

Andrzej WOJTUSIAK

OBR-BG "BUDOKOP" - Mysłowice

## OBUDOWA POŁĄCZEŃ WYROBISK HYDROTECHNICZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono specyficzne warunki pracy sztolni ciśnieniowych i konieczność przestrzennej analizy konstrukcji obudowy ich rozgałęzień. Omówiono wpływ warunków realizacyjnych na etapowość wznoszenia obudowy. Opisano zrealizowane przykładowe rozwiązanie konstrukcji technologii wykonania rozgałęzienia.

### 1. Wprowadzenie

Obudowie połączeń wyrobisk górniczych poświęca się znacznie mniej uwagi w pracach badawczych i konstrukcyjnych niż obudowie samych wyrobisk. Sytuacja ta jeszcze się pogłębia w odniesieniu do wyrobisk hydrotechnicznych. W bogatej literaturze poświęconej problematyce obudowy sztolni ciśnieniowych [5], [7], [8], [10] trudno spotkać opracowania dotyczące analizy pracy, doboru czy projektowania obudowy ich połączeń. Należy tu jeszcze podkreślić znacznie wyższą skalę trudności opisu warunków pracy rozgałęzienia w stosunku do warunków pracy pojedynczej sztolni hydrotechnicznej. Najprostsze bowiem założenie przyjmowane zazwyczaj dla wyrobiska pojedynczego - niezmiennosc warunków na jego długości, nie jest dla rozgałęzienia dopuszczalne. W Górnictwie wynika to głównie z geometrii rozgałęzień, a w hydrotechnice również z uwagi na nieuniknione tu zaburzenia w przepływie mas wodnych. Pomimo braku opracowań badawczych rozgałęzienia sztolni ciśnieniowych stosuje się dość często albo dla rozłożenia mas wodnych na dwie turbiny, albo dla umożliwienia alternatywnego kierowania wodą - na turbinę lub bezpośrednio do spustu. Obudowę tych rozgałęzień projektowane na ogół jako modyfikację kształtu obudowy sztolni przed rozgałęzieniem. Kierunek ten jest możliwy w średnich lub korzystnych warunkach geologiczno-górnictwowych, gdzie zapewnienie stateczności komory rozgałęzienia i wyrobisk pojedynczych wymaga podobnych zabezpieczeń. Sytuacja komplikuje się w warunkach, w których np. skutkiem małego nadkładu wykonanie rozgałęzienia może spowodować potrzebę przeniesienia przez obudowę całego ciężaru nadległych skał, a wykonanie pojedynczej sztolni doprowadzi do powstania jedynie pewnej strefy odprężonej. W takich warunkach konieczne staje się zastosowanie dla rozgałęzień odmiennej obudowy i odpowiedniej technologii wykonawstwa.

## 2. Warunki pracy obudowy wyrobisk ciśnieniowych

Sztolnie, szyby czy komory ciśnieniowe pracują w zróżnicowanych warunkach użytkowania. Zasadniczym parametrem opisu tych warunków są wielkości wewnętrznych ciśnień hydrostatycznych i hydrodynamicznych. Problematykę zmian warunków hydrotechnicznych pracy sztolni można w uproszczeniu sprowadzić do dwu skrajnych przypadków [2]:

- brak ciśnień wewnętrznych i najniekorzystniejszy możliwy rozkład ciśnień górotworu z ewentualnym wodnym ciśnieniem zewnętrznym,
- maksymalna wartość ciśnień wewnętrznych hydrostatycznych i hydrodynamicznych oraz najniekorzystniejszy możliwy rozkład oporów biernych.

W rozgałęzieniach opis drugiego skrajnego przypadku ulega znacznemu skomplikowaniu z uwagi na cały szereg możliwych rozkładów ciśnień hydrodynamicznych.

W pracy [10] wykazano, że dla ciśnień hydrodynamicznych górotwór jest znacznie bardziej liczącym się partnerem we współpracy z obudową niż w przejmowaniu ciśnień hydrostatycznych. Wobec dużych trudności z określeniem rozkładu ciśnień hydrodynamicznych świadomość większego udziału masywu skalnego w ich przejęciu pozwala na dalekie uproszczenia. Zaleca się [11] uwzględnianie ciśnień hydrodynamicznych jako wzrostu ciśnień hydrostatycznych (średnio o 35%). Dla przypadków braku ciśnień wewnętrznych (stan remontowy lub awaryjny) obudowę rozgałęzienia wyrobisk hydrotechnicznych należy traktować analogicznie do rozgałęzień wyrobisk górniczych. Przy określaniu ciśnień górotworu należy dla stanów remontowych czy awaryjnych uwzględnić ewentualne niekorzystne skutki zawodnienia na własności masywu skalnego.

Konieczność etapowej realizacji rozgałęzienia wymaga natomiast przeprowadzenia analizy obciążeń i wyęźnienia obudowy każdego kolejnego etapu wykonawczego (rys. 4).

## 3. Problemy projektowania obudowy rozgałęzień

Znaczne zazwyczaj wymiary sztolni hydrotechnicznych powodują, że w miejscach ich rozgałęzienia powstaje duże wyrobisko komorowe. Jeżeli wyrobisko to jest zlokalizowane stosunkowo płytko i w słabym górotworze jego realizacja stwarza wielkie trudności zwłaszcza z utrzymaniem stropu w obudowie wstępnej.

Względy realizacyjne rzutują tu zdecydowanie na rozwiązanie konstrukcyjne obudowy. Konieczne jest etapowe wykonawstwo rozgałęzienia z odpowiednim postępowaniem realizacji sztywnej (korzystnie ostatecznej) obudowy.

Przy zastosowaniu samodzielnego pancierza stalowego dla przejęcia wewnętrznych ciśnień hydrostatycznych i hydrodynamicznych jego montaż powi-

nień być prowadzony całościowo, co wymaga utrzymania komory rozgałęzienia w obudowie wstępnej.

Bardzo prawdopodobne niedokładności kształtu rozgałęzienia przy etapowej realizacji pancierza mogą doprowadzić do powstania znacznych zginąń nawet skutkiem ciśnień hydrostatycznych.

Dla potwierdzenia powyższej uwagi przeanalizujemy najprostszy przypadek deformacji pancierza, jakim jest zmiana kołowo-walcowego kształtu na owalno-walcowy o odchyleniach  $\delta_{\psi} = \delta \cdot \cos 2\psi$ .

Przy równomiernym hydrostatycznym ciśnieniu wewnętrznym "p" (dla uproszczenia pominięto liniową zależność p od wysokości sztolni) momenty zginające są proporcjonalne do odchylen od kształtu kołowego i siły osłowej w pierścieniu kołowym  $N = p \cdot r_w$ :

$$M = N \cdot \delta_{\psi} = p \cdot r_w \cdot \delta \cdot \cos 2\psi$$

$$M_{\max} = p \cdot r_w \cdot \delta$$

$$(\sigma_M)_{\max} = \frac{p \cdot r_w \cdot \delta}{W}$$

W - wskaźnik zginania przekroju pancierza.

Sumaryczne naprężenie we włóknach skrajnych (rozciąganych) wyniesie:

$$\sigma_{\max} = \frac{p \cdot r_w \cdot \delta}{W} + \frac{p \cdot r_w}{F}$$

Porównanie naprężenia  $\sigma_{\max}$  z wartością naprężeń w pancierzu niezdeformowanym  $\sigma_0$  wskazuje na znaczny wzrost:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = 1 + \frac{F}{W} \cdot \delta$$

Dla przekroju prostokątnego już dla  $\delta = h$  następuje 7-krotny wzrost naprężeń w pancierzu.

Nie należy zatem poszukiwać rozwiązań obudowy rozgałęzienia, traktujących samodzielny pancierz stalowy jednocześnie jako etapowo realizowany ustrój nośny obudowy komory.

Korzystniej sytuacja przedstawia się w przypadku stosowania pancierza stalowego współpracującego z górotworem w przejściu ciśnień hydrostatycznych i hydrodynamicznych. Konieczność zapewnienia takiej współpracy wymaga bowiem wykonania konstrukcji pośredniczącej w tej współpracy.

Umożliwia to wykorzystanie tej konstrukcji jako elementu usztywniającego pancierza i łagodzącego skutki ewentualnych odchylen jego kształtu od projektowanego. Radykalnym rozwiązaniem jest tu zastosowanie takiej konstrukcji, która będąc zdolna do przenoszenia części ciśnień hydrostatycznych z pancierza na górotwór, mogłaby samodzielnie przejąć ciśnienie górotworu.

Ten trójskładnikowy ustrój nośny (górotwór - obudowa - pancierz stalowy) będzie współpracował w przejęciu obciążeń użytkowych w warunkach, których opis zależy od następujących czynników:

- własności i budowy geologicznej górotworu,
- aktualnego stanu naprężeń w górotworze,
- geometrii rozgałęzienia,
- własności, kształtu i stanu wytężenia obudowy ostatecznej,
- jakości kontaktu górotwór-obudowa,
- jakości kontaktu pancierz stalowy-obudowa,
- statyczny czy dynamiczny charakter obciążenia wodnego.

W literaturze [5], [11] znane są rozwiązania współpracy kołowo-symetrycznych układów górotwór-pancierz stalowy, górotwór-beton czy górotwór-beton-pancierz stalowy. Seeber [7] rozróżnia trzy przypadki rozkładów naprężeń w masywie skalnym:

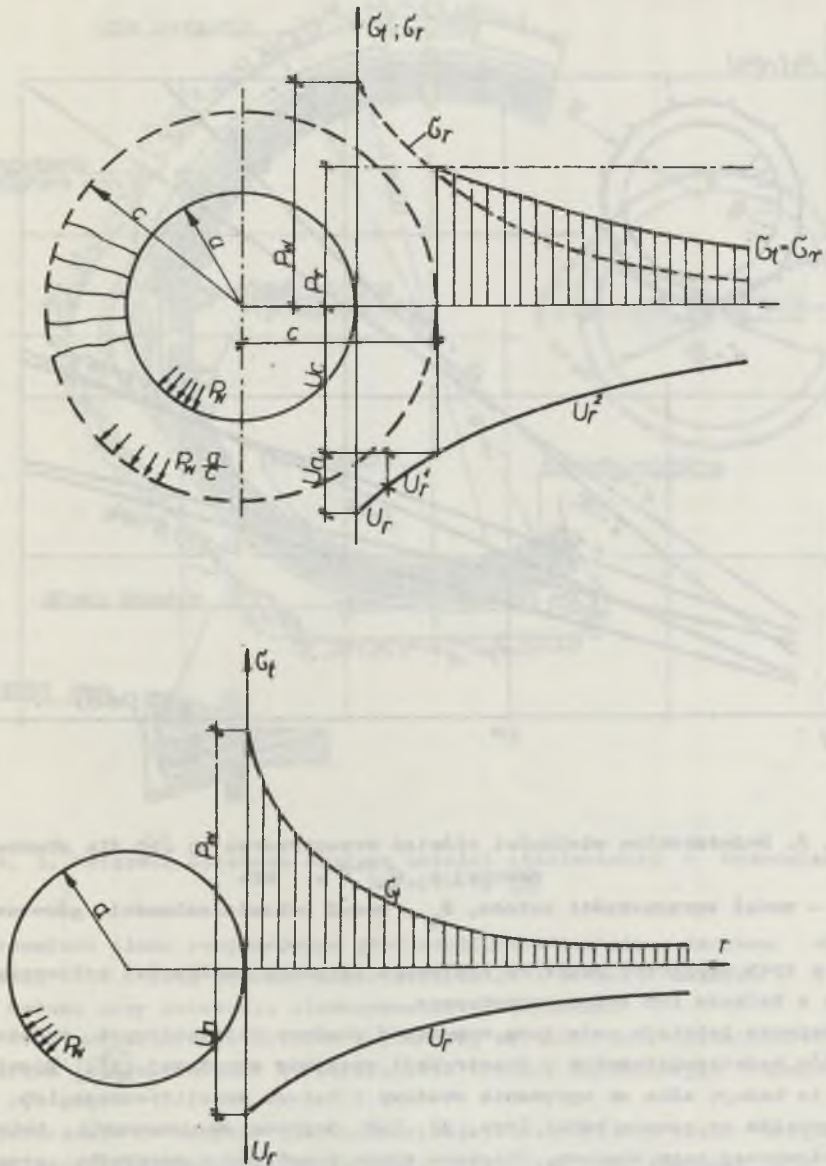
- a) masyw skalny wytrzymały na rozciąganie, przy czym ciśnienie wewnętrzne jest mniejsze od tej wytrzymałości,
- b) masyw wytrzymały na rozciąganie, ale ciśnienie wewnętrzne przekracza tę wartość,
- c) masyw skalny spękany pod działaniem ciśnienia nadkładu.

Rozkłady naprężeń radialnych  $\sigma_r$ , obwodowych  $\sigma_t$  oraz przemieszczeń  $u_r$  dla przypadków "a" i "b" przedstawia za [7] rys. 1.

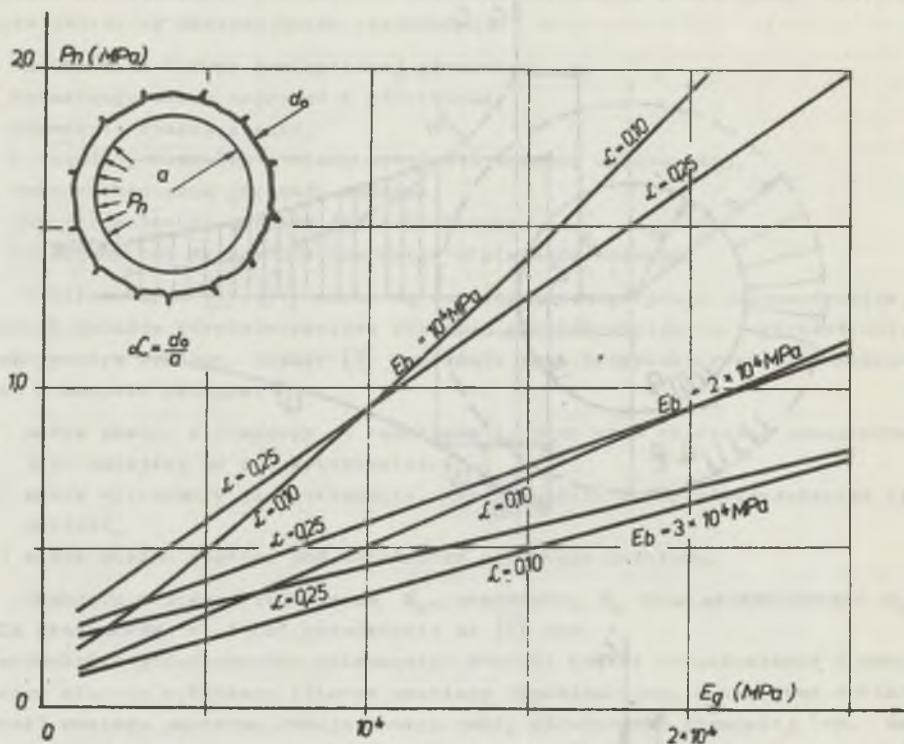
Technologia jednoczesnego wykonawstwa obudowy komory rozgałęzienia i pancierza stwarza wykonawcy istotne problemy organizacyjne, a wymagana dokładność montażu pancierza hamuje postęp robót górniczych. Zazwyczaj (np. na el. Porąbka-Żar) opancerzenie sztolni i rozgałęzienia montowane były pod osłoną górniczej obudowy wstępnej (odrzwiowej, kotwowej, powłokowej czy murowej), po czym zabetonowywano przestrzeń pomiędzy tą obudową a pancierzem.

W przypadku małych ciśnień wewnętrznych (do 0,8 MPa) wymaganą szczelność obudowy uzyskać można stosując beton wodoszczelny. Rezygnacja z pancierza stalowego w rozgałęzieniu umożliwia zmniejszenie wyłomu poprzez wyeliminowanie przestrzeni montażowej. Zastosowanie betonu niezbrojonego możliwe jest jedynie w korzystnych lub średnich warunkach geologicznych. Na wykresie (rys. 2) podano za [5] zależność pomiędzy nośnością układu obudowa betonowa-górotwór (na ciśnienie wewnętrzne) a modułem sprężystości górotworu przy ściszeniu  $E_g$ , modułem sprężystości betonu przy rozciąganiu  $E_{b2}$ , stosunkiem grubości obudowy do promienia sztolni  $\alpha$  i przy założeniu dopuszczalnej wartości naprężeń rozciągających w betonie na poziomie 1 MPa.

Udział górotworu słabego w przejmowaniu ciśnień wewnętrznych jest niewielki, stąd wynika potrzeba wykonania wysoko wytrzymałych obudów nawet dla ciśnień wewnętrznych nie przekraczających 0,8 MPa. Oprócz zastosowa-



Rys. 1. Rozkład naprężeń  $G_r$  i  $G_t$  i przemieszczeń  $U_r$  w masywie skalnym wokół sztolni ciśnieniowej wg [6], [7]  
 a - masyw skalny jednorodny, izotropowy  $p_w > R_r$ , b - masyw skalny jednorodny, izotropowy  $p_w < R_r$

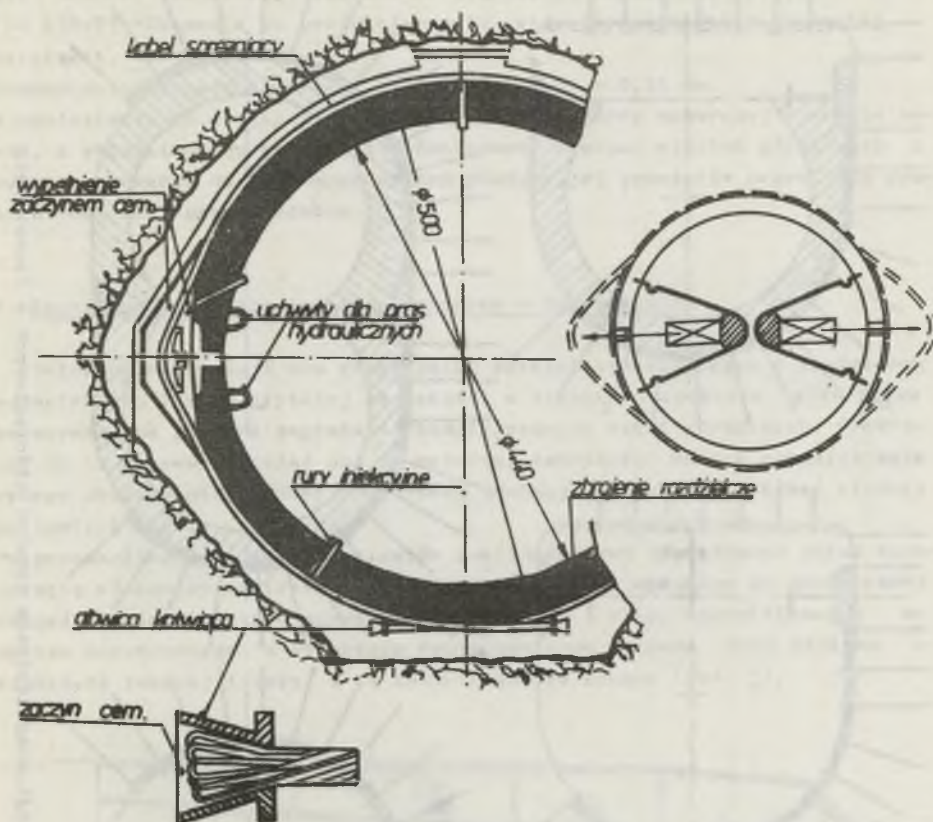


Rys. 2. Dopuszczalne wielkości ciśnień wewnętrznych wg [5] dla obudowy betonowej o  $\sigma_T^{\text{dop}} = 1$  MPa

$E_b$  - moduł sprężystości betonu,  $E_g$  - moduł odkształcalności gąrtworu

nia w tych warunkach pancierza stalowego istnieją możliwości wykonania obudowy z żelbetu lub betonu sprężonego.

Na świecie istnieje cała gama rozwiązań obudowy ciśnieniowych sztolni i szybów hydrotechnicznych w konstrukcji wstępnie sprężonej [3]. Rozwiązania te bazują albo na sprężeniu obudowy z betonu monolitycznego, lub prefabrykatów za pomocą kabli (rys. 3), lub poprzez zastosowanie iniekcji ciśnieniowej poza obudową. Pierwsza grupa rozwiązań w przypadku rozgałęzień jest praktycznie nieprzydatna z uwagi na skomplikowany przestrzenny układ kabli sprężających. W odniesieniu do rozgałęzień zagadnienie współpracy strefy zainiektowanej z obudową betonową wymaga dalszych studiów i doświadczeń.



Rys. 3. Wstępnie sprężona obudowa sztolni ciśnieniowej w hydroelektrowni Mareges wg [3]

Stosunkowo słabo rozpracowana jest współpraca żelbetu z masywem skalnym. Wynika to z nikłej poprawy odkształcalności i nośności żelbetu w stosunku do betonu przy założeniu niedopuszczania zarysowań.

Przy projektowaniu obudowy żelbetowej wyrobisk hydrotechnicznych w Czorsztynie [2] dopuszczono do zarysowania obudowy ograniczając rozwarście rys do 0,1 mm.

Dopuszczenie do zarysowania obudowy żelbetowej otwiera przed projektantem możliwości racjonalnego wymiarowania przekroju oraz poprawia opis warunków współpracy żelbetu z górotworem. Poprawa współpracy z górotworem wynika ze wzrostu odkształcalności obudowy żelbetowej po zarysowaniu. Do czasu zarysowania maksymalne (graniczne) wydłużenie batonu sięga 0,15 mm/m, a z uwzględnieniem 0,1 mm rozwarcia rys może przekroczyć 0,25 mm/m. Zarysowa-

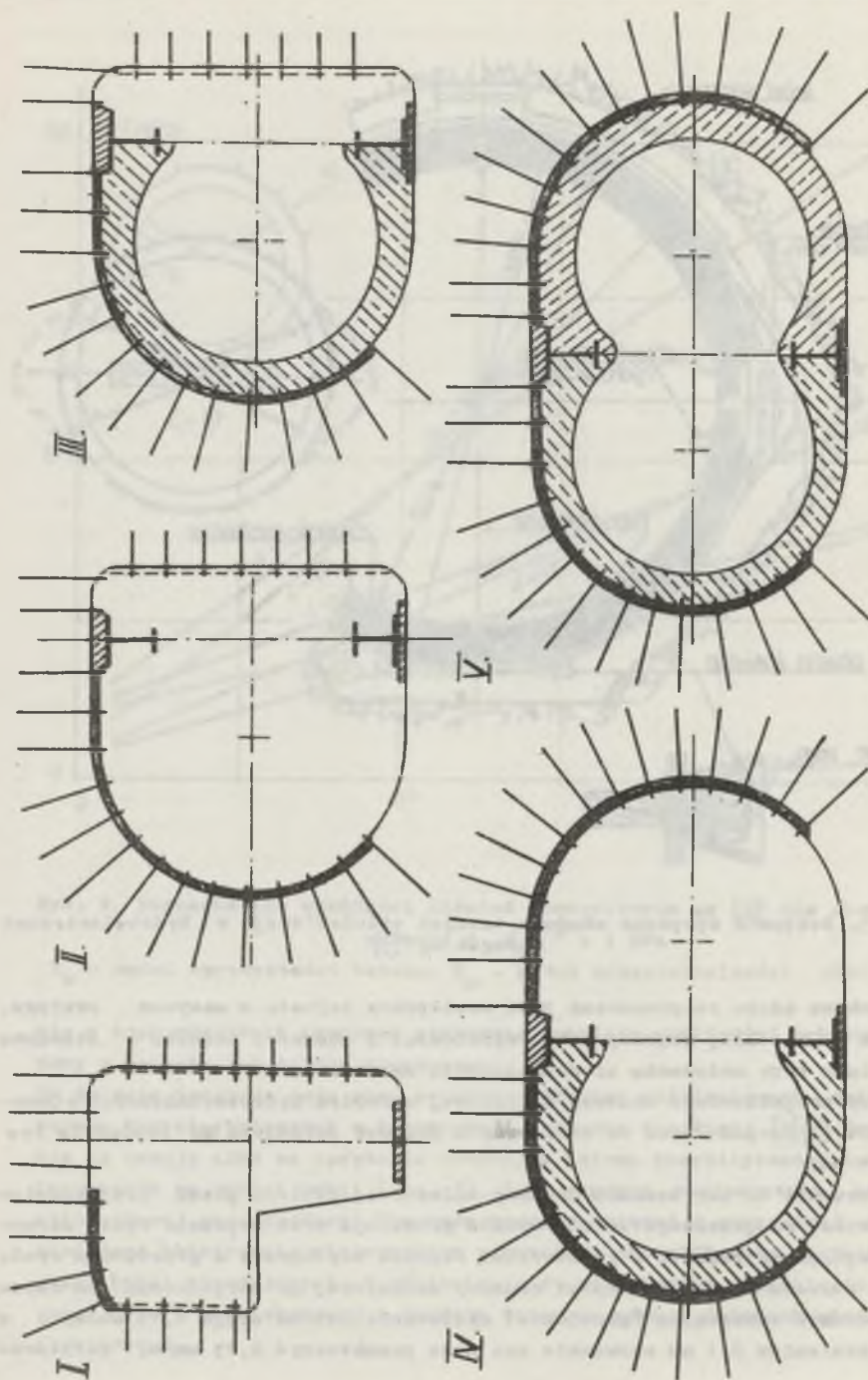


Рис. 4. Этапы реализации разгазения штоли ciśнениовых в Чорсрзтыне



nie obudowy żelbetowej sztolni ciśnieniowych dopuszczają przepisy ZSRR (SN 238-73 "Ukazania po projektowaniu gidrotechnicznych tunelowej - Stroizdat, 1974).

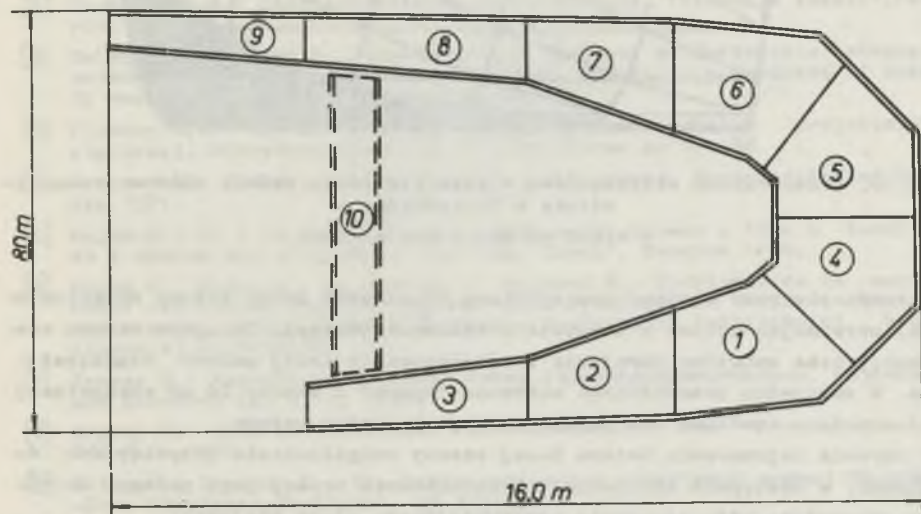
Dopuszczalne rozwarcia rys wg [3] wynoszą 0,05 - 0,15 mm.

W odniesieniu do rozgałęzień, gdzie grubość obudowy zazwyczaj wyraźnie rosną, a skomplikowany kształt i zróżnicowany rozkład ciśnień górniczych i wodnych prowadzi do znacznych zginąń obudowy, jej pęknięcie przez całą grubość jest mało prawdopodobne.

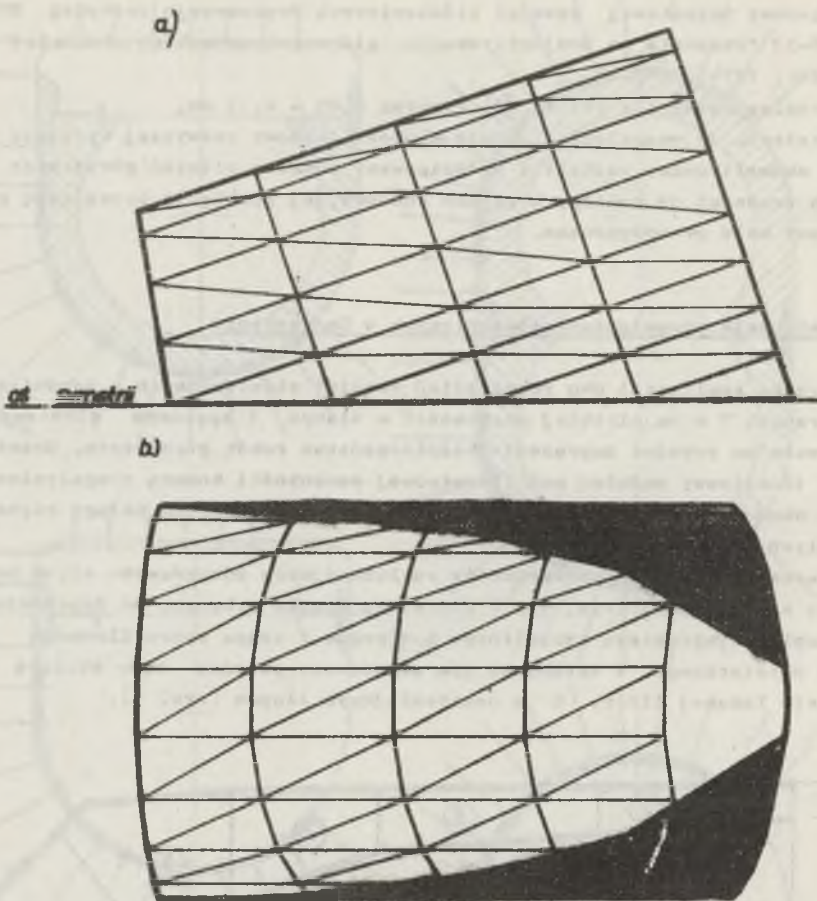
#### 4. Konstrukcja rozgałęzień ciśnieniowych w Czorsztynie

Potrzeba realizacji dwu rozgałęzień sztolni ciśnieniowych o średnicach wewnętrznych 7 m na płytkiej głębokości w słabym i spękanym górotworze wskazywała na poważne zagrożenie bezpieczeństwa robót górniczych. Oceniono, że 12-metrowy nadkład nad 15-metrowej szerokości komorą rozgałęzienia wymaga obudowy natychmiast podporowej zdolnej do przejęcia całego ciężaru nadległych skał.

Po przeanalizowaniu kilku wariantów realizacyjnych zdecydowano się na technologię wieloetapową (rys. 4). W pierwszym etapie wykonano po dwusiecznej rozgałęzienia wyrobisko szczelinowe o stropie i spągu wyprofilowanym wg obrysu ostatecznego. W wyrobisku tym zabudowano potężną ramę stalową w kształcie leżącej litery U z usztywniającym słupem (rys. 5),



Rys. 5. Rama stalowa rozgałęzienia ciśnieniowego w Czorsztynie. Numery elementów montażowych wg kolejności montażu



Rys. 6. Przestrzenna obliczeniowa siatka prętowego modelu obudowy rozgałęzienia w Czorsztynie  
- widok od osi rozgałęzienia

Po rozparciu ramy o strop przystąpiono do wyłomów lewej połowy rozgałęzienia, utrzymując ociosy w obudowie kotwioło-betonowej. Kolejnym etapem realizacji była zabudowa zbrojenia i zabetonowanie lewej połowy rozgałęzienia. W zbrojeniu przewidziano ochronną "rynnę" z blachy 20 mm stanowiącej jednocześnie szalunek dla parabolicznego kształtu naroża.

Po okresie dojrzewania betonu lewej strony rozgałęzienia przystąpiono do wyłomów, a następnie zbrojenia i zabetonowania prawej jego połowy. Ostatnią czynnością było usunięcie usztywniającego słupa stalowego.

Ramę stalową i żelbetową obudowy rozgałęzienia zwymiarowano na podstawie wyników obliczeń na EMC zamodelowanego w postaci prętowej siatki przes-

trzennej ustroju nośnego (rys. 6). Ciśnienia wewnętrzne zamodelowano jako działające na węzły siatki siły skupione skierowane prostopadle do powierzchni wewnętrznej obudowy rozgałęzienia. Odpór górotworu modelowano w postaci promieniowo usytuowanych wahaczy o określonej sztywności. Konstrukcję obudowy zaprojektowano w OBR-BG "Budokop" Mysłowice, a bezawaryjną realizację przeprowadziło PRG Bytom.

## 5. Zakończenie

Rozwidlenie sztolni ciśnieniowych wymaga często obudowy umożliwiającej jej etapową realizację. Znaczne wymiary komory rozwidlenia, skomplikowany kształt wewnętrzny, wymagana szczelność i dokładność wykonania stwarzają projektantom i wykonawcy poważno trudności doboru najodpowiedniejszej konstrukcji i technologii. Rozwiązaniom tych trudności nie sprzyja brak fachowej literatury w tym zakresie. Rozwój krajowej hydroenergetyki wymaga rozpowszechniania dotychczasowych doświadczeń i prowadzenia systematycznych prac badawczych. Praktyka wskazuje na celowość i możliwość przenoszenia szeregu sprawdzonych w górnictwie technologii do realizacji skomplikowanych podziemnych obiektów hydrotechnicznych (kotwie, beton natryskowy itp.).

## LITERATURA

- [1] Czugałow R.R.: Gidrotechničeskie sooruzenja. "Wysszaja szkoła", Moskwa 1978.
- [2] Dziedzic T., Rułka K., Wojtusiak A.: Problemy projektowania obudowy podziemnych wyrobisk hydrotechnicznych. Materiały pomocnicze VI Szkoły Mechaniki Górotworu. AGH, Kraków 1978.
- [3] Fiszman I.A.: Optimizacija izyskanij na osnovie analiza projektnych rieszenij. Gidrotechničeskoje stroitelstwo nr 2/1982.
- [4] Kastner H.: Statik des Tunnel- und Stollenbaues. Springer-Verlag, Berlin 1971.
- [5] Kujundzić B. i in.: Sadejstvo stenske mase, betona i lima u tunelima i oknima pod pritiskom. "Jaroslav Černi", Beograd 1980.
- [6] Rułka K., Mazur J., Wojtusiak A., Wypchol N.: Problemes de la mecanique des roches dans le domaine de la construction hydrotechnique souterraine. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej nr 28/1978.
- [7] Seeber G.: Auswertung von statischen Felsdehnungsmessungen. Geologie und Bauwesen 26, H. 3, 1961.
- [8] Seeber G.: Neue Entwicklungen für Druckstollen und Druckschachte. O/Z H.5. 1975.
- [9] Świąt E., Stróżyk E.: Wyrobiska podziemnej elektrowni wodnej Porąbka-Żar. "Projekty-Problemy", nr 2/1975.
- [10] Świąt E.: Działanie krótkotrwałego obciążenia przerywanego na stalowe opancerzenie sztolni ciśnieniowych elektrowni pompowych. XXI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1975.

- [11] Thiel K., Zaburski L.: Współpraca masywu skalnego z panczerem stalowym w sztolniach ciśnieniowych. PAN-IBW. Rozprawy Hydrotechniczne, z. 37, Gdańsk 1977.
- [12] Thiel K.: Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa 1980.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz PONGÓRSKI

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1983 r.

#### КРЕПЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ВЫРАБОТОК

##### Резюме

В работе представлены специфические условия работы штолни под давлением и необходимость пространственного анализа конструкции крепления их разветвлений. Оговорено влияние условий строительных работ на этапность постройки крепления. В качестве примера описано конструктивное решение и технологии выполнения разветвления.

#### JOINT SUPPORTS OF HYDRAULIC HEADINGS

##### Summary

The paper deals with the specific working conditions in pressure drifts as well as with the necessity of carrying out a spacial analysis of the structure of supports and their ramifications. The influence of the conditions in which the construction of the lining is being realised upon the stages of its construction has been discussed and an exemplifying solution of the structure and the technology of the construction of a branching has been provided.