobiska, która wynika z lewo- i prawostronnego warunku (21)

$$2b \leq \frac{R_c}{\gamma} f \quad (22)$$

W następnej kolejności przyjmujemy rozpiętość uzasadnioną potrzebami technicznymi i ze wzoru (20) wyznaczamy konieczną długość kotwi.

Łatwo zauważyć, że skuteczność zabezpieczenia wyrobiska kotwiami zależy bezpośrednio od wytrzymałości górotworu na ściskanie i technicznej możliwości jej podwyższenia poprzez takie zabiegi jak:

- wstępne sprężenie kotwi zapewniające wzrost wytrzymałości górotworu na ściskanie w trójosiowym stanie naprężenia;
- iniekcyjne wzmocnienie górotworu zakotwionego (cementacja, bitumizacja itp.).

Skuteczność zabezpieczenia wyrobiska można też regulować podłużnym rozstawem (s_2) poszczególnych rzędów kotwi:

- po zagęszczeniu rozstawu $s_2 < 1$ m skuteczność zwiększy się;
- po rozrzedzeniu rzędów $s_2 > 1$ m skuteczność zmaleje.

5. Wnioski — wytyczne projektowania

Procedury projektowania konstrukcji podziemnych muszą być ściśle powiązane z ich wykonawstwem i konkretnymi warunkami geoinżynierskimi, a mianowicie:

- 1) Analizujemy celowość zastosowania obudowy kotwiowej jako obudowy nośnej lub osłonowej. Jeśli decyzja w tym zakresie nie jest jednoznaczna, projektujemy obudowę nośną z przystosowaniem jej do potrzeb obudowy osłonowej. Proces projektowania rozpoczynamy więc od ustalenia parametrów wyrobiska i górotworu pod kątem spełnienia warunku (22). Efektem tych rozważań powinno być ustalenie długości kotwi zgodnie z równaniem (20).
- 2) Po ustaleniu długości kotwi podejmujemy decyzję w sprawie rozstawu kotwi (4) w zależności od ich nośności (1). Najczęściej przyjmujemy rozstaw jednometrowy w rzędzie i między rzędami (1 kotew/m^2), ale można też wprowadzić zróżnicowanie rozstawu (s_1 i s_2). Rozstaw ten może też być uzależniony od dodatkowego zabezpieczenia osłonowego (siatką, torkretem itd.).
- 3) W górotworze uwarstwionym dodatkowej analizie wymaga zarówno nośność kotwi (2), jak i ich rozstaw w rzędzie (13). Głównym zadaniem weryfikacji tych elementów jest wyeliminowanie możliwości rozwarstwienia górotworu w stropie wyrobiska.
- 4) Ważnym czynnikiem weryfikacji zaprojektowanej obudowy musi być jej monitoring i badania próbne *in situ*. Analiza zebranych wyników doświadczalnych powinna być podstawą do potwierdzenia lub skorygowania przyjętych w projekcie parametrów obudowy kotwiowej. W razie nieprzewidywalnych zagrożeń można zaplanować nadzwyczajne wzmocnienie obudowy. Jest to proste zadanie do wykonania dla renomowanych firm wykonawczych.

LITERATURA

- [1] *Galczyński S.*: Podstawy budownictwa podziemnego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2001
- [2] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Charakterystyka nośności zakotwionego stropu płaskiego jako podatnej niekonwencjonalnej obudowy podziemnej. ZSMGiG XXIX, Krynica 2006, 465–476
- [3] *Galczyński S., Wojtaszek A.*: Charakterystyka nośności zakotwionego stropu jako podatnego sklepienia ciśnienia. ZSMGiG XXIX, Krynica 2006, 477–485
- [4] *Rzepecki W., Siczek R.*: Badania i certyfikacja obudowy kotwiowej dla górnictwa miedziowego w aspekcie nowych przepisów prawnych wynikających z członkostwa w UE. ZSMGiG XXIX, Krynica 2006, 453–456
- [5] *Żukowski S.*: Ocena bezpieczeństwa płaskich konstrukcji prętowych w aspekcie teorii przystosowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2006