

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

GÓRNICTWO

**Z. 76
GLIWICE
1977**

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	3
2. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA UŻYWANE W PRACY	5
3. ZAGADNIENIE WPLYWU CZYNNIKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ DEFORMACJI SKAŁ W OTOCZENIU WYROBISK KORYTARZOWYCH	6
4. ANALIZA DOTYCHCZASOWYCH HIPOTEZ I METOD OKREŚLANIA CHARAKTERU I WIELKOŚCI OBCIĄŻEŃ OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH	14
5. CEL, ZAKRES PRACY I ZAŁOŻENIA	22
6. PROGRAM BADAŃ	24
7. METODA REALIZACJI BADAŃ	25
7.1. Badania i obserwacje laboratoryjne	25
7.1.1. Opis stanowiska badawczego	25
7.1.2. Kryteria podobieństwa modelowego i dobór materiału ekwiwalentnego do badań	27
7.1.3. Metodyka i sposób prowadzenia badań laboratoryjnych	33
7.1.4. Przebieg i wyniki badań laboratoryjnych	36
7.1.4.1. Wrobiska prostokątne	37
7.1.4.2. Wrobiska o kształcie dostosowanym do obudowy murowej	42
7.1.4.3. Wrobiska dostosowane do obudowy łukowej	46
7.1.4.4. Wrobiska kołowe	50
7.1.4.5. Wrobiska eliptyczne	54
8. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH W ASPEKTCIE WPLYWU CZYNNIKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH NA PRZEJAWY I WIELKOŚĆ STATYCZNEGO ODZIAŁYWANIA SKAŁ W OTOCZENIU WYROBISK KORYTARZOWYCH	60
9. PORÓWNANIE WIELKOŚCI STATYCZNEGO OBCIĄŻENIA OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH WEDŁUG WZORÓW PROJEKTOWYCH ORAZ WYNIKÓW PRACY	89
10. ZAKRES PRAKTYCZNEGO WYKORZYSTANIA WYNIKÓW PRACY	94
11. WNIOSKI KOŃCOWE	95
LITERATURA	97

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 494

MIROSŁAW CHUDEK, STANISŁAW CHWAŁA

GÓRNICTWO

ZESZYT SIEDEMDZIESIĄTY SZÓSTY

ZAGADNIENIE PROGNOZOWANIA OBCIĄŻEŃ
STATYCZNYCH NA OBUDOWĘ WYROBISK
KORYTARZOWYCH I KOMOROWYCH

Opiniodawca:

Prof. dr inż. Włodzimierz Sikora

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Miroslaw Chudek

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł 200+100 Ark. wyd. 7,10 Ark. druk. 6,75 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 80 g
Oddano do druku 8 09 1976 Podpis. do druku 2 02.1977 Druk ukończ w marcu 1977
Zamówienie 1044 76 N-25 Cena zł 18,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień budownictwa podziemnego jest zagadnienie bezpiecznego utrzymania wyrobisk górniczych, szczególnie tych, które decydują w zasadniczy sposób o zdolności eksploatacyjnej Zakładu Górniczego. Wyrobiska te w umownym pojęciu określa się mianem wyrobisk kapitalnych i zalicza do nich takie wyrobiska, jak: szyby, komory, przecznice czy przekopy. Czasokres istnienia tych wyrobisk wynosi zwykle od 25 do 50 i więcej lat, w związku z czym niezwykle istotnym staje się konieczność precyzyjnego doboru obudowy tych wyrobisk pod względem konstrukcyjno-wytrzymałościowym.

W dotychczasowej praktyce górniczej stosuje się szereg metod obliczeniowych opartych o rozważania analityczne, czy badania eksperymentalne pozwalające na prognozowanie wielkości i sposobu obciążenia obudowy przez górotwór przy założeniu różnych sposobów ich wzajemnego oddziaływania określonym mianem współpracy obudowy z górotworem.

Z uwagi na fakt, że o charakterze współpracy obudowy z górotworem decydują w głównej mierze warunki naturalno-geologiczne określane poprzez szereg czynników takich jak:

- wytrzymałość skał,
- wytrzymałość masywu górotworu,
- głębokość położenia wyrobiska,
- orientacja wyrobiska względem płaszczyzn osłabionej spójności itp. oraz czynniki techniczno-technologiczne, jak:
 - wielkość i kształt przekroju wyrobiska,
 - rodzaj i konstrukcja obudowy,

wszystkie z istniejących hipotez dopuszczają w swych założeniach uproszczenia i mogą być stosowane w konkretnych określonych przypadkach. Celem zatem wydaje się prowadzenie dalszych prac badawczych w oparciu o które można w sposób bardziej dokładny uogólnić pewne prawidłowości procesu współdziałania obudowy z górotworem i uzyskania pełnego obrazu jego jakościowo-ilościowego przebiegu.

Przedmiot niniejszej pracy stanowią eksperymentalne badania zjawisk deformacji skał w otoczeniu wyrobisk górniczych korytarzowych oparte na stosowanej metodzie odwzorowań modelowych wykonywanych z materiałów ekwiwalentnych.

Całość prac zrealizowano w laboratoriach Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, w którym proble-

my ustalania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem stanowią jeden z głównych kierunków działalności naukowo-badawczej.

WYKONANIE PRAC

W ramach zadania realizowanego w ramach projektu badawczego, w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem, wykonano następujące prace:

- wykonanie badań laboratoryjnych i terenowych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań numerycznych i analitycznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań technologicznych i technicznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań ekonomicznych i społecznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;

W ramach realizacji zadania, w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem, wykonano następujące prace:

- wykonanie badań laboratoryjnych i terenowych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań numerycznych i analitycznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań technologicznych i technicznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań ekonomicznych i społecznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;

W ramach realizacji zadania, w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem, wykonano następujące prace:

- wykonanie badań laboratoryjnych i terenowych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań numerycznych i analitycznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań technologicznych i technicznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;
- wykonanie badań ekonomicznych i społecznych w celu wypracowania optymalnych parametrów współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych z górotworem;

2. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA UŻYWANE W PRACY

Do określenia wielkości występujących we wzorach podanych w pracy zastosowano oznaczenia:

- φ - kąt tarcia wewnętrznego,
- γ - ciężar objętościowy,
- ρ - przestrzenna gęstość masy,
- σ_o - naprężenia ściskające,
- σ_g - naprężenia zginające,
- R_o - wytrzymałość na ściskanie,
- R_z - wytrzymałość na zginanie,
- R_r - wytrzymałość na rozciąganie,
- E - moduł sprężystości podłużnej,
- ν - współczynnik Poissona,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- P_z - ciśnienie pierwotne w górotworze nienaruszonym,
- σ_z - pionowe naprężenie w skałach.

3. ZAGADNIENIE WPŁYwu CZYNNIKÓw GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ DEFORMACJI SKAŁ W OTOCZENIU WYROBISK KORYTARZOWYCH

Potrzeby praktyki górniczej związane z techniczną stroną zabezpieczenia zdolności eksploatacyjnej wyrobisk górniczych o znaczeniu podstawowym, wymagają żeby już w trakcie projektowania wyrobisk można było określić stopień zagrożenia ich użyteczności oraz określić rodzaj i typ konstrukcji obudowy. Problemy te wiążą się bezpośrednio z tzw. warunkami geotechnicznymi a te z kolei uzależnione są od własności wytrzymałościowych skał oraz od czynników wpływających na stopień zmian stanu i wielkości naprężeń w górotworze. Z tego punktu widzenia w dotychczasowej literaturze fachowej rozpatruje się dwa problemy [3], [4], [36], a mianowicie:

- problem technologicznej stateczności wyrobisk,
- problem głębokości krytycznej.

Zagadnienie pierwsze definiowane jako zdolność do pozostawiania wyrobiska w stanie przydatności eksploatacyjnej w określonym czasie rozpatrywane było do tej pory w dwóch aspektach, a to własności wytrzymałościowych skał w miejscu lokalizacji wyrobiska oraz typu wyrobiska i sposobu pracy stosowanej w nim obudowy.

Zagadnienie drugie natomiast związane jest tylko i wyłącznie z własnościami wytrzymałościowymi skał oraz kształtem wyrobiska wpływającym w sposób bezpośredni na rozkład naprężeń w jego otoczeniu, a tym samym na możliwość wystąpienia granicznego stanu naprężeń w górotworze. Jak wykazały badania dołowe wykonane w Zagłębiu Donieckim [50], [51], z inżynierskiego praktycznego punktu widzenia niezwykle przydatnym sposobem określenia stateczności wyrobiska może być ustalenie relacji pomiędzy ciśnieniem pionowym w górotworze a wytrzymałością na ściskanie skał otaczających dane wyrobisko.

Zależność tę formułuje się w postaci:

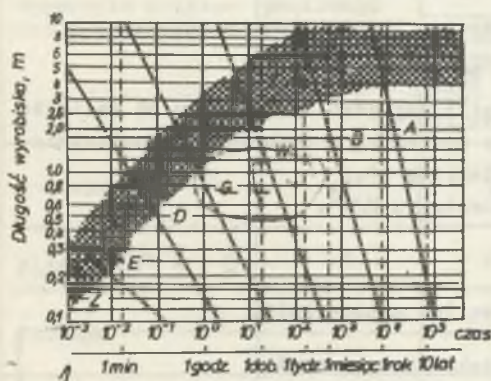
$$\beta = \frac{\eta \cdot H}{R_c}, \quad (1)$$

gdzie:

- β - tzw. współczynniki technologicznej stateczności wyrobiska (wielkość bezwymiarowa),
- η - ciężar objętościowy górotworu obliczany $\eta = \rho \cdot g$,

(ρ - gęstość przestrzenna [t/m^3]; g - przyspieszenie ziemskie),
 R_0 - wytrzymałość skały na ściskanie [N/m^2].

Jeżeli współczynnik $\beta < 0,25$ w górotworze przy poziomym zaleganiu warstw i $\beta < 0,3$ przy stromym zaleganiu uznać należy wyrobisko za stateczne, odkształcenia górotworu nie będą przekraczać granicy odkształceń sprężystych a przemieszczenia konturu nie będą większe jak 50-80 mm. W przypadku kiedy współczynnik β wynosił będzie odpowiednio $0,25 \div 0,4$ lub $0,3 \div 0,45$ górotwór charakteryzuje się średnim stopniem stateczności a przemieszczenia konturu wyrobiska sięgać będą około 200 mm. Jeśli przemieszczenie konturu wyrobiska przekraczać będzie wielkość 200 mm przy współczynniku β osiągającym rząd wielkości analogicznie $0,4 \div 0,65$ lub $0,45 \div 0,65$ górotwór należy uznać za niestacyjny. Odpowiednio do obli-



Rys. 1. Diagram do określania klasy skał wg stateczności nieobudowanej części wyrobiska o szerokości 15 - 20 m

nego stopnia subiektywnej oceny i nie mogą być traktowane jako uniwersalne. Nie uwzględniają one bowiem szeregu pozostałych czynników decydujących przede wszystkim o wytrzymałości skał takich, jak: sposób orientacji wyrobiska względem płaszczyzn osłabionej spójności, wytrzymałości górotworu "in situ" i co za tym idzie korelacji między wytrzymałością na ściskanie określoną w laboratorium, a rzeczywistą wytrzymałością górotworu.

Drugi problem - problem ustalenia głębokości krytycznej w pewnym stopniu eliminuje wymienione nieścisłości opiera się on bowiem na założeniu porównania ciśnienia pionowego w górotworze z wytrzymałością skał, uwzględniając również charakter zmian wielkości naprężeń w górotworze, determinowany kształtem wyrobiska. Z najczęściej stosowanych, w takich przypadkach metod obliczeniowych, można przytoczyć wzór wyprowadzony z warunku

obliczanej prognostycznej wielkości współczynnika stateczności należy stosować obudowę o takich parametrach konstrukcyjno-wytrzymałościowych, które zapewniałyby korzystną, wymaganą w tych warunkach charakterystykę jej pracy.

Inną klasyfikację stateczności górotworu określaną w oparciu o stopień zruszenia skał po wykonaniu wyrobiska, jest klasyfikacja podana w pracy [8].

Ten sposób klasyfikacji podano na rys. 1 oraz opisano w tabelicy 1. Przytoczone obydwie sposoby określania stateczności górotworu oczywiście nie są pozbawione pew-

stanu granicznego któregośkolwiek z elementów wyrobiska (strop, spąg, ocio-
sy) [34], [45], [38] w postaci:

$$H_{kr} = \frac{k_o R_o}{k_k \cdot \gamma} \quad (2)$$

gdzie:

- k_o - współczynniki zmniejszenia wytrzymałości skały w masywie górotworu, w stosunku do wytrzymałości próbki tzw. współczynnik strukturalnego osłabienia, który przyjmuje się [38]
- $k_o = 1,0$ - dla skał niezruszonych,
- $k_o = 0,7$ - dla skał mało zruszonych,
- $k_o = 0,3$ - dla skał średnio zruszonych,
- $k_o \leq 0,3$ - dla skał silnie zruszonych,
- R_o - wytrzymałość skały na ściskanie, N/m^2 ,
- k_k - współczynnik koncentracji naprężeń uzależniony od kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska w warunkach hydrostatycznego stanu naprężeń (tablica 2),
- γ - ciężar objętościowy górotworu N/m^3 .

Tablica 1

Klasyfikacja skał wg ich stateczności

Klasa skały	Charakterystyka skał
A	Skały zwarte nie obciążające obudowy
B	Skały mocne, o małej ilości szczelin, łatwo wietrzejące, możliwe obwały.
W	Skały średniej zwężności o małej ilości szczelin, łatwo wietrzejące, możliwe obwały.
G	Skały średniej zwężności, szczelinowate, obciążające obudowę w małym stopniu.
D	Skały średniej zwężności szczelinowate, Oddziałujące w wyraźny sposób na obudowę wyrobiska, szczególnie w kierunku pionowym.
E	Skały średniej zwężności i słabe, o silnie rozwiniętej szczelinowatości, oddziałujące wszechstronnie na obudowę.
Z	Skały słabe lub skruszone wywierające bardzo duże obciążenie na obudowę.

Inną zależnością opartą o kryterium efektywnego naprężenia rozciągającego [43], [47], [48], jest zależność:

$$H_{kr} = \frac{k_o \times R_o}{\gamma(1+2A)} \quad (3)$$

gdzie:

A - współczynnik poziomego rozpięcia skał obliczamy ze wzoru:

$$A = \frac{v}{1-v} ,$$

przy czym v - oznacza współczynnik Poissona.

Tablica 2

Współczynniki koncentracji naprężeń
w zależności od kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska

Wyrobisko o przekroju poprzecznym	Współczynnik poziomego rozpięcia skał A	Współczynnik koncentracji naprężeń k_k		Miejsce zruszenia na konturze wyrobiska
		Wg badań eksperymentalnych Nasonowa (52) (wartości średnie)	Wg wzorów analitycznych (59)	
kołowym	1	+ 1,63 ^{x)}	+ 2,0	w połowie wysokości wyrobiska
eliptycznym $\frac{a}{b} = \frac{3}{2}$	1	+ 2,26	+ 3,0	w stropie wyrobiska
łukowym	1	+ 1,91	-	w połowie wysokości wyrobiska
sklepionym	1	+ 1,71	-	w połowie wysokości wyrobiska
prostokątnym $\frac{1}{w} = \frac{3}{2}$	1	-	+ 1,0 ^{xx)}	w połowie wysokości wyrobiska
trapezowym	1	+ 2,59	-	na linii węzłowa sklepienia

x) - (+) oznacza ściskanie,

xx) - pomija się tu znaczną koncentrację naprężeń w obszarach narożnych wyrobiska.

Wzór ten [36] zaleca się stosować w przypadku wyrobisk górniczych pionowych i poziomych o przekroju kołowym, zlokalizowanych w skałach związanych kruchych.

Występujące w profilu litologicznym górotworu skały plastyczne stanowiły podstawę opracowania zależności określającej głębokość krytyczną w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa-Hencky'ego [18].

Zależność tę formułuje się:

$$H_{kr} = \frac{\sigma_{pl}}{(1-A)^2 + 3A^2}, \quad (4)$$

gdzie:

σ_{pl} - granica plastyczności skały, N/m^2 .

A - współczynniki rozpięcia poziomego skał plastycznych przyjmowany często jak równy 1.

Podobnie jak poprzednio zależność ta została wyprowadzona przy założeniu, że wykonane wyrobisko posiada przekrój poprzeczny o kształcie kołowym.

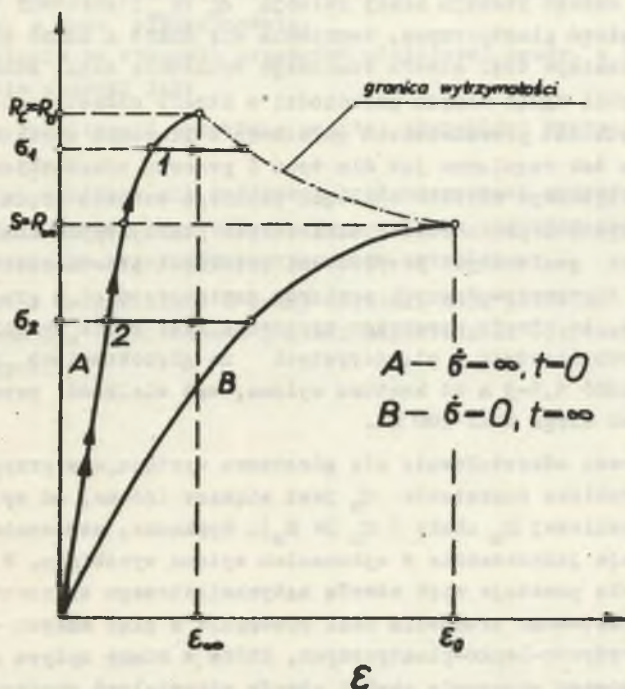
Przedstawione metody określania bądź to stateczności wyrobisk kapitalnych bądź to krytycznej głębokości ich lokalizacji nie wyczerpują oczywiście całości zagadnienia. Problemy te w powiązaniu z hipotezami dotyczącymi sposobu współpracy obudowy wyrobisk z górotworem są i będą przedmiotem prac badawczych a przyczyną tego stanu rzeczy jest zbyt duża ilość czynników decydujących o charakterze deformacji górotworu i jego oddziaływaniu w konkretnych warunkach górniczo-technicznych. Podstawowym w tej mierze zagadnieniem jest m.in. ustalenie wzajemnej relacji wielkości odkształceń skały nie tylko w zależności od wielkości działających obciążeń lecz także czasu działania wpływającym jak to wykazano poniżej na wytrzymałość skał. Analiza deformacji próbek skalnych w zależności od wielkości i czasu działania obciążenia wykazała, że w konkretnych przypadkach mogą wystąpić trzy rodzaje wzajemnych korelacji pomiędzy tymi wielkościami [39] (rys. 2).

Przypadek pierwszy na rys. 2 obrazuje wzajemną zależność odkształceń i naprężeń kiedy prędkość przyrostu obciążenia osiąga teoretycznie wielkość nieskończoną $\sigma = \infty$, a próbka osiąga wytrzymałość doraźną oznaczoną R_0 lub R_0' .

Drugi ekstremalny przypadek - to badania polegające na zwiększeniu naprężeń z prędkością teoretycznie dążącą do zera - w tym przypadku badana próbka skalna osiąga wytrzymałość graniczną nazywaną także wytrzymałością statyczną. Wytrzymałość graniczna dla skał określona jest często jako granica sprężystości skał przy ścisłaniu.

Analizując wyniki badań wytrzymałościowych skał karbońskich w warunkach różnych przedziałów czasu działania obciążenia wpływającego na wielkość wytrzymałości doraźnej i czasowej stwierdzić można, że deformacje skał odpowiadają deformacjom ciał sprężystych, sprężysto-lepkim, sprężysto-plastyczno-lepkim, czy deformacjom trwałym polegającym na naruszeniu ciągłości górotworu. Biorąc pod uwagę wyniki obserwacji dołowych oraz rezultaty pracy [17, 49] można stwierdzić, że w zależności od relacji pomiędzy wartością naprężeń σ_0 w górotworze na konturze wyrobiska a wy-

trzymałością skał R_{∞} (R_0) można wyróżnić trzy typy procesu odkształcania się górotworu wokół wyrobiska.



Rys. 2. Wpływ wartości naprężeń na osiągnięcie przez próbkę skały granicy wytrzymałości przy pełnieniu

I typ procesu odkształcania się górotworu zachodzi, gdy $\sigma_0 < R_{\infty}$ wówczas w masywie górotworu wokół wyrobiska powstaje strefa odkształceń sprężysto-lepkich. Proces odkształcania się skał przebiega bez naruszenia ich ciągłości i stopniowo w miarę upływu czasu zanika (stabilizuje się) w czasie i w przestrzeni. Natomiast prędkość przemieszczania się skał w kierunku wyrobiska zmierza płynnie do zera.

Jak wynika z pomiarów prowadzonych w wyrobiskach kopalń Zagłębia Donieckiego końcowe wartości przemieszczeń skał typu piaskowców, łupków i lastych i łupków piaszczystych nie przekraczają kilku centymetrów [49].

Wytrzymałość skał dla przypadku, gdy $\sigma_0 < R_{\infty}$ jest wystarczająca dla przeniesienia koncentracji naprężeń wokół wyrobiska. Wyrobisko zachowuje swoją stateczność, bez konieczności stosowania obudowy poza ewentualnie np. lekką obudową osłaniającą, chroniącą przed przypadkowymi obrywami skał [49].

II typ procesu odkształcania się górotworu zachodzi w przypadku, gdy $R < \sigma_0 < R_0$.

W masywie skalnym w sąsiedztwie wyrobiska wytwarza się strefa odkształceń sprężysto-lepko-plastycznych, w której dla dowolnej chwili czasowe $t > 0$ określonej dla danego rodzaju skały relacją $\sigma_0(R_\infty)$ górotwór w miarę rozwoju odkształceń plastycznych, tworzenia się mikro i makro spękań, ulega spękaniu, powstaje tzw. strefa czasowego zruszenia skał, która w miarę wzrostu odległości w głąb masywu przechodzi w strefę odkształceń sprężysto-lepkich. Prędkości przemieszczeń górotworu w kierunku wyrobiska nie są w tym przypadku tak regularne jak dla typu I procesu odkształcenia się górotworu. Po początkowym okresie stałego, płynnego wzrostu prędkości przemieszczeń sprężysto-lepkich rozwój odkształceń plastycznych charakteryzuje się lokalnymi gwałtownymi przyrostami prędkości przemieszczeń. Na podstawie wyników z przeprowadzonych pomiarów zamieszczonych w pracach [17], [49] stwierdzono, że strefa czasowego zruszenia skał wokół wyrobisk prowadzonych w łupkach ilastych i piaszczystych na głębokościach 400-1000 m sięga na głębokość 1,5-3 m od konturu wyłomu, zaś wielkość przemieszczeń konturu wyrobisk sięga max. 200 mm.

III typ procesu odkształcenia się górotworu występuje w przypadku, gdy na konturze wyrobiska naprężenie σ_0 jest większe (równe) od wytrzymałości doraźnej, chwilowej R_0 skały ($\sigma_0 \geq R_0$). Spękanie, zruszenie calizny skalnej następuje jednocześnie z wykonaniem wyłomu wyrobiska. W otoczeniu konturu wyrobiska powstaje więc strefa natychmiastowego zruszenia skał. Za strefę natychmiastowego zruszenia skał postępuje w głąb masywu - strefa odkształceń sprężysto-lepko-plastycznych, która w miarę upływu czasu tworzy strefę czasowego zruszenia skał i strefę odkształceń sprężysto-lepkich. Wartość przemieszczeń konturu wyrobiska przekracza zwykle 200 mm [69]. Przedstawione, charakterystyczne dla tego typu procesu odkształcenia się górotworu zjawiska zachodzące w górotworze wokół korytarzowych wyrobisk górniczych występują na dużych głębokościach, gdzie $H \geq H_{kr}$.

Charakter procesu odkształcenia się górotworu stanowi o mechanizmie współdziałania obudowy wyrobisk z górotworem. W zależności od typu odkształcenia się górotworu zmieniają się również wymagania odnośnie charakteru pracy obudowy. W przypadku I typu procesu odkształcenia się górotworu wpływ obudowy na wielkość i charakter sprężysto-lepkich odkształceń współdziałającego z nią masywu jest niewielki [1], [51], [39]. Bardzo istotną natomiast rolę odgrywa obudowa w przypadku II i III typów procesu odkształcenia się górotworu, gdy wokół wyrobiska powstaje strefa skał zruszonych, spękanych.

Oceniając zagadnienie wpływu czynników geologiczno-górnich z punktu widzenia możliwości bezpiecznego utrzymania wyrobisk korytarzowych, stwierdzić można, że dotychczasowe istniejące metody w sposób niezbyt precyzyjny uwzględniają wszystkie czynniki i mogą stanowić podstawę jedynie hipotez prognostycznych.

Słusznym wydaje się zatem prowadzenie dalszych prac badawczych w tym zakresie podających w sposób nie tylko jakościowy, ale także ilościowy odpowiednie związki pomiędzy miejscem lokalizacji wyrobisk w danym rejonie górotworu, a jego statecznością.

Zagadnienia te stanowią przedmiot niniejszej pracy, w której uwzględniono takie warunki jak:

- warunek lokalizacji wyrobiska poniżej głębokości krytycznej dla danego rodzaju skały,
- minimalną wielkość sił spójności w płaszczyznach uwarstwienia,
- nachylenia warstw oraz orientację wyrobiska względem nachylenia,
- wpływ kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska.

Wszystkie uwzględnione w pracy czynniki mają pozwolić na praktyczną przydatność jej rezultatów w postaci odpowiednich wytycznych i kryteriów projektowych.

4. ANALIZA DOTYCHCZASOWYCH HIPOTEZ I METOD OKREŚLANIA CHARAKTERU I WIELKOŚCI OBCIĄŻEŃ OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH

Przedstawione w rozdziale 3 niniejszej pracy kryteria określania stateczności górotworu i wyrobisk oparte są na założeniu o istnieniu określonego stanu równowagi pomiędzy wielkością naprężeń występujących w górotworze, a wytrzymałością skał na ściskanie. Z górniczego punktu widzenia za wyrobiska stateczne uznać należy te wyrobiska, w których zastosowany odpowiedni rodzaj obudowy zapewnia ich przydatność eksploatacyjną w określonym przedziale czasu. Z tego też względu za niezwykle istotny z praktycznego punktu widzenia należy uznać fakt dokładnej prognostycznej oceny wielkości i charakteru obciążeń obudowy rzutuujący na jej parametry techniczno-wytrzymałościowe.

Wielkość obciążenia górotworu na obudowę wyrobiska zależy jak to wykazano w szeregu pracach [19], [33], [36], [43] od wielu czynników, z których do najważniejszych zaliczyć należy:

- fizykomechaniczne własności skał,
- głębokość lokalizacji wyrobiska,
- orientacja wyrobiska względem kąta upadu warstw, uwarstwienie, szczelinowatość,
- kształt i wielkość przekroju wyrobiska,
- konstrukcja i charakterystyka pracy obudowy.

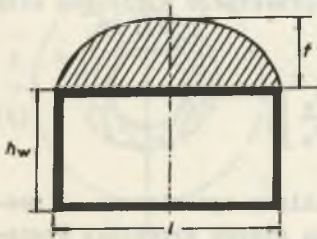
Ilość tych czynników, ich odmienny ilościowo i jakościowo wpływ na wielkość obciążenia obudowy są powodem, że jeszcze do chwili obecnej nie ma uniwersalnego sposobu określania wielkości obciążenia, a istniejące metody i hipotezy nie znajdują wszechstronnego zastosowania.

Analizując dotychczasowe hipotezy dotyczące wielkości obciążenia obudowy wyrobisk korytarzowych pod względem przyjętych w nich założeń można podzielić je na dwie zasadnicze grupy:

- hipotezy tzw. "siłowe" oparte o zasady statyki budowli,
- hipotezy oparte o zasady mechaniki środków ciągłych.

Z pierwszej grupy hipotez nie znalazły dostatecznego uzasadnienia hipotezy uzależniające wielkość obciążenia od głębokości położenia wyrobiska, między innymi takie, jak: Bierbaumera, Eszto, Slesariewa. Hipotezy te, a szczególnie hipotezy Bierbaumera czy Eszto są jednak w chwili obecnej stosowane w przypadkach wyrobisk tunelowych lokalizowanych na głębokościach rzędu 15÷30 m.

Rozwój nauki górniczej, a szczególnie badań dołowych, których wyniki nie potwierdziły wyników obliczeń uzyskiwanych przy pomocy wymienionych hipotez były podstawą formułowania nowych hipotez. Z tej grupy hipotez opartych o zasady statyki budowli należą hipotezy M.M. Protodiakonowa, P. M. Cymbarjewicza, czy A. Sałustowicza [5], [16], [43].



Rys. 3. Obciążenie obudowy wg M. Protodiakonowa

Hipoteza M. Protodiakonowa obejmuje założenia o istnieniu nad stropem wyrobiska korytarzowej strefy skał odprężonych w kształcie sklepienia ciśnię. Według tej hipotezy ciężar nadkładu rozkłada się na ociosy wyrobiska, które ze względu na posiadaną sztywność nie ulegają wyraźnym odkształceniom, natomiast na obudowę działa ciężar skały odprężonej znajdującej się w obszarze sklepienia mającego kształt wycinka paraboli (rys. 3).

Wg M. Protodiakonowa, wysokość tego wycinka w odniesieniu do skał zwięzłych wynosi:

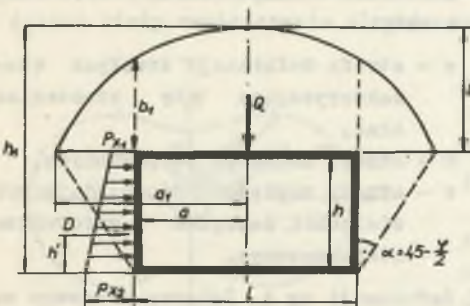
$$f = \frac{l}{2\mu} \quad (5)$$

Przybliżona zaś wielkość jego powierzchni:

$$A = \frac{2}{3} l \cdot f,$$

gdzie:

- l - szerokość wyrobiska,
- μ - wskaźnika zwięzłości skał wg Protodiakonowa,
- f - wysokość strefy odprężonej.



Rys. 4. Obciążenie obudowy wg P. M. Cymbarjewicza

Hipoteza P.M. Cymbarjewicza - stanowi rozszerzenie hipotezy Protodiakonowa i czyni dalsze założenia, operując się jednak na podstawach hipotezy Protodiakonowa co do samego kształtu sklepienia skał odprężonych. Według P.M. Cymbarjewicza przyjmuje się, że rozpiętość strefy odprężonej powstałej w warstwie stropowej wyrobiska poszerzają powstałe wzdłuż jego ociosów kliny odłamu (rys. 4).

Hipoteza ta zakłada, że w przypadku przekroczenia wytrzymałości skał na ściskanie wytwarza się w otoczeniu wyrobiska obszar skał spękanych. Skały położone w tym obszarze obciążają obudowę dając obciążenie czynne zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym.

Hipoteza A. Sałustowicza opracowana w oparciu o teorię sklepienia ciśnien zakłada, że na obudowę wyrobiska działa ciężar spękanych skał zawartych we wnętrzu tego sklepienia. Wielkość strefy odprężonej wyznacza A. Sałustowicz opisując na obrysie przekroju poprzecznego wyrobiska elipsę (rys. 5) o stosunku półosi:

$$n = \frac{a}{b} = \frac{1}{2} \left[m - 2 + (m - 1) \frac{R_x}{p_z} \right]. \quad (7)$$

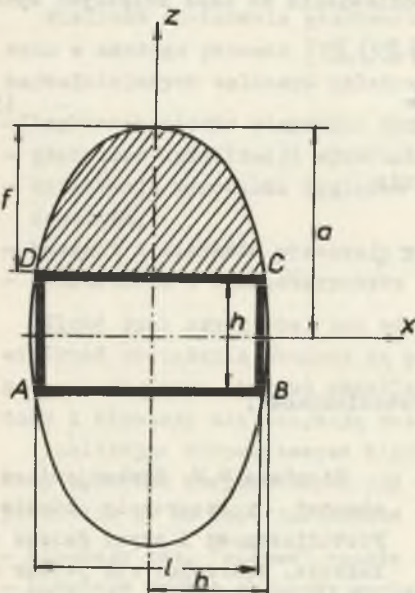
Pole powierzchni wchodzące w zakres wycinka elipsy ograniczone z jednej strony jej obrysem, z drugiej zaś płaszczyzną stropu wyrobiska stanowi strefę odprężoną. Wysokość tej strefy uzależnia A. Sałustowicz od wielkości ciśnienia poziomego w górotworze p_x oraz od wytrzymałości skały na rozciąganie R_x . Im większe jest ciśnienie poziome p_x w stosunku do pionowego p_z , tym mniejsza jest wysokość strefy odprężonej oraz im

mniejsza jest wytrzymałość skały na rozciąganie, tym większa jest wysokość strefy odprężonej.

Do grupy hipotez opartych o zasady mechaniki ośrodków ciągłych należą hipotezy A. Labassa, A. Sałustowicza, K.W. Ruppenejta [18], [41], [43].

Hipoteza A, Labassa oparta jest na założeniu, że wokół wyrobiska o kształcie kołowym tworzą się trzy strefy:

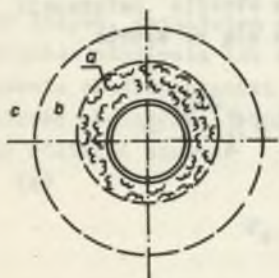
- a - strefa deformacji trwałych charakteryzująca się zruszeniem skał,
- b - strefa naprężeń zwiększonych,
- c - strefa naprężeń odpowiadających wielkości naprężeń w górotworze nienaruszonym.



Rys. 5. Obciążenie obudowy wg A. Sałustowicza

Schematyczne rozmieszczenie stref deformacji wg A. Labassa pokazano na rys. 6.

Na skutek zniszczenia struktury skał w pierwszej strefie i zwiększenia jej objętości skały będą przemieszczać się do wyrobiska. Wielkość obciążenia obudowy będzie wg autora hipotezy wynikiem ciężaru skał ulegających odspojeniu. Granica strefy zruszenia i strefy zwiększonych naprężeń posiada kształt owalny, asymetryczny względem osi wyrobiska. Asymetria spowodowana jest siłą ciężaru skał w stropie wyrobiska. Wielkość pionowego obciążenia obudowy wyrobiska o kształcie kołowym określa się ze wzoru:



Rys. 6. Strefy deformacji górotworu w otoczeniu wyrobiska wg A. Labassa

$$P = (1 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot H \left(\frac{a}{b}\right) \quad (8)$$

gdzie:

- φ - kąt tarcia wewnętrzznego,
- H - głębokość założenia wyrobiska m ,
- a - promień wyrobiska m ,
- b - promień strefy deformacji niesprężystych m ,

$$b = a \sqrt{\frac{\pi a^2 (K-1)}{\Delta S + \pi a^2 (K-1)}}$$

K - współczynnik zwiększenia objętości skał (1,1 ÷ 1,15),

ΔS - dopuszczalna wielkość przemieszczenia konturu wyrobiska (podatność obudowy).

Jak wynika ze wzoru (8) wielkość obciążenia obudowy wyrobiska wg A. Labassa zależy w głównej mierze od kąta tarcia wewnętrzznego skał oraz od stosunku $\left(\frac{a}{b}\right)$. Maksymalną wielkość obciążenia obudowy wg wzoru (8) uzyskuje się przy założeniu obudowy sztywnej przy $\Delta S = 0$. Oczywistym jest, że zmniejszenie wielkości obciążenia może nastąpić w przypadku obudowy podatnej kiedy zmniejszeniu ulegnie promień strefy deformacji trwałych.



Rys. 7. Strefa deformacji niesprężystych wg K.W. Ruppenejta

Hipoteza K.W. Ruppenejta - oparta jest na założeniu, że wokół wyrobiska o kształcie kołowym tworzy się strefa deformacji niesprężystych w kształcie jak na rys. 7.

Za tą strefą znajduje się strefa deformacji sprężystych. W miarę zaś wzrostu odległości od osi wyrobiska stan i wielkość naprężeń odpowiada górotworowi nienaruszonemu.

Opierając się na równaniu konturu strefy deformacji niesprężystych uzależnionych od wielkości kąta tarcia wewnętrznego, kohezji, głębokości lokalizacji wyrobiska oraz współczynnika rozpięcia bocznego. K.W. Ruppenejt proponuje obliczać obciążenie obudowy w zależności od warunków pracy układu "obudowa-górotwór".

- 1) Przy równoczesnej pracy obudowy podatnej i skały w strefie deformacji niesprężystych wielkość obciążenia obudowy wylicza się ze wzoru:

$$P = R_0^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1000 \alpha}{4GU_0} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \left[(1 - \sin \alpha) \cdot (\lambda_2 \eta \cdot h + K \operatorname{ctg} \varphi) \right]^{\frac{\alpha+2}{2}} - K \operatorname{ctg} \varphi, \quad (9)$$

gdzie:

R_0 - promień wyrobiska,

α - współczynnik wyznaczony ze wzoru $\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$,

G - moduł odkształcenia postaciowego,

U_0 - przemieszczenie skał na konturze wyrobiska lub podatność obudowy.

- 2) Przy stosowaniu obudowy sztywnej

$$P = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} (\beta \eta h + K \operatorname{ctg} \varphi) \exp \left[-(\lambda + \Theta) \operatorname{tg} \varphi - K \operatorname{ctg} \varphi \right], \quad (10)$$

gdzie:

β - współczynnik koncentracji naprężeń w górotworze.

- 3) W przypadku skał zruszonych bądź sypkich autor hipotezy przyjmuje założenie o powstaniu nad wyrobiskiem strefy odprężonej w kształcie paraboli i średnią wielkość ciśnienia na 1 m^2 wyrobiska zaleca obliczać ze wzoru:

$$q = \frac{1}{2} \eta R_0 \left(\frac{4}{3} r_0 - \frac{1}{2} \right), \quad (11)$$

gdzie:

r_0 - bezwymiarowy promień strefy deformacji niesprężystych.

Praktyczny zakres stosowania hipotezy K.W. Ruppenejta jest ograniczony głównie znajomością własności fizykomechanicznych skał, w tym wielkości współczynnika bocznego rozpięcia bezpośrednio w górotworze.

Hipoteza A. Sałustowicza - wyprowadzona została w oparciu o założenie, że skały stanowią ośrodek sprężysto-plastyczny. Skały o takich własnościach

ciach charakteryzują się tym, że w pierwszej fazie po wykonaniu wyrobiska następują ich deformacje sprężyste (praktycznie natychmiastowo), aż do chwili wykonania obudowy. W następnej fazie zaczynają się trwale-plastyczne przemieszczenia konturu wyłomu do wyrobiska i zruszenia skał. Proces plastycznych deformacji i zruszenia skał będzie rozprzestrzeniał się w głąb masywu, rezultatem czego będzie powstanie eliptycznej strefy plastycznego płynięcia lub zruszenia skał. W takim przypadku o wielkości obciążenia obudowy stanowi wielkość strefy deformacji plastycznych. Wielkość obciążenia obudowy na konturze wyrobiska A. Sałustowicz proponuje obliczać wzorem:

$$P_0 = P - \frac{2}{\sqrt{3}} K \left(1 - \ln \frac{U}{U_x}\right), \quad (12)$$

gdzie:

- P - wielkość ciśnienia poziomego,
- K - granica plastyczności,
- U - wielkość przemieszczeń konturu wyrobiska,
- U_x - przemieszczenie strefy sprężystej.

Dalszy rozwój badań w zakresie własności skał i górotworu szczególnie pod względem własności reologicznych umożliwią wprowadzenie nowych metod i hipotez w zakresie współpracy obudowy z górotworem traktując górotwór jako ośrodek złożony lepko-sprężysto-plastyczny czy lepko-sprężysto-anizotropowy [2], [24], [37], [43]. Wszystkie te hipotezy oparto głównie o założenia:

- górotwór jest ośrodkiem reologicznym, ciągłym, jednorodnym, izotropowym, nieściśliwym (współczynnik Poissona $\nu = 0,5$),
- w półprzestrzeni górotworu, na dużej głębokości, wykonane zostało poziome, nieskończenie długie wyrobisko korytarzowe o przekroju kołowym,
- wyrobisko posiada obudowę o kształcie pierścienia kołowego o charakterystyce liniowej tzn. reakcja obudowy jest wprost proporcjonalna do przemieszczenia radialnego punktów konturu wyłomu wyrobiska,
- na dużej głębokości panuje w górotworze nienaruszonym stan naprężenia zbliżony do hydrostatycznego ($p_x = p_y = p_z = p$),
- dla podanych wyżej warunków górotwór z poziomym wyrobiskiem korytarzowym stanowi w przekroju poprzecznym nieograniczony układ płaski z otworem kołowym,
- układ ten obciążony jest w nieskończoności wszechstronnym, równomiernym ciśnieniem p , na konturze otworu działa zaś reakcja założonej obudowy.

Założenia te pozwalają na dokonanie pewnych uproszczeń w samych rozwiązaniach analitycznych, umożliwiając tym samym praktyczne ich wykorzystanie. Bardzo interesującym rozwiązaniem dotyczącym współpracy obudowy z górotworem z punktu widzenia praktycznego zastosowania jest rozwiązanie

H. Filcka podane w pracy [19]. Podstawowym założeniem tego rozwiązania jest przyjęcie górotworu jako ośrodka izotropowego lepko-sprężystego, odpowiadającego modelowi reologicznemu Poyntinga-Thomsona. W oparciu o takie założenia opisano stan naprężeniowo-deformacyjny przy pomocy odpowiednich równań stanu naprężeń i odkształceń radialnych i obwodowych oraz przemieszczeń konturu kołowego wyrobiska w zależności od własności wytrzymałościowych górotworu, jego własności reologicznych, a także charakterystyki i rozwoju obudowy.

Taki sposób potraktowania zagadnienia współpracy obudowy z górotworem jest bardzo istotny w przypadkach intensywnej deformacji dynamicznych, kiedy moment zabudowania obudowy w wyrobisku górniczym może być podstawowym czynnikiem jej bezawaryjnej pracy.

Ponieważ przedmiotem pracy jest zagadnienie wielkości statycznego oddziaływania górotworu na obudowę, w niniejszej analizie nie ustosunkowano się szczegółowo do rozwiązań uwzględniających właśnie wpływ czynnika czasu (reologii) zdając sobie jednak sprawę, że ten sposób rozwiązania zagadnienia współpracy obudowy z górotworem posiada duże znaczenie praktyczne. Z praktycznego punktu widzenia przydatność danej hipotezy czy metody określania wielkości i sposobu obciążenia obudowy wyrobiska jest uwarunkowana jej adekwatnością do konkretnych warunków geologiczno-górnich. Inaczej mówiąc hipoteza jest słuszna jeżeli wyniki obliczeń poczynionych przy jej pomocy znajdują pokrycie z wielkościami pomierzonymi bądź zaobserwowanymi w praktyce.

Wyniki obserwacji dołowych wykonanych w kopalniach przedstawionych w pracach [29], [31], [33], [38], [40] oraz rozważania teoretyczne wykazują, że jednym z zasadniczych czynników decydujących o wielkości obciążenia obudowy w sensie obciążenia pierwotnego-dynamicznego, a również wtórnego-statycznego jest głębokość lokalizacji wyrobiska, która w odniesieniu do własności wytrzymałościowych skał decyduje o wielkości obciążeń obudowy. Z tych też względów trudno jest w chwili obecnej w pełni aprobować hipotezy oparte o zasady mechaniki budowli, w których wielkość obciążenia (tylko statycznego) spowodowana jest ciężarem skał zawartych w strefie opisanej krzywą naturalnego sklepienia w kształcie paraboli czyli elipsy.

Zatem hipotezy takie jak m.in. Protodiakonowa, Cymbarjewicza, posiadają ograniczony zakres stosowania, przy czym zakres ten determinowany jest głębokością lokalizacji wyrobiska.

Powołując się na pracę [33] można stwierdzić, że stosowane jeszcze w praktyce obliczeniowej hipotezy Protodiakonowa czy Cymbarjewicza mogą być wykorzystywane w zakresie głębokości nie większych jak 400, 500 m w skałach związanych o współczynniku związłości rzędu $f = 4+5$. W przypadku większych głębokości nawet w skałach związanych należy spodziewać się znacznych ich deformacji i to deformacji polegających na trwałym zruszeniu masywu skalnego w otoczeniu wyrobiska. Przypadek taki wystąpi wtedy, kiedy

głębokość lokalizacji wyrobiska osiągnie lub przekroczy głębokość krytyczną $H \geq H_{kr}$ dla określonego rodzaju górotworu.

W tym zakresie słusznymi wydają się być hipotezy A. Labassa, K.W. Rupenejta czy A. Sałustowicza. Hipotezy te określają zasięg strefy deformacji niesprężystych przyjmując oczywiście odmienny ich kształt. Jeżeli nie uwzględnimy procesu deformacji dynamicznych (charakteru pracy obudowy) wielkość ciężaru skał zawartych w strefie deformacji niesprężystych będzie stanowił o wielkości końcowego statycznego obciążenia obudowy wyrobiska.

Oceniając praktyczne znaczenie metod uwzględniających reologiczne własności skał przypisujących górotworowi izotropowe bądź anizotropowe własności lepko-sprężyste, czy lepko-sprężysto-plastyczne trudno w chwili obecnej określić ich miarodajność w odniesieniu do aktualnych głębokości eksploatacji i przyjmowanego założenia o hydrostatycznym stanie naprężeń i nieściśliwości górotworu. Powołując się na pracę [7] i przedstawione w niej wyniki sądzić należy, że stan taki może wystąpić dla skał karbońskich dopiero w granicach głębokości do 30 km.

5. CEL, ZAKRES PRACY I ZAŁOŻENIA

Dokonana w rozdziale 4 pracy analiza hipotez i metod dotyczących współpracy obudowy z górotworem wykazała, że zakres stosowania poszczególnych rozwiązań jest w dużym stopniu ograniczony poprzez przyjmowane uproszczenia w samych założeniach, jak również brak dostatecznej ilości informacji w zakresie parametrów wytrzymałościowych górotworu oraz jego własności deformacyjnych. Przyjmowane w hipotezach założenia charakteryzują pewien tylko model górotworu uogólniający cechy dominujące, co jest niewątpliwie słuszne dla określonych naturalno-geologicznych i górniczych warunków w jakich wykonywane są wyrobiska korytarzowe. Warunki te odbiegają jednak często od warunków spotykanych w praktyce górniczej, górotwór bowiem charakteryzuje się wieloma dodatkowymi istotnymi cechami, które ujawniają się w momencie wykonania wyrobiska.

Zagadnienia te nabierają szczególnego znaczenia wtedy, kiedy wyrobisko zlokalizowane będzie poniżej głębokości krytycznej dla danego rodzaju skał a proces deformacji przybierał będzie charakter dynamiczny i to w krótkim okresie czasu. W dotychczasowych metodach obliczeniowych brak jest miarodajnych hipotez pozwalających na określenie zasięgu powstającej wokół wyrobiska strefy deformacji niesprężystych, której ciężar skał w konsekwencji obciążać będzie jego obudowę, obciążeniem statycznym.

Celem niniejszej pracy było właśnie określenie na podstawie laboratoryjnych badań modelowych kształtu i zasięgu strefy deformacji trwałych i zruszenia górotworu w takich przypadkach, kiedy głębokość lokalizacji wyrobiska stwarza możliwość natychmiastowego zruszenia skał w jego otoczeniu tj. gdy wyrobisko lokalizowane jest poniżej zdefiniowanej już uprzednio głębokości krytycznej.

Zasadnicze prace badawcze poprzedzone zostały szeregiem obserwacji i pomiarów wykonanych w kopalniach ROW-u, których wyniki szczegółowo przedstawiono w pracach [40]. Przedmiotem tych prac badawczych było ustalenie wpływu czynników naturalno-geologicznych na charakter deformacji obudowy wyrobisk kapitalnych. Analiza rezultatów wymienionej pracy pozwoliła na sformułowanie zasadniczego zakresu badań objętych niniejszą pracą.

I tak w pracy postanowiono uwzględnić następujące czynniki geologiczno-górnicze:

- wyrobisko lokalizowane jest poniżej głębokości krytycznej dla jednych z typowych skał karbońskich,
- badaniom poddane będą wyrobiska o kształtach stosowanych w dotychczasowej praktyce budownictwa podziemnego,

- górotwór jednorodny charakteryzował się będzie budową warstwową o różnym kącie upadu warstw posiadając minimalną, praktycznie pomijalną wielkość sił spójności międzywarstwowej,
- obserwacje dotyczyć będą momentu krytycznego tj. stadium powstania strefy deformacji niesprężystych o maksymalnym zasięgu, bez uwzględnienia przejściowych stadiów jej formowania,
- wielkość przekrojów poprzecznych wyrobisk odpowiadać będzie pod względem teoretycznym wielkości wyrobisk jedno i dwutorowym.

Końcowym elementem prac badawczych będzie analityczne i graficzne określenie wielkości strefy deformacji niesprężystych z uwzględnieniem wpływu czynników naturalnych i techniczno-górnicznych na jej kształt, zasięg, w konsekwencji wielkość statycznego obciążenia obudowy.

6. PROGRAM BADAŃ

Dla spełnienia założonego celu pracy zgodnie z ustalonym zakresem badań eksperymentalnych i stosownie do przyjętych założeń opracowano szczegółowy program badań, który obejmował:

- ustalenie geometrycznego kształtu i wielkości strefy deformacji niesprężystych, trwałych w otoczeniu podstawowych w przekroju poprzecznym kształtów wykonywanych wyrobisk, tj.:
 - prostokątnego (kwadratowego),
 - kształtu sklepieniowego właściwego obudowie murowej,
 - łukowego,
 - kołowego,
 - eliptycznego;
- badania i analizę zjawisk w otoczeniu wyrobisk zlokalizowanych w górotworze uwarstwionym równoległe do rozciągłości,
- obserwacje zjawisk w przypadku trzech różnych kątów upadu warstw górotworu $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$,
- stwierdzenia i ustalenia związków pomiędzy wymiarami wyrobisk, a wymiarami tworzącej się strefy rozluźnionych skał,
- ustalenia matematycznych związków stwierdzonych zależności służących do prognozowania strefy deformacji trwałych dla wyrobisk rzeczywistych.

Skoncentrowanie prac badawczych wokół problemów utrzymywania wyrobisk na dużych głębokościach okazało się w praktyce słusznym, albowiem znacznie skrócono czas obserwacji zjawisk, a doprowadzenie modeli do krytycznego stanu kruszenia - umożliwiło wykonanie makroskopowych obserwacji oraz zebranie fotograficznych dokumentacji wyników badań. Na całość dokumentacji wynikowej składają się rejestracje dokonywane za pomocą przyrządów pomiarowych, prace graficzne oraz opisy przebiegu zjawisk.

7. METODA REALIZACJI BADAŃ

Przedstawiony program badań eksperymentalnych realizowano w laboratorium na modelach z materiałów ekwiwalentnych w oparciu o metodę odwzorowań modelowych. W tym celu posłużono się przede wszystkim zasadami podobieństwa modelowego, odpowiednim stanowiskiem badawczym, jak również odpowiednim wykonaniem samego modelu i sposobem pomiaru.

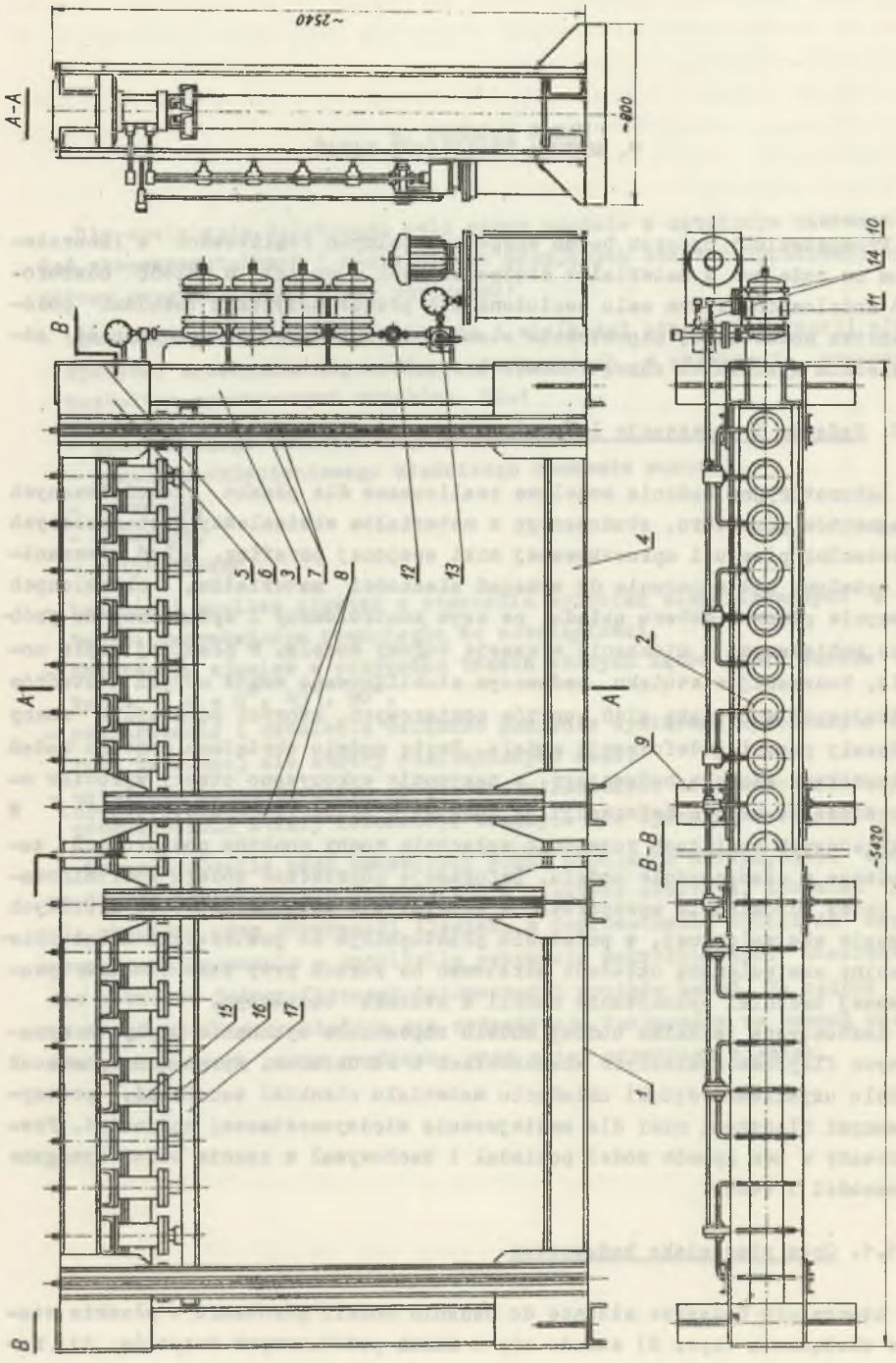
7.1. Badania i obserwacje laboratoryjne

Laboratoryjne badania modelowe realizowano dla płasko zamodelowanych fragmentów górotworu, zbudowanego z materiałów ekwiwalentnych stanowiących mieszaninę piasku i sproszkowanej miki spojonej parafiną. Skład mieszaniny ustalony był stosownie do wymagań własności materiałów, określonych wstępnie podczas doboru składu, po czym kontrolowany i sprawdzany na próbkach pobieranych z mieszanin w czasie budowy modelu. W płaskiej bryle modelu, budowanej w stoisku badawczym stabilizowano wokół obrysu otworów imitujących wyrobiska sieć punktów pomiarowych, których późniejsze ruchy oddawały przebieg deformacji modelu. Bryłę modelu obciążano podczas badań siłownikami stoiska badawczego, a następnie wykonywano otwory wyrobisk oraz śledzono proces deformacji na podstawie zdjęć fotogrametrycznych. W późniejszych analizach rozważono wyłącznie ruchy punktów pomiarowych zachodzące w płaszczyźnie modelu. Deformacje poprzeczne modelu wyeliminowano przez odpowiednie spreparowanie modelu, tj. zatopienie kotwi drutowych w masie ekwiwalentnej, w położeniu prostopadłym do powierzchni modelu. Mieszaninę ekwiwalentną układano warstwowo na gorąco przy zastosowaniu opracowanej techniki wykonywania modeli w stoisku badawczym.

Zastosowana technika budowy modelu zapewniała wykonanie bryły o wymaganych fizyko mechanicznych własnościach i strukturze. Wyraźną warstwowość modelu uzyskiwano dzięki układaniu materiału cienkimi warstwami, przesypanych blaszkami miki dla zmniejszenia międzywarstwowej spójności. Spreparowany w ten sposób model posiadał i zachowywał w czasie badań wymagane własności i cechy.

7.1.1. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze służące do badania modeli górotworu w płaskim stanie obciążenia (rys. 8) składa się z dwóch podstawowych zespołów, tj. ra-



Eys. 8. Stoisisko do badań modelowych

my nośnej 1 i układu hydraulicznego siłowników 2, wywołującego obciążenie modelu.

Ramę nośną stanowi prostokątna konstrukcja spawana wykonana z ceowników i blach stalowych o grubości 10 mm, odpowiednio ze sobą łączonych. Wnętrze ramy nośnej wzdłuż belek 3 i 4 wyłożono blachą spawaną do ceowników, tworząc w ten sposób ścianki boczne i płytę dolną stoiska. Naroża ramy nośnej zostały wzmocnione płytami 5 i 6 oraz czterema parami ceowników 7 (po jednej z każdego naroża). Ceowniki te wraz z dodatkowymi czterema parami ceowników 8, spinających belki dolną i górną, stanowią prowadzenie dla oszalowania podczas budowy modelu. Dolna belka ramy nośnej zawiera trzy podstawy służące do mocowania jej do fundamentu.

W zespole układu hydraulicznego wyróżnia się podzespół 25 siłowników hydraulicznych obciążających aktywnie model oraz podzespół olejowej stacji zasilającej wraz z ciągiem przewodów obiegowych dla oleju wraz z czterema hydroakumulatorami. Nad stacją zasilającą 10 w przewód tłoczny wmontowany jest kulowy zawór, którego zadaniem jest kierowanie oleju do przewodów. Zadaniem 4 hydroakumulatorów powietrznych 11 jest zwiększenie pojemników układu, zmniejszenie pulsacji ciśnienia oleju podczas pracy pompy, jak również utrzymanie ciśnienia na możliwie stałym poziomie przez rozprężenie poduszki powietrznej po zamknięciu zaworu 12 i zatrzymaniu pompy. Ponadto do układu przewodów włączony został zawór bezpieczeństwa na ciśnienie do 250 atm.

Rozprowadzenie oleju pod ciśnieniem do siłowników oraz jego odpływ odbywa się poprzez obrotowy rozdzielacz 13. Na końcu przewodu tłoczego znajduje się zawór służący do odpowietrzenia układu. Zespół siłowników 15 zamocowany jest do górnej belki ramy nośnej, skok roboczy tłoka 16 wynosi około 120 mm, średnica zaś 92 mm.

Praca układu hydraulicznego obejmuje trzy fazy, tj.:

- opuszczenie tłoków i obciążenia modelu,
- unieruchomienie tłoków pod ciśnieniem na okres rejestracji i pomiarów,
- podnoszenie tłoków podczas obciążenia modelu.

Przekazywanie obciążenia od siłowników na model odbywa się poprzez metalowe bądź drewniane płyty (oddzielnie pod każdym siłownikiem), układane na całym modelu. Grubość badanego bloku modelu może wynosić do 300 mm. Z uwagi jednak na zastosowaną do ich wykonawstwa technikę szalowania przesuwnego grubość modelu wynosiła 200 mm.

7.1.2. Kryteria podobieństwa modelowego i dobór materiału ekwiwalentnego do badań

Podstawę modelowania badanego wycinka górotworu zgodnie z pracami [5], [26], [32] stanowiły dwie zasady podobieństwa o następującej treści:

- 1) Geometryczne podobieństwo modelu występuje wtedy, gdy wymiary przestrzeni zajętej przez model pozostają w odpowiednim stosunku, zgodnym

z przyjętą skalą modelowania, do wymiarów modelowanej przestrzeni w naturze.

2) Jednocześnie z zachowaniem geometrycznego podobieństwa modelu, model winien spełniać warunki podobieństwa mechanicznego, istotniejszego w tym przypadku z punktu widzenia jakościowego i ilościowego przebiegu zjawisk, są nimi:

- a) warunek kinematycznego podobieństwa układu,
- b) warunek dynamicznego podobieństwa modelu,
- c) warunek reologicznego podobieństwa modelu.

Ad a) Kinematyczny warunek podobieństwa modelowego występuje wówczas, gdy względne przesunięcia poszczególnych punktów górotworu w naturze i odpowiadające im w modelu pozostają ze sobą w związku geometrycznym. Innymi słowy, gdy wzajemnie odpowiadające sobie fragmenty górotworu w naturze i w modelu ulegają tym samym odkształceniom liniowym i postaciowym od podobnej przyczyny pozostającej w kinematycznym związku podobieństwa. Można to zapisać jako:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_N \quad (13)$$

oraz

$$\overline{v}_M = \overline{v}_N \quad (14)$$

Ad b) Dynamiczny warunek podobieństwa modelu zostaje spełniony wówczas, gdy stosunek sił w naturze i w modelu przyłożonych do mas odpowiadających sobie fragmentów górotworu i modelu jest taki sam, jak stosunek iloczynów mas i przyspieszeń.

Warunek ten można zapisać w postaci równania:

$$\frac{F_N}{F_M} = \frac{m_N \cdot a_N}{m_M \cdot a_M}, \quad (15)$$

wynika stąd stałość stosunku mas jednostkowych, które różnić się będą w tym przypadku jedynie stałym mnożnikiem i tak:

$$m_M = c \cdot m_N, \quad (16)$$

gdzie:

c - stały mnożnik.

Ad c) Warunek czasowego podobieństwa modelu osiąga się, gdy prędkość deformacji dla skał i dla materiałów ekwiwalentnych da się wyrazić stałym stosunkiem, czyli:

$$\frac{\dot{\epsilon}_N}{\dot{\epsilon}_M} = \text{const} \quad (17)$$

lub inaczej

$$\frac{t_N}{t_M} = \text{const} \quad (18)$$

Niezbędnymi więc warunkami istnienia podobieństwa modelu jest jednocześnie kryteriów określających badany proces.

Kryteria te można wyrazić następującymi właściwościami:

- identycznością początkowego stanu układów,
- podobieństwem mechanicznych warunków przebiegu zjawisk w okresie badań,
- proporcjonalnością fizykomechanicznych stałych materiałów służących do wykonania modelu,
- geometrycznym podobieństwem układów zawartych głównie w identyczności kształtów wyrobisk oraz proporcjonalności wymiarów, przy czym proporcjonalność ta może w tym przypadku odbiegać od ogólnej skali modelowania, gdyż nie zmienia istoty zjawisk.

Biorąc powyższe warunki pod uwagę, podstawowe fizykomechaniczne wskaźniki materiałów ekwiwalentnych winny czynić zadość zależnościom:

- dla zachowania podobieństwa mas:

$$\frac{\rho_M}{\rho_N} = \frac{\rho'_M}{\rho'_N} = \dots = \frac{\rho_M^{(n)}}{\rho_N^{(n)}} \quad (19)$$

lub ciężarów

$$\frac{\gamma_M}{\gamma_N} = \frac{\gamma'_M}{\gamma'_N} = \dots = \frac{\gamma_M^{(n)}}{\gamma_N^{(n)}} \quad (20)$$

- dla zachowania podobieństwa zjawisk ściskania skał:

$$(\sigma_o)_M = \frac{1}{n} \frac{\rho_M}{\rho_N} (\sigma_o)_N \quad (21)$$

lub

$$(R_c)_M = \frac{1}{n} \frac{Q_M}{Q_N} (R_c)_N, \quad (22)$$

gdzie:

n - oznacza skalę modelowania.

- dla zachowania podobieństwa zjawisk załamania:

$$(\sigma_z)_M = \frac{1}{n} \frac{Q_M}{Q_N} (\sigma_z)_N \quad (23)$$

lub

$$(R_z)_M = \frac{1}{n} \frac{Q_M}{Q_N} (R_z)_N \quad (24)$$

- dla zachowania podobieństwa odkształceń:

$$E_M = \frac{1}{n} \frac{Q_M}{Q_N} E_N \quad (25)$$

oraz

$$G_M = \frac{1}{n} \frac{Q_M}{Q_N} G_N \quad (26)$$

jak też

$$v_M = v_N \quad \text{oraz} \quad \varepsilon(\sigma_c)_M = \varepsilon(\sigma_c)_N. \quad (27)$$

Ponadto mechanicznie podobne do skał materiały ekwiwalentne powinny w przybliżeniu spełniać związek:

$$\left(\frac{R_c}{R_z}\right)_M \approx \left(\frac{R_c}{R_z}\right)_N. \quad (28)$$

Spełnienie w modelu górotworu wszystkich warunków podobieństwa jednocześnie jest praktycznie nieosiągalne. Albowiem różnorodność cech i własności materiałów ekwiwalentnych powoduje duże rozbieżności w odniesieniu do wielkości ustalonych przy pomocy kryteriów. Sama bowiem technika i

technologia przygotowywania materiałów ekwiwalentnych oraz całego modelu górotworu jest o tyle niedoskonała, że powoduje znaczne odstępstwa od własności założonych w określonych fragmentach modelu.

Dlatego też za podstawę przy ustalaniu własności modelu przyjęto zachowanie podobieństwa w zjawiskach ściskania i zginania i tu dążono do możliwie najwierniejszego odwzorowania naturalnego górotworu oraz do zachowania podobieństwa kształtu wykonywanych wyrobisk. Sam natomiast sposób prowadzenia badań (obciążenie modelu do stanu krytycznego), pozwalał odstąpić od zachowania kryteriów podobieństwa, np. reologicznego, przez co znacznie skrócono cykl badań.

Dla lepszego zaobserwowania zjawisk deformacji górotworu odstąpiono także od przyjętej skali modelowania w ustaleniu wymiarów otworów imitujących wyrobiska, które wykonano w skali 1:10 przy ogólnej skali modelowania 1:25.

Ważnym elementem odwzorowania rzeczywistych warunków w badaniach modelowych był sposób przygotowania modelu do prowadzenia obserwacji we wstępnej fazie obciążenia. W realizowanych badaniach obciążenie aktywne modelu bez wyrobisk przez siłowniki stoiska było tak duże, że z chwilą wykonania otworów imitujących wyrobiska w modelu dochodzono do krytycznego stanu naprężenia po kilkuprocentowym zaledwie wzroście obciążenia.

W badaniach modelowych przyjęto odwzorowywać górotwór wyraźnie uwarstwiony o zmiennym kącie nachylenia warstw (0° , 45° i 90°) i ich wytrzymałości na ściskanie wynoszącej około 5000 N/cm^2 oraz ciężarem objętościowym $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ N/cm}^3$, co odpowiadać może w rzeczywistych warunkach silnie uławiconym ilwocom, mułowcom czy też piaskowcom.

Przyjmując dla parafinowych materiałów ekwiwalentnych stosunek mas 0,6 - wstępnie ustalona wytrzymałość materiału ekwiwalentnego na ściskanie winna wynosić dla przyjętej skali:

$$R_{oM} = \frac{1}{25} 0,6 \cdot 5000$$

$$R_{oM} = 120 \text{ N/cm}^2 .$$

Stosowanie do tych wymagań ustalono skład materiału ekwiwalentnego, który wynosił:

piasek	- 92%,
sproszkowana mika	- 3%,
parafina	- 5%.

Materiał ten przyjęto układać w modelu warstewkami o grubości 6-8 mm przesypując je drobnymi blaszkami miki dla oddzielenia warstw i uzyskania wymaganego uławicenia.

Z przeprowadzonych badań nad serią prób o wymiarach 160 x 160 mm odpowiednio spreparowanych wynika, że wytrzymałość na ściskanie materiału jest nieco wyższa i wynosi średnio 129 N/cm^2 , co odpowiada rzeczywistej wytrzymałości skały o wielkości około 5400 N/cm^2 .

W przeprowadzonych badaniach modelowych niszczenie modelu odbywało się przy średnich naprężeniach niszczących wynoszących 43 N/cm^2 . Odnosząc więc do rzeczywistych warunków zalegania górotworu w stanie niszczenia skał analogiczną koncentrację naprężeń wokół wyrobisk, co w modelu, tj.:

$$\frac{43}{129} = \frac{x}{5400}$$

otrzymuje się wielkość naprężeń w naturalnym górotworze wywołującą krytyczny stan wokół wyrobisk, a wynoszącą:

$$x = 1790 \text{ N/cm}^2.$$

Dla przyjętego ciężaru objętościowego naturalnych skał, głębokość, dla której występuje w górotworze wokół wyrobisk stan krytyczny wynosi:

$$h_N = 677 \text{ m}.$$

W przyjętej skali modelowania dochodzi się więc do modelu górotworu o wysokości modelowanych warstw wynoszącej około 27 m.

Oczywiście wykonanie modelu o takiej wysokości jest niemożliwe i dla spełnienia warunków podobieństwa modelu i odwzorowania zjawisk, niezbędnym staje się aktywne obciążenie modelu przez siłowniki, co też miało miejsce.

Ciśnienie bloku modelu o wysokości 27 m dla założonego i przyjętego stosunku masowego 0,6 wynosi $43,32 \text{ N/cm}^2$. Wielkość ta pozostaje w zgodności z wielkością niszczących naprężeń w modelu wynoszących, jak już wcześniej podano 43 N/cm^2 . Konfrontacja ta dowodzi zgodności i poprawności modelowego odwzorowania górotworu i warunków zalegania badanych wyrobisk w naturalnym górotworze. Warunki te określają następujące parametry:

głębokość wyrobisk	- 677 m,
wytrzymałość skał na ściskanie	- 5400 N/cm^2 ,
ciężar objętościowy skał	- $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ N/cm}^3$,
koncentracja naprężeń wokół wyrobisk	- 3,
ciśnienie krytyczne	- 1790 N/cm^2 .

Dla przyjętej w badaniach skali modelowania oraz założonego i możliwego do uzyskania w materiałach ekwiwalentnych stosunku masowego 0,6 - warunki badań modelowych określają parametry:

wysokość modelu	- 27 m,
wytrzymałość materiału	- 129 N/cm^2 ,

ciężar objętościowy materiału	- $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ N/cm}^2$,
ciśnienie krytyczne	- 43 N/cm^2 ,
ciśnienie oleju w siłowniach w stanie niszczenia	- 28,26 atm,
średnia wartość koncentracji naprężeń wokół otworów imitujących wyrobiska	- 3,
oraz poprzednio ustalony skład mieszanin ekwiwalentnych.	

Dalsze własności wytrzymałościowe materiałów ekwiwalentnych spełniających najważniejsze kryteria podobieństwa modelowego wynoszą:

$$R_z = 1,9 \text{ N/cm}^2, \quad R_x = 1,3 \text{ N/cm}^2, \quad E = 15000 \text{ N/cm}^2, \quad \nu = 0,2.$$

Przeprowadzone kontrole badania prób materiałów ekwiwalentnych pobranych z modelu w czasie jego wykonania i preparowania wykazują wysoką zgodność wielkości z ustaleniami dokonanymi dla prób cylindrycznych oraz założonych własności skał w naturze.

Stwierdza się zatem, że wyniki badań modelowych winny być miarodajne, a same badania oddają jakościowy sens procesu deformacji skał wokół wyrobisk w górotworze naturalnym.

7.1.3. Metodyka i sposób prowadzenia badań laboratoryjnych

Stosowanie do założonego programu laboratoryjnych badań modelowych, opracowana metodyka prowadzenia badań wymagała rozwiązania trzech podstawowych zagadnień, a to:

- 1) wypracowania miarodajnej techniki wykonania modelu górotworu,
- 2) opracowanie sposobu realizacji procesu obciążenia modelu i wykonywania wyrobisk,
- 3) oceny wielkości deformacji modelu i zasięgu strefy deformacji w otoczeniu otworów imitujących wyrobiska.

Jak już wcześniej podano, badany model górotworu wykonywany był w stoisku badawczym z materiału ekwiwalentnego odzwierciedlającego cechy i rzeczywiste własności skał.

W tym celu warstewki materiału ekwiwalentnego o grubości około 8 mm, przesypanyo blaszkami miki stwarzając tym samym wyraźne uwarstwienie bądź ukawicenie modelu.

Dla wyeliminowania deformacji modelu poprzecznie do odsłoniętej powierzchni bloku, w materiale ekwiwalentnym zatapiało odcinki stalowego drutu spełniające rolę kotwi. Długość tych drutów była około 1,5 cm mniejsza od szerokości modelu, odległość pozioma w warstwie wynosiła około 10 cm, a długość pionowa – co trzecia warstwa z jednoczesnym przesunięciem drutów o 5 cm w poziomie w stosunku do niższej warstwy. Ponadto obserwacjami objęto tylko efektywną część modelu, tzn. z obserwacji wyłączo-

no boczne przyścienne kliny wydzielone liniami nachylonymi pod kątem około $45^\circ - \frac{\phi}{2}$, wyprowadzonymi z górnych naroży modelu. W obszarze bowiem tych klinów zaznaczał się wpływ tarcia modelu o ściany boczne stoiska zmieniający wyniki obserwacji.

Na przedniej powierzchni modelu stabilizowano sieć punktów pomiarowych w otoczeniu zewnętrznego obrysu otworów wyrobiska. Wykonanie modelu zgodnie z wyżej podanymi wytycznymi gwarantowało miarodajność uzyskiwanych wyników.

Kolejnym zagadnieniem wymagającym opracowania było odwzorowanie rzeczywistych warunków wykonywania otworów imitujących wyrobiska. Dla spełnienia kryteriów podobieństwa przebiegu procesu wykonywania wyrobisk w górotworze, wykonany model we wstępnej fazie badań, obciążono aktywnie siłownikami, wywołując we wnętrzu modelu naprężenie o takiej wielkości, aby koncentracja naprężeń po wykonaniu otworów była bliska koncentracji krytycznej. Okres trwania obciążenia o takiej wielkości wynosił około 24 godzin. Po upływie tego okresu dokonywano w odstępach czasu co 1 godz. trzech kolejnych pomiarów położenia punktów pomiarowych, przyjmując stan za ustabilizowany, o ile nie stwierdzono zmiany położenia punktów. Następnie w modelu wykonywano ręcznie otwory imitujące wyrobiska, urabiając materiał ekwiwalentny po obwodzie szablonu stanowiącego przekrój badanych wyrobisk. Po wykonaniu otworów wyrobisk i upływie 3 godz. wykonywano kolejny pomiar położenia punktów, po czym co 1 godz. dwa dalsze pomiary. O ile po upływie takiego okresu czasu w modelu nie występowały zniszczenia (spękania warstw) zwiększano obciążenie o około 5% w stosunku do obciążenia pierwotnego i powtarzano cykl pomiarów. Badania przerywano o ile w modelu obserwowano sieć szczelin wokół otworów wyrobiska, co odpowiadało najczęściej momentowi spadku ciśnienia oleju w siłownikach pomimo ciągłego tłoczenia oleju.

Najistotniejszym zagadnieniem prowadzonych badań była sprawa szybkich rejestracji położenia punktów, dokonywana w miarę możliwości jednocześnie dla wszystkich punktów pomiarowych. Możliwości takie stwarzają pomiary fotogrametryczne położenia punktów, prowadzone z trzech stanowisk jednocześnie zastabilizowanymi w jednej linii prostej odległej o 5,83 m od przedniej powierzchni modelu (rys. 9).

Do pomiarów użyto kamety typu Wild P.30 nr 302 oraz klisz CRWO o podłożu szlifowanym. Kamery lewa i prawa służą jako pomocnicze stanowiska pomiarowe do kontroli poprzecznych deformacji modelu. Do opracowania wyników pomiarów wyznaczania przemieszczeń Δx i Δz punktów modelu wykorzystano zdjęcia centralnej kamery oraz pomocnicze wielkości paralaks: podłużnej "p" i poprzecznej "q".

Wielkości przemieszczeń poszczególnych punktów wyznaczono ze wzorów:

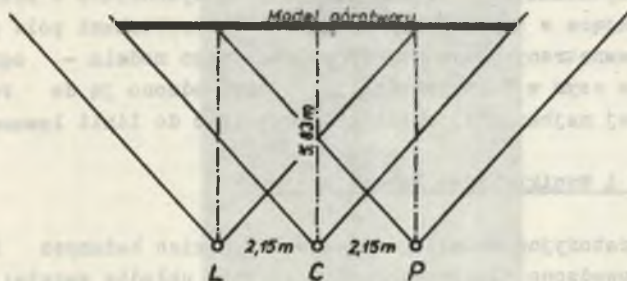
$$\Delta x = p \frac{\Delta V}{C_k} \quad (29)$$

$$\Delta z = q \frac{\Delta V}{C_k},$$

gdzie:

a - odległość stanowiska pomiarowego od modelu,

C_k - ogniskowe kamery.



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia stanowisk pomiarowych dla fototeodolitów

Wielkość przemieszczeń sprowadzono do układu, w którym punkty dolnego rzędu potraktowano jako stałe q_1 i $q_p = 0$.

Uwzględniając powyższe, odczytane wielkości paralaks przetransformowano na:

$$p = p' - p_0 + t_p \quad (30)$$

$$q = q' - q_0 + t_q ,$$

gdzie:

p, q - wielkości przetransformowane paralaks podłużnych i poprzecznych,

p', q' - wielkości paralaks odczytane na stekometrze,

p_0, q_0 - początek układu współrzędnych,

t_p, t_q - redukcje wynikające z założenia, że q_1 i $q_p = 0$.

Wyznaczone opisanym sposobem wielkości poziomych i pionowych przesunięć poszczególnych punktów umożliwiły określić pole przemieszczeń punktów pomiarowych wokół wyrobisk, które następnie stanowiło podstawę do określenia zasięgu strefy deformacji skał o wielkościach względnych przemieszczeń (pionowych i poziomych) podczas zginania warstw - równych lub większych od wielkości krytycznych.

Powierzchnie modelu charakteryzujące się takimi deformacjami przyjęto uważać za obszary rozluźnione - pokruszone, gdyż w ich zasięgu następowała utrata ciągłości materiału przez powstanie sieci mikroszczelin.

Krytyczne wielkości względnych deformacji sieci punktów pomiarowych wyznaczono laboratoryjnie dla zginanych beleczek o wymiarach 100x50x50 mm jednostronnie sztywno utwierdzonych, obciążonych siłą skupioną przyłożoną na końcu beleczki.

Odczytywanie wyników pomiarów odbywało się w pracowni poza miejscem badań za pomocą czytnika. Na podstawie odczytów wyznaczano w skali wektory przesunięć dające w zestawieniu z modelem i wyrobiskami pole przemieszczeń punktów. Zewnętrzny obrys strefy pokruszonego modelu - ograniczono linią łamaną, po czym w dalszych analizach sprowadzono ją do regularnej krzywej stożkowej najbardziej zbliżonej kształtem do linii łamanej.

7.1.4. Przebieg i wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne modeli górotworu wszystkich badanych kształtów wyrobisk przeprowadzono dla trzech podstawowych układów warstw:

- I wariant - obejmował badania modelowego górotworu o warstwach poziomo zalegających,
- II wariant - obejmował badania modelowego górotworu o warstwach ukośnie zalegających o kącie pochylecia warstw $\alpha = 45^\circ$,
- III wariant - obejmował badania modelowego górotworu o warstwach pionowo zalegających.

Tak przyjęty program badań umożliwia dokonać ocenę wpływu uwarstwionej budowy górotworu oraz wielkości kąta pochylecia warstw na zasięg występowania obszarów krytycznych naprężeń powodujących niszczenie struktury skał.

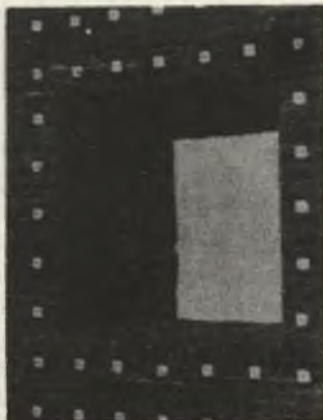
Zgodnie z dotychczasowymi poglądami w tym zakresie w warunkach statycznego oddziaływania górotworu na obudowę, pokruszona skała zawarta w obszarze strefy naprężeń krytycznych obciąża obudowę. Założenie to stanowiło podstawę wyznaczania obrysu obszaru występowania naprężeń niszczących strukturę skał, w płaszczyźnie poprzecznej do osi wyrobiska.

Za podstawę analizy wielkości obszarów stref naprężeń krytycznych przyjęto pięć kształtów wyrobisk, a to:

- 1) Wyrobisko o kształcie prostokątnym w tym kwadratowe,
- 2) Wyrobisko o kształcie dostosowanym do obudowy ze sklepieniem opartym na murach prostych,
- 3) Wyrobisko o kształcie dostosowanym do obudowy LP,
- 4) Wyrobisko o kształcie kołowym,
- 5) Wyrobisko o kształcie eliptycznym dla najczęściej praktycznie stosowanych w kopalniach przekrojów poprzecznych, podanych w tabelicy 3 do 7.

7.1.4.1. Wyrobisko prostokątne

W badaniach modelowych stosowanie do przyjętej skali modelowania wymiary poszczególnych wyrobisk stanowiły: 25 x 25 cm, 35 x 25 cm, 45x25 cm.



Rys. 10. Widok wyrobiska z deformującymi się warstwami stropowymi



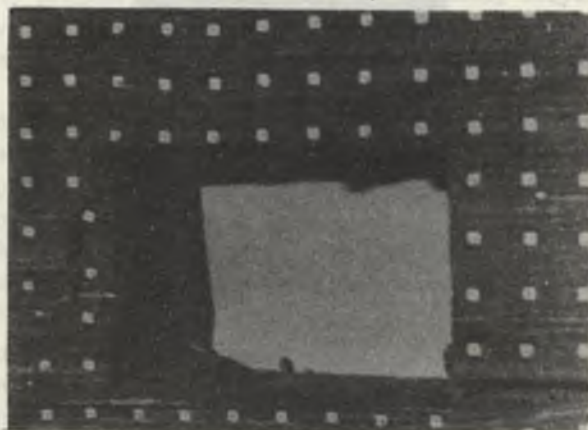
Rys. 11. Załamywanie się warstw stropowych w wyrobisku kwadratowym

Na podstawie prowadzonych makroskopowych obserwacji przebiegu deformacji modelowego górotworu w wariancie I wokół wyrobiska kwadratowego zauważono, że w fazie obciążenia $p_z(M) < p_z(M)_{kr}$ wystąpiło wyraźne ugięcie

warstwy przystropowej z równoczesnym utworzeniem się szczeliny międzywarstwowej (rys. 10).

Zjawisko powyższe świadczyłoby o wystąpieniu momentu zginającego w płaszczyźnie poprzecznej do uławicenia lub też o stopniowo zanikających naprężeniach stycznych na kontaktach międzywarstwowych, a pojawienie się naprężeń rozciągających w stropie wyrobiska. W fazie krytycznego obciążenia nastąpiło odpadnięcie warstwy przystropowej do wyrobiska i powstanie pęknięć w rejonie lewego górnego naroża wyrobiska (rys. 11).

Zjawisko to potwierdza znaną tezę o koncentracji naprężeń ściskających w obszarach naroży wyrobiska. Natomiast w dwóch pozostałych przekrojach odpowiadających kształtowi wyrobiska prostokątnego w krytycznej fazie obciążenia uwidoczniło się ponadto dodatkowe działanie parcia bocznego, w wyniku czego ulegał niszczeniu lewy ocios wyrobiska (rys. 12). Taki przebieg zjawisk świadczy o korzystniejszym rozkładzie naprężeń w sąsiedztwie wyrobiska o kształcie kwadratowym. Dla określenia deformacji warstw skalnych w dalszej odległości od ścian wyrobiska prostokątnego we wszystkich trzech wielkościach przekroju poprzecznego wykonano pomiary przemieszczeń cząstek skalnych poprzez pomiar przemieszczeń punktów założonych w otoczeniu każdego z wyrobisk, określając zarówno wielkość jak i kierunek ich przesunięć. Otrzymano w ten sposób pole przemieszczeń punktów pomiarowych w otoczeniu poszczególnych wyrobisk.

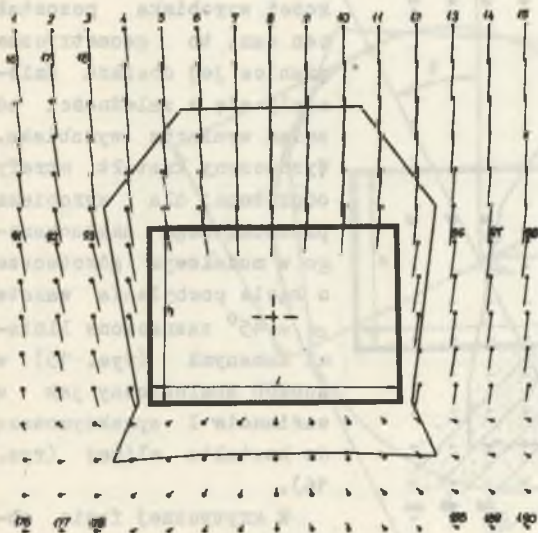


Rys. 12. Deformacje ociosów w wyrobisku prostokątnym z widocznym ugięciem stropu

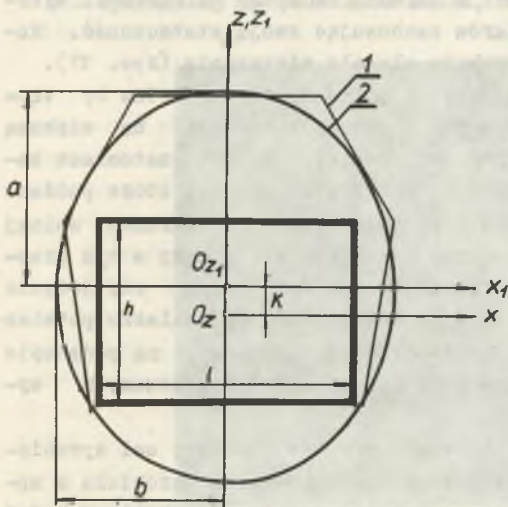
Obserwacje te pozwoliły na jakościowe określenie charakteru deformacji warstw w odniesieniu do płaszczyzn stropu, ociosów i spągu wyrobiska.

Równocześnie na tej podstawie wyznaczono graniczne linie określające obszar niebezpiecznych krytycznych naprężeń, sprzyjających utworzeniu się

deformacji nieciągłych w otoczeniu wyrobiska i ukształtowaniu się strefy skał odprężonych obciążających jego obudowę (rys. 13).



Rys. 13. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych



Rys. 14. Kształt i zasięg strefy odprężonej

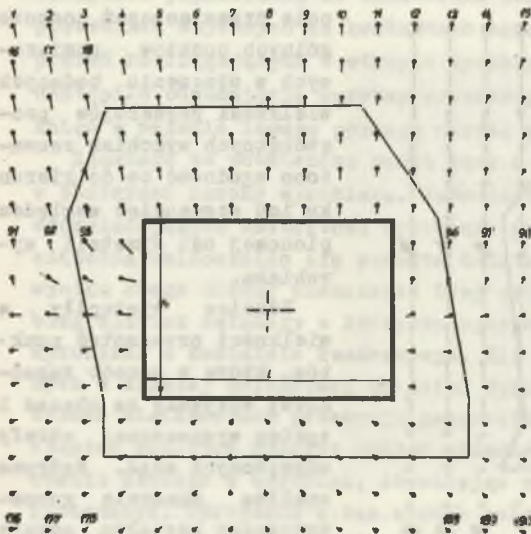
1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy

W przebiegu powstania pola przemieszczeń poszczególnych punktów pomiarowych w otoczeniu badanych wielkości przekrojów prostokątnych wyrobisk zauważono zgodność co do kierunku ich przesunięć względem pionowej osi symetrii wyrobiska.

Różnice wystąpiły w wielkości przesunięć punktów, które w sposób zasadniczy wpływały na obszar i zasięg wyznaczonej strefy odprężonych skał. Wstępna analiza odnośnie geometrycznego kształtu strefy skał odprężonych wykazała, że dla każdego z rozpatrywanych wielkości wyrobiska prostokątnego, kształt strefy zaznaczony w formie nieregularnych linii prostych (rys. 13) da się przybliżyć do kształtu elipsy (rys. 14).

Przeprowadzone badania nad zachowaniem się skał w otoczeniu tego samego kształtu i przyjętych wymiarów wyrobiska w wariancie II, nie wykazały cech deformacji nieciągłych makroskopowo widocznych. Dopiero na podstawie dokonanej analizy uzyskanych z pomiarów wielkości przemieszczeń punktów dla krytycznej fazy obciążenia modelu można było wyznaczyć prawdopodobny kształt i zasięg strefy wystąpienia deformacji

nieciągłych dla każdej z przyjętych do badań wielkości wyrobiska prostokątnego (rys. 15).



Rys. 15. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

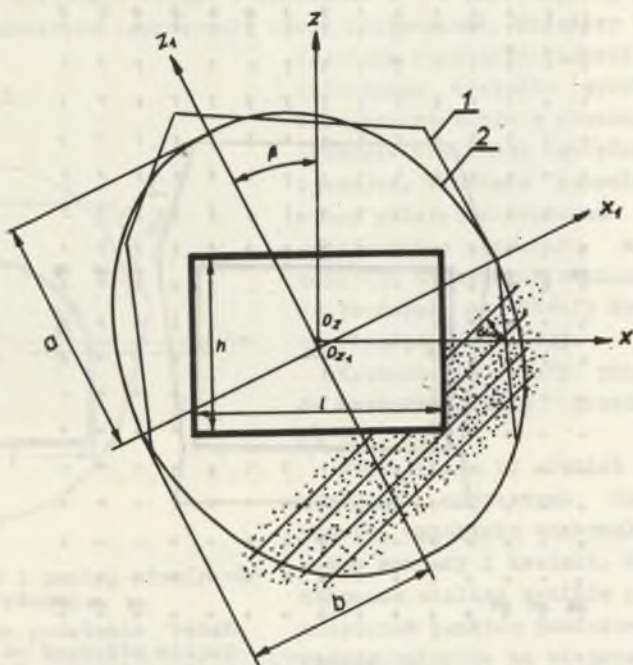
otoczeniu wyrobiska kwadratowego ani w dalszej od niego odległości. Wyrobisko nie zmieniło kształtu i wymiarów zachowując swoją stateczność. Natomiast wyrobisko o wymiarach prostokąta uległo niszczeniu (rys. 17).

Niszczeniu ulegały ociosy wyrobiska, co z jednej strony można by tłumaczyć wzmocnionymi naprężeniami ciśnącymi w ociosach z uwagi na większą szerokość wyrobiska w stosunku do jego wysokości, z drugiej natomiast załeganiem pionowym warstw równoległych do ociosów wyrobiska, które poddane osiowemu ściskaniu uległy wyboczeniu i przemieszczeniu w kierunku wolnej jego przestrzeni. Warstwy tworzące strop wyrobiska nie uległy w tym przypadku wyraźnym deformacjom. W sąsiedztwie stropu zarysowała się jedynie linia możliwego do utworzenia się sklepienia ciśnień, co znalazło potwierdzenie w analizie wyników pomiarów przemieszczeń punktów, na podstawie której wyznaczono strefy skał odprężonych dla kolejno przyjmowanych wymiarów wyrobiska (rys. 18).

Kształt tej strefy i jej położenie w stosunku do pionowej osi wyrobiska w zasadzie są analogiczne, jak w przypadku usytuowania wyrobiska w modelowym górotworze o poziomym kącie pochylenia warstw. Uzyskanie z badań poszczególnych wariantów parametry określające eliptyczny kształt strefy odprężonej dla wszystkich trzech wielkości wyrobiska zestawiono w tabelicy nr 3.

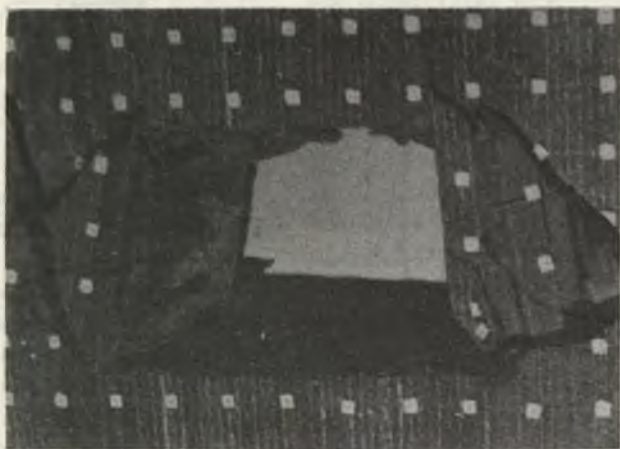
Jakkolwiek kształt tej strefy dla badanych wielkości wyrobiska pozostał ten sam, to geometryczne granice jej obszaru zmieniły się w zależności od zmian wymiarów wyrobiska. Wyznaczony kształt strefy odprężonej dla wyrobiska prostokątnego usytuowanego w modelowym górotworze o kącie pochylenia warstw $\alpha = 45^\circ$ zaznaczony liniami łamanymi (rys. 15) w sposób analogiczny jak w wariantach I aproksymowano do kształtu elipsy (rys. 16).

W krytycznej fazie obciążenia modelu o pionowym załeganiu warstw nie zaobserwowano wyraźnych deformacji warstw w najbliższym

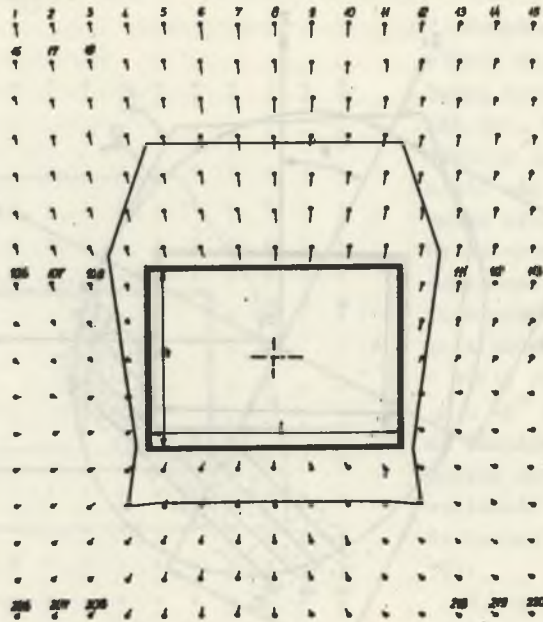


Rys. 16. Kształt i zasięg strefy odprężonej dla górotworu o kącie zalegania warstw $\alpha = 45^\circ$

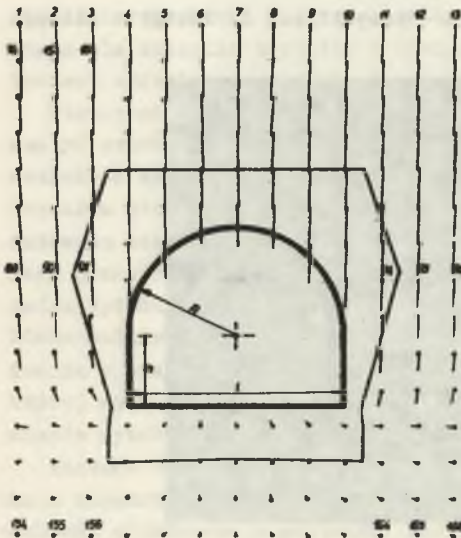
1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy



Rys. 17. Przebieg spękań ociosów dla wyrobiska prostokątnego



Rys. 18. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych



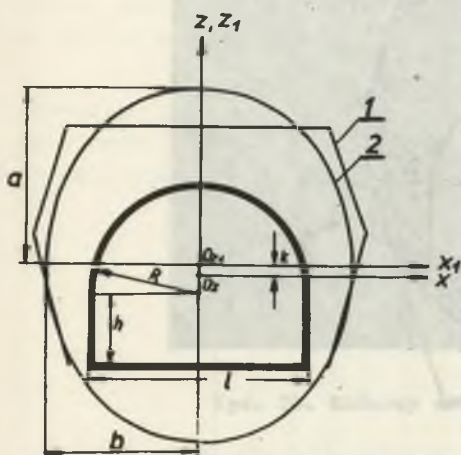
Rys. 19. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

7.1.4.2. Wyrobisko o kształcie dostosowanym do obudowy murowej

Analogicznie jak w pierwszym przypadku przeprowadzono badania deformacji skał dla poszczególnych wariantów wokół wyrobiska dostosowanego do obudowy ze sklepieniem kolistym opartym na murach prostych.

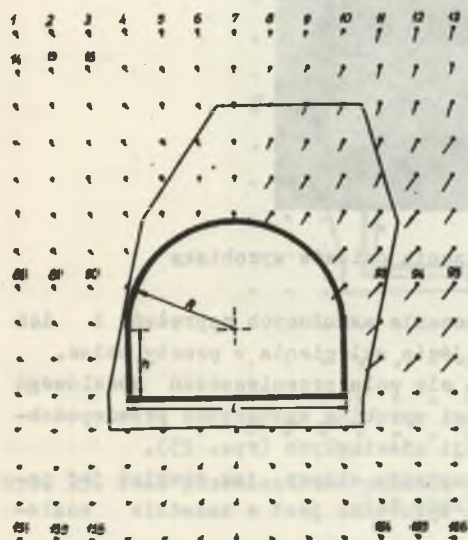
Do badań przyjęto następujące modelowe wielkości wyrobiska: 30 cm x 25 cm, 40 cm x 30 cm, 50 cm x 35 cm. W każdym wariantcie badano kolejno poszczególne wielkości wyrobiska i określano jego stateczność w zależności od stopnia deformacji warstw. Przeprowadzone makroskopowe obserwacje

cje wykazały, że wyrobisko badane w wariantcie I w poszczególnych jego wielkościach każdorazowo zachowywało swoją stateczność. Świadczy to o korzystnym rozkładzie naprężeń wokół założonego kształtu wyrobiska i nie przekroczeniu w otaczającym górotworze wielkości naprężeń krytycznych. Wykonane natomiast pomiary pola przemieszczeń punktów założonych w otoczeniu wyrobiska wskazują na wyraźną tendencję skał do tworzenia się strefy deformacji nieciągłych (rys. 19).



Rys. 20. Kształt i zasięg strefy odprężonej

1 - wyznaczony na podstawie badań,
2 - przybliżony do kształtu elipsy



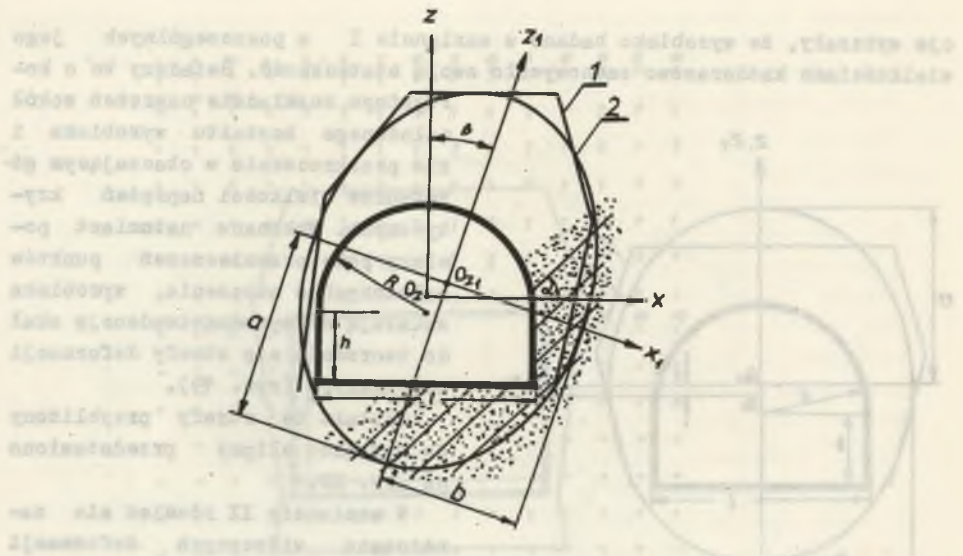
Rys. 21. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

Kształt tej strefy przybliżony do kształtu elipsy przedstawiono na rys. 20.

W wariantcie II również nie zanotowano widocznych deformacji warstw, wyrobisko zachowało pierwotne wymiary i kształt. Natomiast dokonana analiza wyników pola przemieszczeń punktów pomiarowych wyraźnie wskazuje na miejsca geometryczne wystąpienia w jego obszarze deformacji nieciągłych. Połączenie tych miejsc liniami prostymi wyznacza możliwą do utworzenia się strefę skał odprężonych (rys. 21).

Aproksymowany kształt tej strefy do kształtu elipsy przedstawiono na rys. 22.

W wariantcie III wyrobisko ulegało systematycznemu niszczeniu dla każdej badanej wielkości. W fazie obciążenia $P_z(M) < P_z(M)_{kr}$ występowało symetryczne łuszczenie się skały na wysokości ociosu po obu stronach wyrobiska. W krytycznej fazie obciążenia następowało odpadanie bloków skały do wnętrza wyrobiska prawie na całą wysokość ociosu i dalsze pogłębianie się deformacji nieciągłej obejmującej sklepienie wyrobiska (rys.23, 24).



Rys. 22. Kształt i zasięg strefy odprężonej dla górotworu o kącie załęgania $\alpha = 45^\circ$



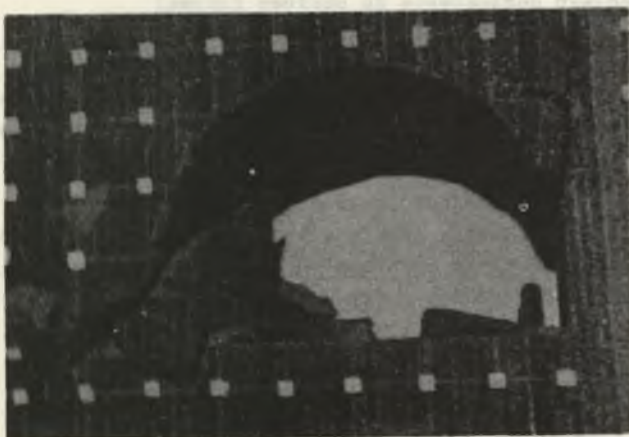
Rys. 23. Końcowa faza niszczenia ociosów wyrobiska

Zjawisko powyższe rzutuje na występowanie wzmoczonych naprężeń i ich niekorzystnego rozkładu w okolicy przejścia sklepienia w prosty ocios.

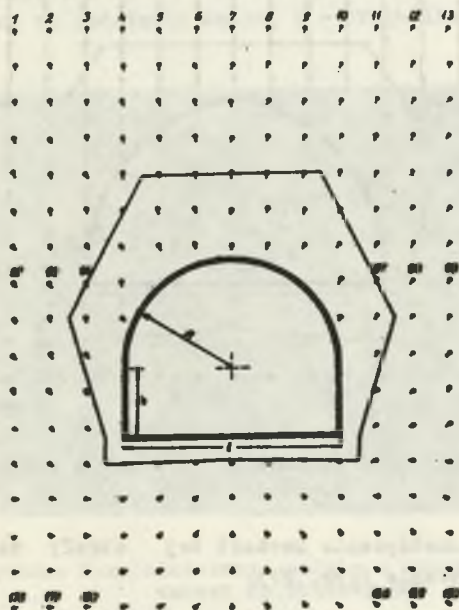
Z przebiegu natomiast kształtowania się pola przemieszczeń modelowego górotworu w otoczeniu badanych wielkości wyrobisk wyznaczono prawdopodobną granicę strefy wystąpienia deformacji nieciągłych (rys. 25).

Przybliżony kształt tej strefy do kształtu elipsy, jak również jej położenie względem pionowej osi symetrii wyrobiska jest w zasadzie analogiczne jak w wariancie I (rys. 20).

Charakterystyczne parametry określające kształt i wielkość strefy wystąpienia deformacji nieciągłych w otoczeniu wyrobisk badanych w kolejnych wariantach zestawiono w tabelicy nr 4.



Rys. 24. Końcowy etap deformacji modelu

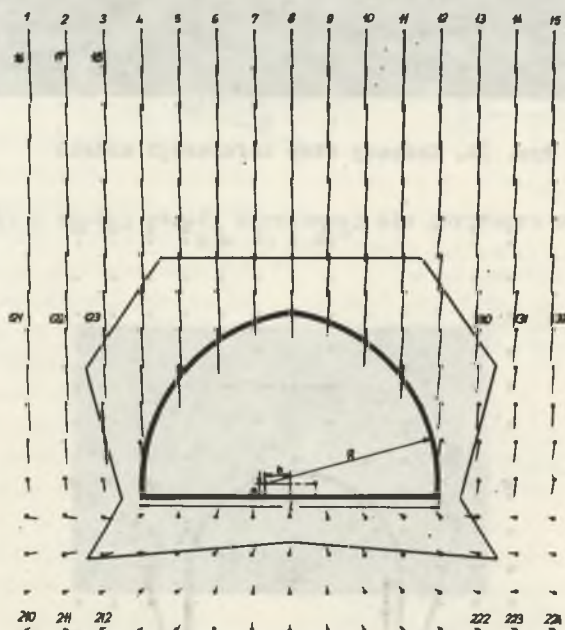


Rys. 25. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

7.1.4.3. Wyrobisko dostosowane do obudowy łukowej

Przeprowadzone według założonego programu kolejne badania nad zachowaniem się skał górotworu uwarstwionego wokół wyrobiska o kształcie dostosowanym do obudowy łP o modelowych wymiarach: 30 cm x 20 cm, 40 cm x 25 cm, 50 cm x 30 cm – wykazały:

- w wariancie I brak widocznej makroskopowo deformacji skał i wyrobiska. Natomiast dokonana analiza uzyskanych pomiarów przemieszczeń punktów założonych wokół wyrobiska wskazuje na możliwość tworzenia się w jego otoczeniu strefy nieciągłości skały (rys. 26).

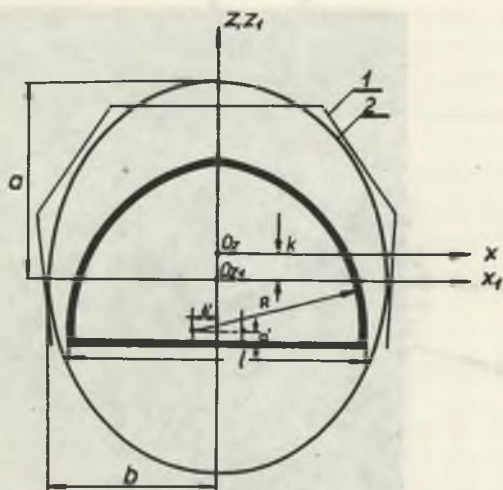


Rys. 26. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

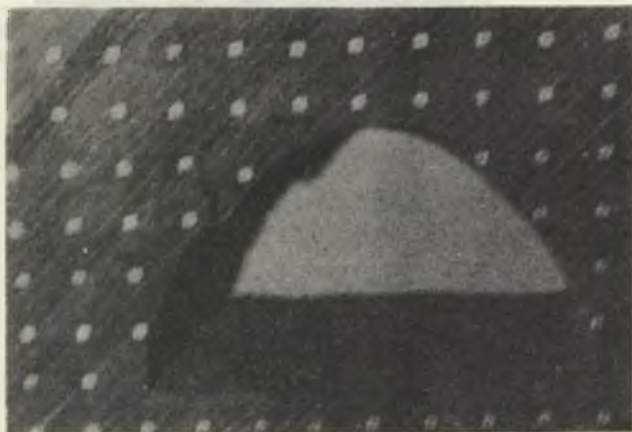
Przybliżony geometrycznie kształt tej strefy do kształtu elipsy przedstawia schematycznie (rys. 27).

- w wariancie II zaobserwowano wyraźną tendencję do rozszerzania deformacji skał wzdłuż płaszczyzn podzielnosci warstw i poprzecznie do nich. Struktura skały uległa widocznemu niszczeniu najczęściej w sąsiedztwie łączenia łuku ociosowego ze stropnicą (rys. 28).

W krytycznej fazie obciążenia powiększał się obszar skał spękanych tworząc obrys powstającej w otoczeniu wyrobiska strefy skał odprężonych (rys. 29).



Rys. 27. Kształt i zasięg strefy odprężonej
1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy



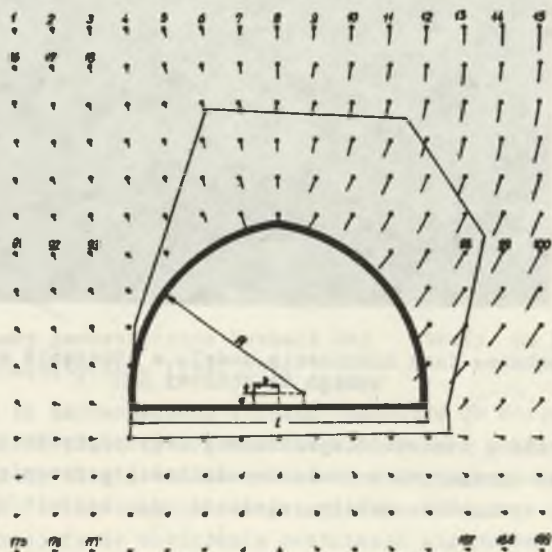
Rys. 28. Początkowa faza niszczenia modelu w otoczeniu wyrobiska dostosowanego do obudowy ŁP

Tworzenie się w otoczeniu wyrobiska strefy odprężonej potwierdza dokonana analiza uzyskanych z pomiarów wielkości przesunięć punktów, na podstawie której wyznaczono zasięg, wielkość oraz kształt strefy (rys. 30, 31).

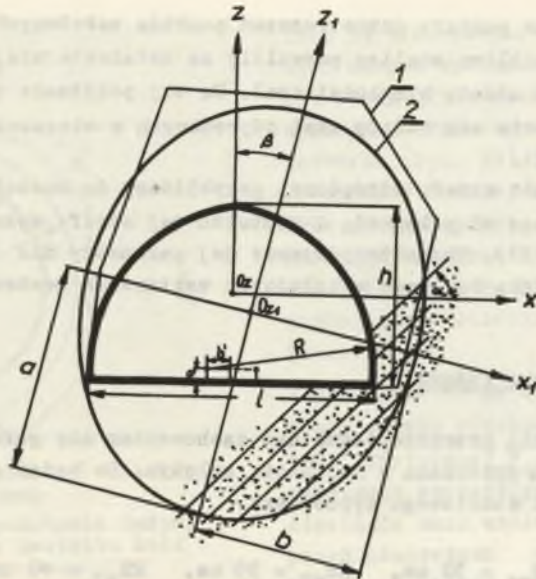
- w wariancie III wyrobisko zachowało swoją stateczność, a otaczające go skały nie wykazały cech makroskopowo wyraźnych deformacji nieciągłych.



Rys. 29. Końcowa faza niszczenia modelu w otoczeniu wyrobiska o kształcie obudowy łukowej

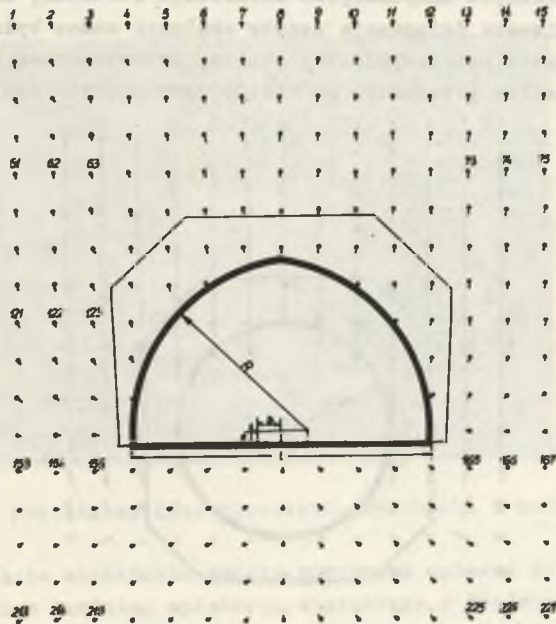


Rys. 30. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych



Rys. 31. Kształt i zasięg strefy odprężonej dla górotworu o kącie zalegania warstw $\alpha = 45^\circ$

1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy



Rys. 32. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych

Przeprowadzone pomiary przemieszczeń punktów założonych w otoczeniu wyrobiska i ich wnikliwa analiza pozwoliły na ustalenie miejsc prawdopodobnego wystąpienia utraty ciągłości skał. Na tej podstawie wyznaczono możliwą do utworzenia się strefę skał odprężonych w otoczeniu badanego wyrobiska (rys. 32).

Również kształt strefy odprężonej przybliżony do kształtu elipsy w zasadzie nie odbiega od położenia i kształtu tej strefy wyznaczonej w wariancie I (rys. 27). Charakterystyczne jej parametry dla poszczególnych wielkości wyrobiska badanego w kolejnych wariantach zestawiono w tabeli 5.

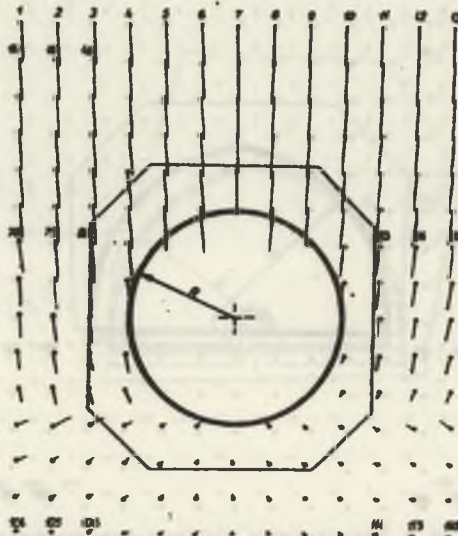
7.1.4.4. Wyrobisko kołowe

Kolejne badania przeprowadzone nad zachowaniem się górotworu uwarstwionego w otoczeniu wyrobiska o kształcie kołowym. Do badań przyjęto następujące wielkości modelowego wyrobiska:

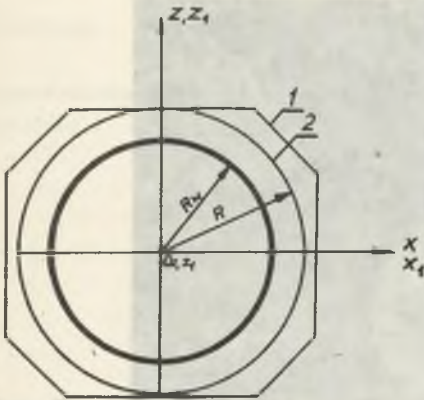
$$2R_{w1} = 30 \text{ cm}, \quad 2R_{w2} = 35 \text{ cm}, \quad 2R_{w3} = 40 \text{ cm}.$$

Przeprowadzone badania wykazały:

- w wariancie I zachowanie stateczności wyrobiska w każdej badanej wielkości bez widocznych makroskopowo deformacji struktury skały w jego otoczeniu. Spodziewane deformacje warstw skalnych można było dopiero określić na podstawie przeprowadzonej analizy przemieszczeń punktów. Przeprowadzona analiza przesunięć poszczególnych punktów pomiarowych pozwo-



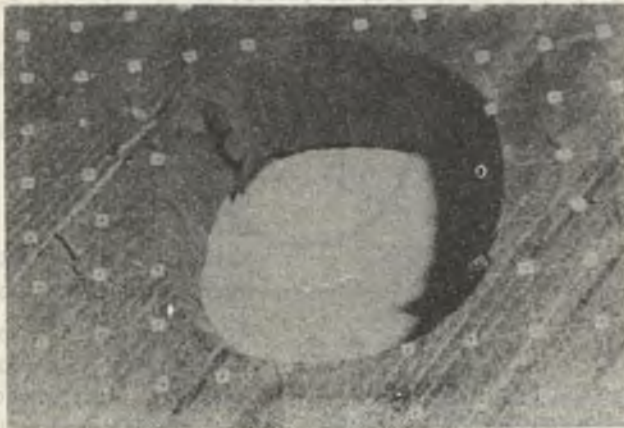
Rys. 33. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy deformacji nieciągłych



Rys. 34. Kształt i zasięg strefy odprężonej

1 - wyznaczony na podstawie badań,
2 - przybliżony do kształtu koła

w fazie obciążenia $P_z(M) < P_z(M)_{kr}$ było utworzenie się na obrysie wyrobiska wyraźnego pęknięcia na całą głębokość lewego górnego i dolnego prawego odciosu (rys. 35).



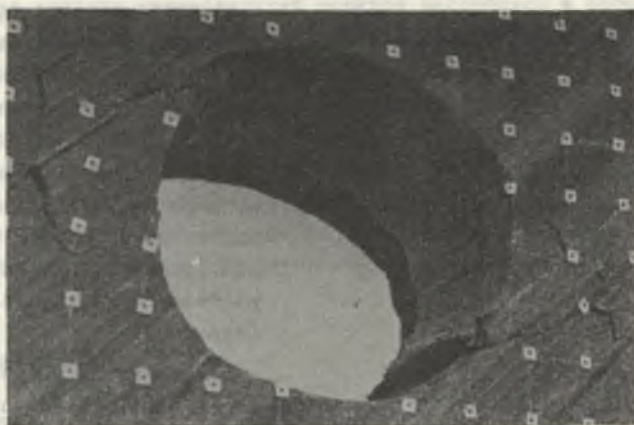
Rys. 35. Początkowa faza niszczenia wyrobiska i modelu

W krytycznej fazie obciążenia modelu górotworu opisane wyżej zjawisko nabrało makroskopowo bardziej wyraźnego charakteru z tendencją do utworzenia się naturalnego, korzystniejszego w tych warunkach kształtu wyrobiska (rys. 36).

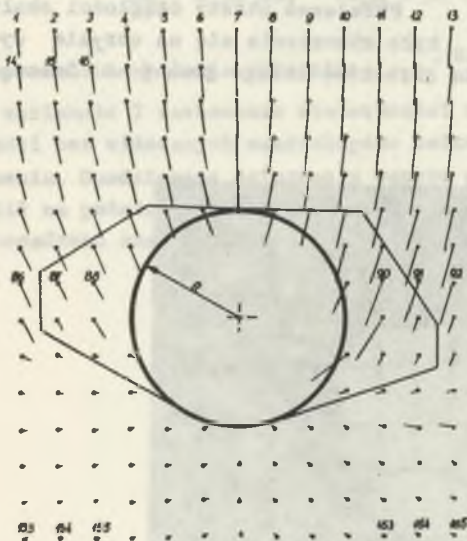
liła na wyznaczenie prawdopodobnych miejsc wystąpienia deformacji nieciągłych skał w otoczeniu wyrobiska złożonego w badanym górotworze (rys. 33).

Wyznaczone miejsca prawdopodobnego wystąpienia deformacji nieciągłych określają jednoznacznie wielkość i kształt skały odprężonej w otoczeniu wyrobiska (rys. 34).

- w wariancie II ze wzrostem obciążenia modelu górotworu do wartości krytycznej $P_z(M)_{kr}$ zaobserwowano narastające deformacje nieciągłe skał wzdłuż i w poprzek płaszczyzn uwarstwienia. Przejawem utraty ciągłości skały



Rys. 36. Widok wyraźnie tworzącej się strefy skał spękanych



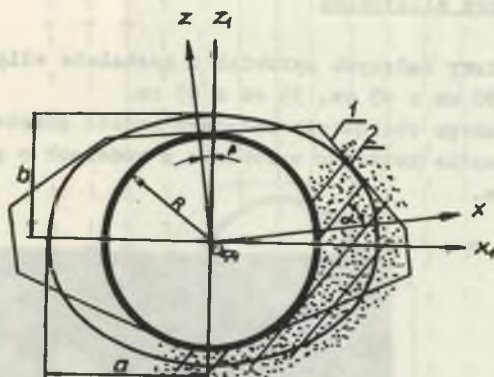
Rys. 37. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy odprężonej

miejsc nieciągłości skał w otoczeniu wyrobiska określono analogicznie, jak w wariantach I i II, tzn. na podstawie analizy pola przemieszczeń punktów (rys. 39).

W wyniku przeprowadzonej analizy i określania miejsc nieciągłości wyznaczono wielkość i kształt strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska.

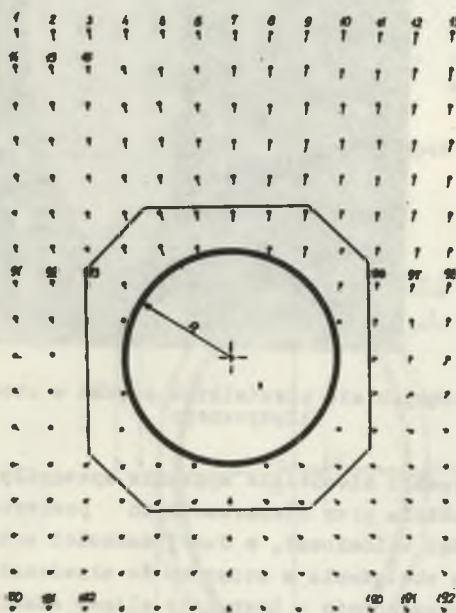
Tworzący się w wyniku deformacji skał naturalny kształt wyrobiska określa w przybliżeniu geometryczny obszar niebezpiecznych naprężeń powodujących niszczenie struktury skały i stabilizowanie się strefy skał odprężonych. Kształtowanie się strefy odprężonej zgodnie z zaobserwowanymi makroskopowo deformacjami skał potwierdza przeprowadzona analiza uzyskanych z pomiarów przesunięć punktów, na podstawie której wyznaczono wielkość i kształt strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska (rys. 37, 38).

- w wariantach III wyrobisko i otaczające go skały nie wykazały cech makroskopowo widocznych deformacji nieciągłych. Prawdopodobne wystąpienie



Rys. 38. Kształt i zasięg strefy odprężonej dla górotworu o kącie załęgania warstw $\alpha = 45^\circ$

1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy

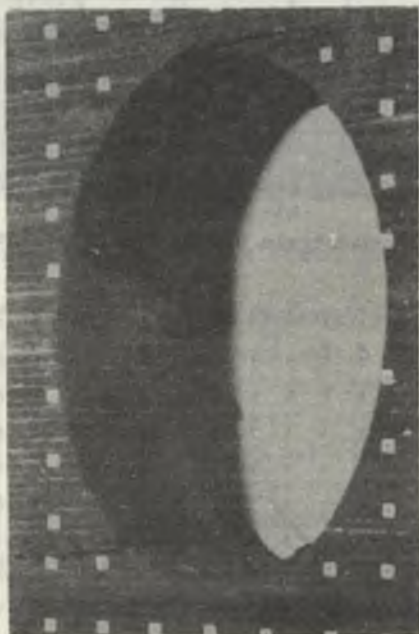


Rys. 39. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy odprężonej

Kształt tej strefy, jak również jej położenie w stosunku do osi wyrobiska są analogiczne jak w wariantcie I - rys. 34. Charakterystyczne wielkości określające obszar strefy odprężonej w stosunku do osi wyrobiska zestawiono w tabelicy 6.

7.1.4.5. Wyrobisko eliptyczne

Modelowe wymiary badanych wyrobisk o kształcie eliptycznym wynosiły: 25 cm x 45 cm, 30 cm x 45 cm, 35 cm x 45 cm. Podczas sukcesywnego obciążenia badanego modelu górotworu zaobserwowano korzystne zachowanie kształtu wyrobiska w modelach o poziomym i pionowym zaleganiu warstw.

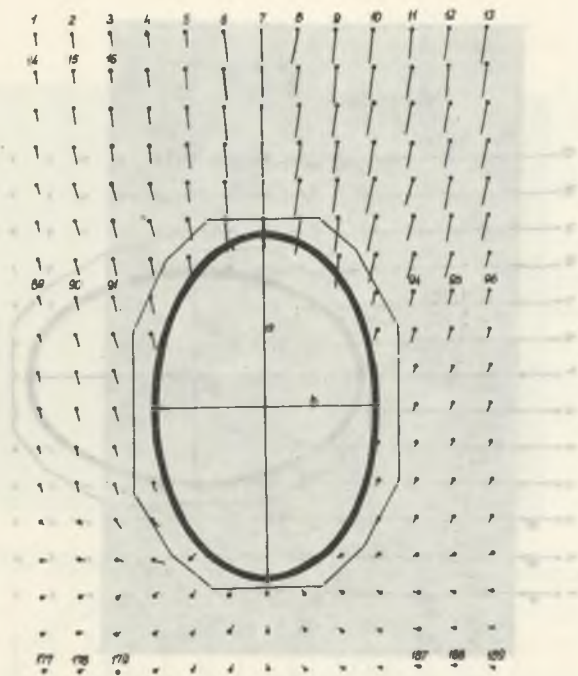


Rys. 40. Obraz tworzących się niewielkich spękań w otoczeniu wyrobiska eliptycznego

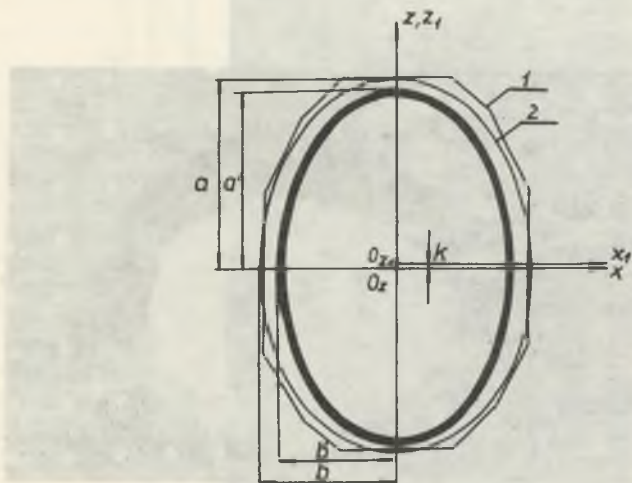
W pierwszym przypadku niewielkie spękania wystąpiły w rejonie górnego i dolnego łuku wyrobiska przy nienaruszonych powierzchniach ociosowych (rys. 40). Można stąd wnioskować, o dużej nośności ociosów w przypadku pionowego działania obciążenia w stosunku do uławicenia.

Kierunek osi tworzącej się w kształcie elipsy strefy odprężonej dla I wariantu jest prostopadły do płaszczyzn zalegania warstw (rys. 41, 42).

Korzystny rozkład naprężeń występuje również w górotworze charakteryzującym się pionowym zaleganiem warstw. Podczas badań nie obserwowano makroskopowo spękań skał po całym obwodzie wyrobiska. W momencie krytycznego obciążenia nastąpiło pionowe obsunięcie się bloku stropowego, co obrazuje załączony (rys. 43).



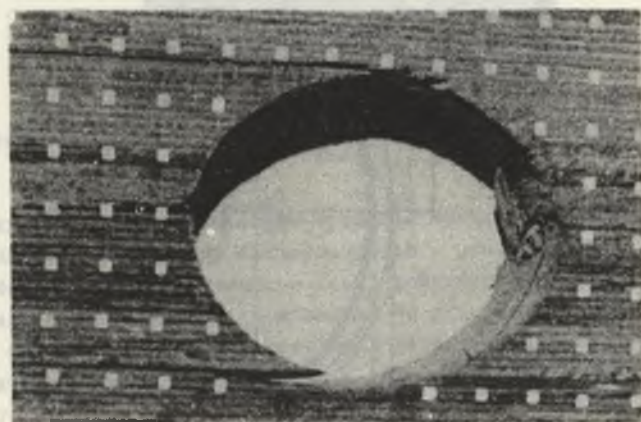
Rys. 41. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z zaznaczonym obrysem strefy odprężonej



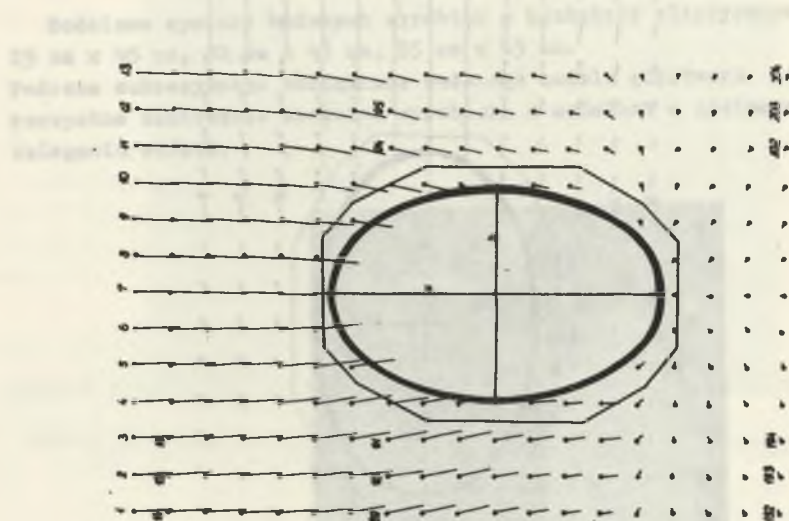
Rys. 42. Kształt i zasięg strefy odprężonej

1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy

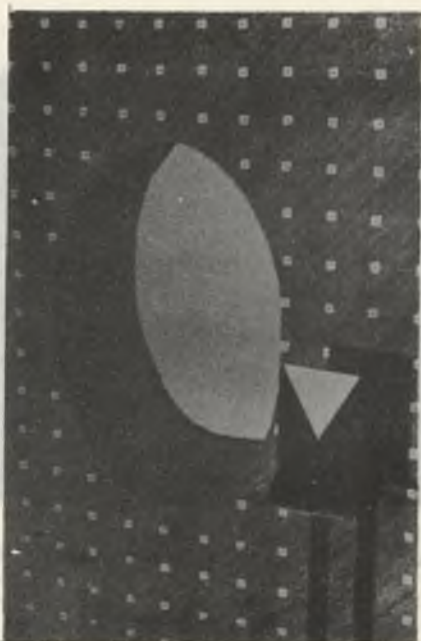
Fig. 43. Charakterystyczne deformacje wyrobiska w górnym otworze o pionowym załęganiu warstw



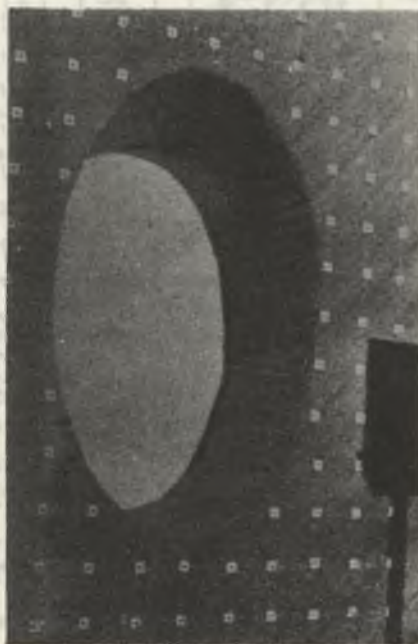
Rys. 43. Charakterystyczne deformacje wyrobiska w górnym otworze o pionowym załęganiu warstw



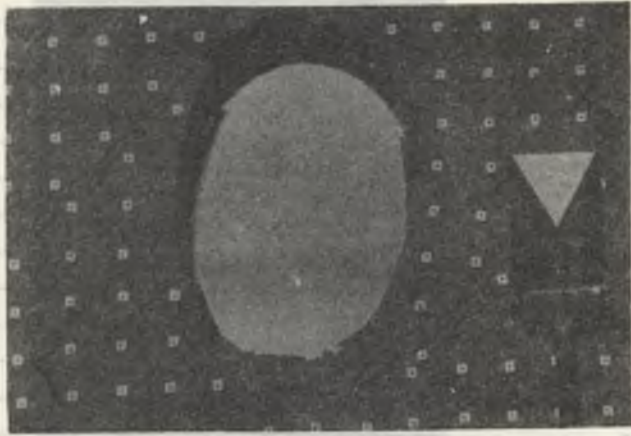
Rys. 44. Pole przesieszczeń punktów pomiarowych z zaznaczonym obrysem strefy odprężonej



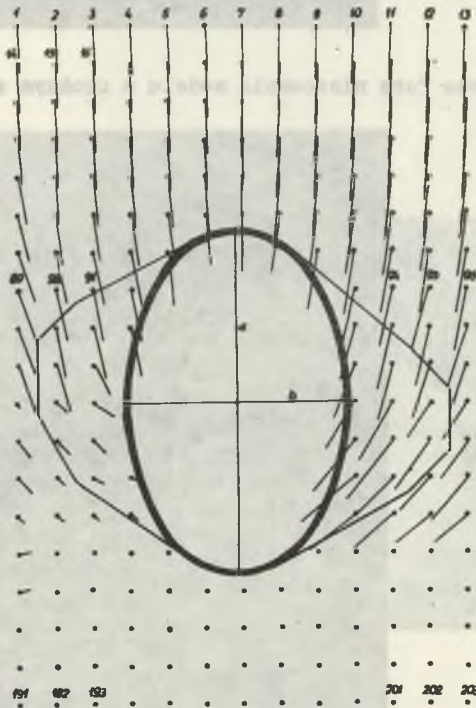
Rys. 45. Początkowa faza niszczenia modelu o ukośnym załęganiu warstw



Rys. 45a. Początkowa faza niszczenia modelu o ukośnym załęganiu warstw



Rys. 46. Końcowa faza zruszenia modelu o ukośnym zaleganiu warstw

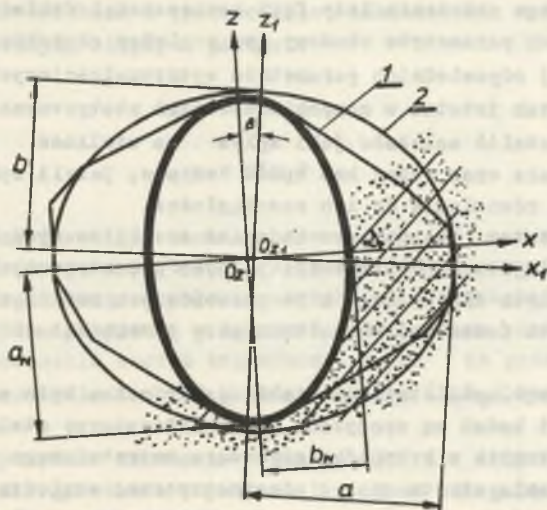


Rys. 47. Pole przemieszczeń punktów pomiarowych z obrysem strefy odprężonej

Deformacja ta jest wynikiem niewystarczających sił tarcia w pionowych płaszczyznach przesunięcia się bloku. Strefy skał rozprężonych dla wyżej opisanego przypadku ustalone na podstawie pomiarów i obserwacji posiadają kształt elipsy o osi dłuższej równoległej do płaszczyzn uławicenia (rys. 43, 44).

Charakterystyczne natomiast deformacje występowały w modelu górotworu o ukośnym załęganiu warstw. Miejscami występowania naprężeń krytycznych w początkowej fazie deformacji były strefy styczności warstw modelu do elipsy wyznaczającej kształt wyrobiska. Strefy te występowały naprzeciw siebie w górnym lewym i dolnym prawym łuku ociosowym (rys. 45, 45a).

Wzrost obciążenia powodował powiększenie stref, aż do całkowitego zniszczenia struktury modelu (rys. 46).



Rys. 48. Kształt i zasięg strefy odprężonej dla górotworu o kącie załęgania warstw $\alpha = 45^\circ$

1 - wyznaczony na podstawie badań, 2 - przybliżony do kształtu elipsy

Utworzona strefa skał rozprężonych ustalona na podstawie pomiarów oraz obserwacji posiada kształt elipsy o kierunku osi dłuższej w przybliżeniu prostopadłym do kierunku uławicenia warstw (rys. 47, 48). Charakterystyczne jej wielkości zestawiono w tabelicy 7.

8. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH
W ASPEKTCIE WPŁYWU CZYNNIKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH
NA PRZEJAWY I WIELKOŚĆ STATYCZNEGO ODDZIAŁYWANIA SKAŁ
W OCOCZENIU WYROBISK KORYTARZOWYCH

Generalnym założeniem niniejszej pracy było określenie kształtu i zasięgu strefy deformacji niesprężystych (trwałych), jaka utworzy się wokół wyrobiska po jego wykonaniu w skałach, dla których przekroczona została głębokość krytyczna.

U podstaw tego założenia leży fakt konieczności dokładnego prognozowania technicznych parametrów obudowy pod względem charakterystyki jej pracy, a także jej odpowiednich parametrów wytrzymałościowych, których znaczenie będzie tak istotne w momencie obciążeń statycznych. Ponadto na podstawie badań ustalić należało jaki wpływ na wielkość tej strefy ma kształt wyrobiska oraz różny kąt upadu warstw, jeżeli wyrobisko lokalizowane będzie równoległe do ich rozciągłości.

Reasumując zatem, zasadniczym zadaniem zrealizowanych badań było określenie najważniejszych, charakterystycznych geometrycznych wymiarów strefy skał zruszonych dla każdego z 54 przebadanych możliwych przypadków wyrobisk o różnych (sześciu) kształtach przy trzech kątach upadu $w-w$ 0° , 45° i 90° .

Pierwszymi ogólnymi stwierdzeniami, jakie można było sformułować w oparciu o wyniki badań są spotykane już w literaturze stwierdzenia o symetrii stref spękanych w przypadku górotworu uwarstwionego przy poziomym i pionowym zaleganiu warstw oraz o niesymetrycznej względem osi wyrobiska strefie skał zdeformowanych w przypadku ich ukośnego zalegania.

Kolejnym spostrzeżeniem zaobserwowanym w trakcie badań jest stwierdzenie, że wielkość powierzchni strefy skał pokruszonych jest ściśle uzależniona od kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska, a w przypadku tych samych kształtów wyrobiska od kąta zalegania warstw. Pominiecie tego stwierdzenia w obliczeniach spodziewanego obciążenia obudowy prowadzić będzie do niedokładności tych obliczeń. Jednocześnie należy podkreślić znaczną różnicę jakościową pomiędzy strefą skał zruszonych zaobserwowaną w czasie badań przy ukośnym zaleganiu warstw górotworu, a dotychczasowymi stwierdzeniami w tym zakresie.

Zgodnie z założeniem pracy dotyczącym lokalizacji wyrobiska w skałach poniżej ich głębokości krytycznej, to jest wtedy, kiedy naprężenia w górotworze będą większe od wytrzymałości skał, można powiedzieć, że w ta-

kich przypadkach głównym czynnikiem wpływającym na geometryczne wymiary strefy będą parametry geometryczne wyrobisk.

W świetle wyników pracy praktycznie oznacza to, że wokół wyrobisk korytarzowych o określonym kształcie i tej samej wielkości wykonywanych w skałach o różnej zwięzłości lecz podobnym zaleganiu warstw w stanie granicznego wyętwienia górotworu - powstaną strefy pokruszone o zbliżonych lub nawet takich samych parametrach geometrycznych.

Cechy więc geometryczne wyrobisk i górotworu dominują nad cechami materiałowymi. Na czoło parametrów opisujących proces tworzenia się stref pokruszonych wysuwają się czynniki naturalno-geologiczne związane z geometrią wyrobisk. Takim bowiem podejściem do zagadnienia opracowania sposobów wyznaczania stref pokruszonych wokół wyrobiska cechuje się dalsza część niniejszej analizy dotycząca kształtu oraz zasięgu ich obrysu.

Krzywe uzyskane doświadczalnie ograniczające strefę skał odprężonych wokół przebadanych wyrobisk z wystarczającą dokładnością można opisać równaniami parametrycznymi elipsy w postaci:

$$\begin{aligned}x_1 &= b \cos t, \\z_1 &= a \sin t.\end{aligned}\tag{31}$$

Współrzędne punktów elipsy zapisane równaniami (31) w zależności od potrzeby ich zorientowania w stosunku do osi (X, Z) przyjętego układu współrzędnych, a założonego w połowie szerokości i wysokości każdego analizowanego wyrobiska, przyjmują w dalszych rozważaniach postać równań wynikających z zastosowania wzorów transformacyjnych na przesunięcie lub równocześnie przesunięcia i obrót układu o osiach (X_1, Z_1) względem układu (X, Z) .

Uwzględniając powyższe założenie równania (31) dla elips uzyskanych z badań modelowych dla górotworu o poziomo i pionowo zalegających warstwach, w zależności od wielkości $K_2 > 0$ lub $K_2 < 0$ określających odległość pomiędzy osiami $(X-X_1)$ zgodnie z rys. (49, 51, 52, 56, 57) przyjmują postać:

$$\begin{aligned}X &= X_1, \\Z &= Z_1 \pm K_2.\end{aligned}\tag{32}$$

Natomiast dla elips uzyskanych z badań górotworu o warstwach ukośnie zalegających współrzędne równań (31) w zależności od wielkości kąta obrotu $\beta > 0$ lub $\beta < 0$ układu (X_1, Z_1) względem układu (X, Z) i przesunięcia jego środka (K_x, K_z) względem środka układu (X, Z) zgodnie z rys. (50, 53, 54, 55, 58) przyjmują postać:

$$\begin{aligned}x &= x_1 \cos \beta \pm z_1 \sin \beta + K_x, \\z &= \pm x_1 \sin \beta + z_1 \cos \beta + K_z.\end{aligned}\quad (33)$$

Zakładając, że zasięg elipsy ograniczają w odciosach linie naturalnego poślizgu tworzących się w tej strefie klinów odłamu, dla kolejno badanych kształtów wyrobisk wyznaczono obszary powierzchni tych stref.

Dla wyrobisk o kształcie prostokątnym oraz kształcie właściwym dla obudowy łukowej i murowej - obszary powierzchni strefy pokruszonej - odprężonej wyznaczono poprzez przeprowadzenia odcinków zgodnie z prostą nachyloną pod kątem $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ do osi (O,X) z punktów leżących w narożach w płaszczyźnie spągu wyrobiska zgodnie z rys. (49 do 54), aż do przecięcia się z elipsą.

Dla wyrobisk o kształtach: kołowym i eliptycznym odcinki o kącie nachylenia $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ łączące punkty elipsy wyprowadzono z punktów styczności pokrywających się z nimi prostych w stosunku do obrysu wyrobiska, co pokazano na rys. (55 do 58).

Tak ustalone obszary stref odprężonych stanowią zarazem schematy obliczeniowe pozwalające wyznaczyć szczegółowe wzory na wielkość powierzchni strefy odprężonej wokół badanych kształtów wyrobisk po uprzednim określeniu następujących równań pomocniczych:

- równań linii poślizgu klinów odłamu,
- parametrów katowych "t" elipsy w punktach przecięcia się z nią linii klinów odłamu,
- współrzędnych punktów przecięcia się linii klinów odłamu z elipsą.

Równanie linii poślizgu klinów odłamu wyznaczono jako równanie prostych $l_1, l_2, l_3, l_4, k_1, k_2$ nachylonych pod kątem $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ do osi OX, przechodzących przez określone punkty wyrobisk.

Równania te zapisano w postaci:

$$Z_{L,K} = m X_{L,K} + n. \quad (34)$$

lub

$$X_{L,K} = \frac{1}{m} (Z_{L,K} + n \pm k), \quad (35)$$

gdzie:

$$m = \pm \operatorname{tg} (45^\circ + \frac{\varphi}{2}),$$

$n = \pm \frac{1}{2} (h - m \cdot l)$ - dla wyrobisk o kształcie prostokątym oraz kształcie właściwym dla obudowy łukowej i murowej,

$n = \pm R \sqrt{1 + m^2}$ - dla wyrobiska kołowego,

$n = \pm \sqrt{a_w^2 + b_w^2 m^2}$ - dla wyrobiska eliptycznego.

Parametry kątowe "t" dla kształtów wyrobiska prostokątnego, właściwego obudowie łukowej i murowej wyznaczono z równań (34), (32) oraz (34), (33). W wyniku rozwiązania wspomnianych równań otrzymano:

$$t = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} U, \quad (36)$$

gdzie:

dla wyrobisk badanych w górotworze o poziomym i pionowym zaleganiu warstw:

$$U_{(2,4)} = \frac{\sqrt{-a \pm a^2 + m^2 b^2 + n - k_x^2}}{mb + n + k_z},$$

dla wyrobisk badanych w górotworze o warstwach ukośnie zalegających:

- dla wyrobiska prostokątnego:

$$U_{(2,4)}^{(x)} = \frac{a(m \sin \beta \pm \cos \beta)}{mx_1 + n - z_1 \pm b \sin \beta \pm bm \cos \beta} + \frac{\sqrt{a^2(m \sin \beta \pm \cos \beta)^2 - (mx_1 + n - z_1)^2 \pm b^2(\sin \beta - m \cos \beta)^2}}{mx_1 + n - z_1 \pm b \sin \beta \pm b \cos \beta}.$$

$U^{(x)}$ - indeksy w nawiasach odpowiadają oznaczeniom na rysunkach odpowiednich kątów,

- dla wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie łukowej i murowej:

$$U_{(2,3)} = \frac{\pm a(m \sin \beta - \cos \beta)}{mx_1 + n - z_1 \pm b \sin \beta \pm bm \cos \beta} \pm \frac{\sqrt{a^2(m \sin \beta - \cos \beta)^2 - (mx_1 + n - z_1)^2 - b^2(m \cos \beta + \sin \beta)^2}}{mx_1 + n - z_1 \pm b \sin \beta \pm bm \cos \beta}.$$

- dla wyrobiska o przekroju kołowym i eliptycznym:

$$U(2,3) = \frac{\pm b(m \sin \beta - \cos \beta)}{mx_1 + n - z_1 - b \sin \beta \pm bm \cos \beta} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{b^2(m \sin \beta - \cos \beta)^2 - (mx_1 + n - z_1)^2 - a^2(m \cos \beta \pm \sin \beta)^2}}{mx_1 + n - z_1 - b \sin \beta \pm bm \cos \beta}$$

Natomiast dla wyrobisk eliptycznego i kołowego (rys. 55, 56) badanych w górotworze o warstwach poziomo i pionowo zalegających parametry "t" wyznaczono z równania (31) i (32).

Ustalony wzór przyjmuje postać:

$$t = \arcsin \frac{z_{2,3} - k_z}{a}. \quad (37)$$

Wzór powyższy jest słuszny również dla wyrobiska kołowego przy założeniu, że $a = R$.

Współrzędne punktów przecięcia się prostych $l_1, l_2, l_3, l_4, k_1, k_2$ z elipsą wyliczono z równań (32) i (33) bądź też, jak w przypadku wyrobiska kołowego i eliptycznego po rozwiązaniu równań (34) z równaniem kanonicznym eliptycznej strefy odprężonej.

Charakterystyczne wielkości niezbędne do wyliczenia powierzchni strefy odprężonej dla badanych wyrobisk według podanych w pracy wzorów, wynikające z rozwiązań równań pomocniczych zestawiono w tablicach 3 do 7. W myśl powyższych ustaleń wzory na wielkości powierzchni strefy odprężonej wokół badanych wyrobisk przyjmują postacie poniższych równań.

Dla wyrobiska prostokątnego badanego w górotworze o warstwach poziomo i pionowo zalegających (rys. 49)

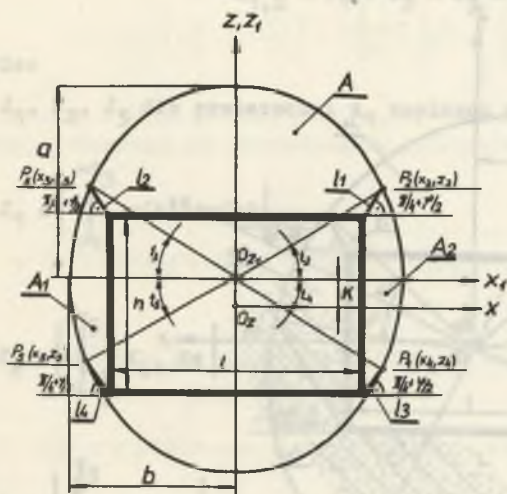
$$A = \pi ab - 1 \left(\frac{h}{2} - k_z \right)^2 J_1, \quad (38)$$

gdzie:

$$J_1 = \int_0^{\frac{h}{2}} x_1(t) dz_1(t) - \left| \frac{1}{m} \int_{z_2 - k_z}^{\frac{h}{2} - k_z} x_{L_1} dz \right| - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} - k_z \right). \quad (39)$$

Po podstawieniu za wyrażenie podcałkowe równania (38) oraz równań wynikających z (31) i (35), jak też uwzględnieniu rozwiązania równania (38), wielkość powierzchni strefy pokruszonej określa wzór:

$$A = \frac{ab}{2} \left| \left[1 - 2 t_2 - \sin 2 t_2 \right] \right| + \left| \frac{1}{m} \left[\left(\frac{h}{2} - k_z \right)^2 - (Z_2 - k_z)^2 \right] + \left(\frac{h}{2} - Z_2 \right) \left[1 - \frac{1}{m} (2 k_z + 1) \right] \right|. \quad (40)$$



Rys. 49. Symetryczne położenie strefy odprężonej względem pionowej osi wyrobiska

Powierzchnie boczne strefy odprężonej A_1 i A_2 z uwagi na ich symetryczne odwzorowanie względem osi OZ (rys. 49) wyraża się wzorem:

$$A_1 = A_2 = J_1 + J_2, \quad (41)$$

gdzie:

$$J_2 = \left| \int_0^{t_2} X_1(t) dz_1(t) \right| +$$

$$+ \left| \frac{1}{m} \int_{z_4 - k_z}^{-\frac{h}{2} - k_z} X_{I,3} dz \right| -$$

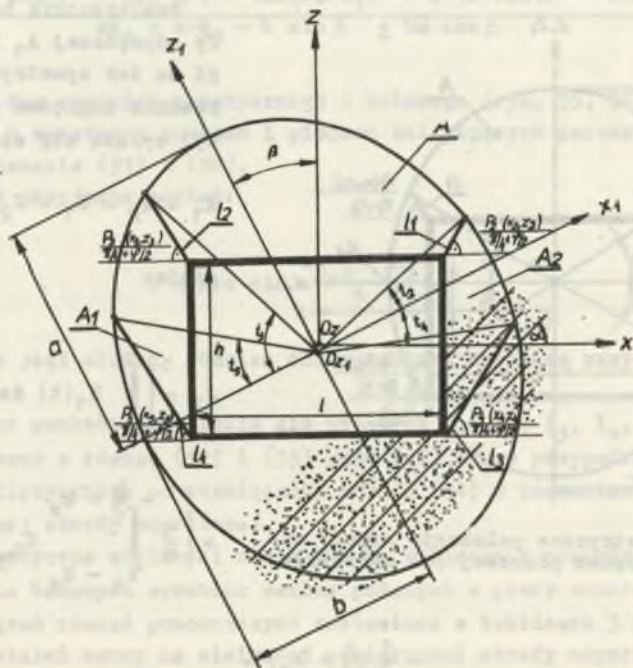
$$- \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + k_z \right). \quad (42)$$

Rozwiązując równania (39), (42) po uwzględnieniu zależności (31) i (35), wzór (41) przyjmie postać:

$$A_1 = A_2 = \frac{ab}{2} \left(t_2 + \frac{\sin 2 t_2}{2} + \left| t_4 + \frac{\sin 2 t_4}{2} \right| \right) - \frac{1}{2} \cdot h + \left| \frac{1}{2} m \left[\left(\frac{h}{2} + k_z \right)^2 - (Z_4 - k_z)^2 \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + Z_4 \right) + \frac{1}{m} \left(k - \frac{h}{2} \right) \left(\frac{h}{2} + Z_4 \right) \right| - \left| \frac{1}{2} m \left[\left(\frac{h}{2} - k_z \right)^2 - (Z_2 - k_z)^2 \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} - Z_2 \right) - \frac{1}{m} \left(k_z + \frac{h}{2} \right) \left(\frac{h}{2} - Z_2 \right) \right|. \quad (43)$$

Dla wyrobiska prostokątnego badanego w górotworze o warstwach ukośnie zalegających (rys. 50).

$$A = \left| \int_{t_2}^{\pi-t_3} Z(t) dx(t) \right| - \left| \int_{\frac{1}{2}}^{x_2} Z_{1,1} dx \right| - \left| \int_{\frac{1}{2}}^{x_3} Z_{1,2} dx \right| - 1 \cdot \frac{h}{2}. \quad (44)$$



Rys. 50. Asymetryczne położenie strefy odprężonej względem osi symetrii wyrobiska

Wykonując operację całkowania we wzorze (44) po podstawieniu za wyrażenie podcałkowe równań ustalonych na podstawie (33) i (34) otrzymuje się

$$\begin{aligned}
 A = & \left| -\frac{a^2+b^2}{8} \sin 2\beta (\cos 2t_3 - \cos 2t_2) + ab \left[\frac{1}{2} (\pi - t_3 - t_2) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \left(\frac{1}{4} - \frac{\cos^2 \beta}{2} \right) (\sin 2t_3 + \sin 2t_2) \right] + \right. \\
 & + k_z \left[b \cos \beta (\cos t_3 + \cos t_2) + a \sin \beta (\sin t_3 - \sin t_2) \right] - \\
 & \left. - \left| \frac{m}{2} \left(x_2^2 - \frac{1}{4} \right) + \left(\frac{h}{2} - m \frac{1}{2} \right) \left(x_2 - \frac{1}{2} \right) \right| - \right. \\
 & \left. - \left| -\frac{m}{2} \left(x_3^2 - \frac{1}{4} \right) + \left(\frac{h}{2} - m \frac{1}{2} \right) \left(x_3 + \frac{1}{2} \right) \right| - 1 \frac{h}{2} \right|. \quad (45)
 \end{aligned}$$

Dla obliczenia bocznych powierzchni A_1 , A_2 strefy odprężonej utworzonej wokół wyrobiska prostokątnego (zgodnie z rys. 50) ustalono następujący wzór:

$$A_{1,2} = J_1 + J_2 - J_3 - h \cdot \frac{1}{2}, \quad (46)$$

gdzie:

J_1 , J_2 , J_3 dla powierzchni A_1 zapisano w postaci równań:

$$J_1 = \left| \int_{-t_5}^{-t_3} x(t) dz(t) \right|,$$

$$J_2 = \left| \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{z_5}{2}} X_{14} dz \right|, \quad (47)$$

$$J_3 = \left| \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{z_3}{2}} X_{12} dz \right|.$$

Przeprowadzając całkowania w równaniach (47) po podstawianiu za wyrażenia podcałkowe odpowiednio wynikające z (33) i (34) otrzymano:

$$\begin{aligned} A_1 = & \left| -\frac{a^2+b^2}{8} \sin 2\beta (\cos(2t_3) - \cos 2t_5) - \frac{ab}{2} \sin^2 \beta (-\sin 2t_3 + \sin 2t_5) + \right. \\ & + \frac{ab}{2} (-t_3 + t_5) + \frac{ab}{4} (\sin 2t_5 - \sin 2t_3) + \\ & + \left| -\frac{1}{2m} (z_5^2 - \frac{h^2}{4}), - (\frac{h}{2m} + \frac{1}{2})(z_5 + \frac{h}{2}) \right| - \\ & - \left| -\frac{1}{2m} (z_3^2 - \frac{h^2}{4}) + (\frac{h}{2m} - \frac{1}{2})(z_3 - \frac{h}{2}) - h \frac{1}{2} \right|. \end{aligned} \quad (48)$$

dla powierzchni A_2 :

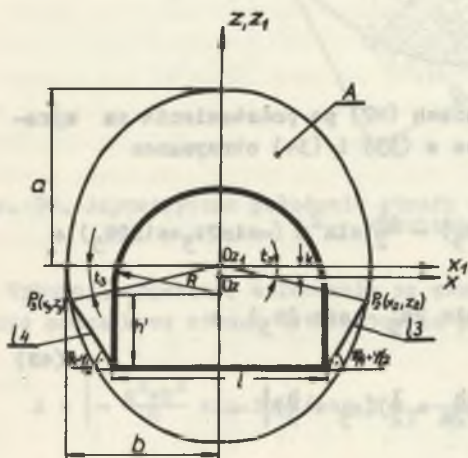
$$J_1 = \left| \int_{t_4}^{t_2} x_1(t) dz(t) \right|,$$

$$J_2 = \left| \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{z_4}{2}} X_{13} dz \right|, \quad (49)$$

$$J_3 = \left| \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{z_2}{2}} X_{11} dz \right|.$$

Wykonując całkowania we wzorach (39) analogicznie jak poprzednio otrzymano:

$$A_2 = \left| \frac{a^2+b^2}{8} \sin 2\beta \cos(2t_2 - \cos 2t_4) - \frac{ab \sin^2 \beta}{2} (\sin 2t_2 + \sin 2t_4) + \right. \\ \left. + \frac{ab}{2} (t_2 + t_4) + \frac{ab}{4} (\sin 2t_5 - \sin 2t_3) \right| + \left| \frac{1}{2m} (z_4^2 - \frac{h^2}{4}) + \right. \\ \left. + (\frac{h}{2m} + \frac{1}{2})(z_4 + \frac{h}{2}) \right| - \left| \frac{1}{2m} (z_2^2 - \frac{h^2}{4}) - (\frac{h}{2m} - \frac{1}{2})(z_2 - \frac{h}{2}) \right| - h \frac{1}{2}. \quad (50)$$



Rys. 51. Położenie strefy odprężonej symetrycznie względem pionowej osi wyrobiska

Dla wyrobisk właściwych obudowie murowej i łukowej badanych w górotworze o warstwach poziomo i pionowo zalegających (rys. 51, 52) wzór na powierzchni strefy odprężonej przyjmuje postać:

$$A = 2 \left[\left| \int_{t_3}^{\frac{\pi}{2}} X_1(t) dz_1(t) \right| + \left| \int_{-\frac{h}{2}}^{t_2} X_{13} dz \right| \right] - P_w, \quad (51)$$

gdzie:

P_w - pole powierzchni wyrobiska.

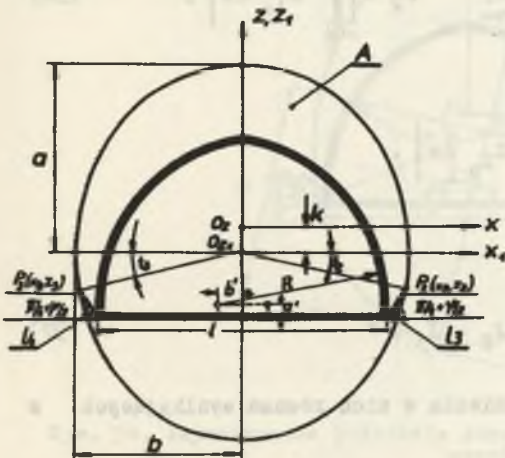
Rozwiązując równanie (51) po uwzględnieniu równań wynikających z (31) i (34) oraz (32) i (36) otrzymano:

$$A = \frac{ab}{2} \left[1 - 2t_3 - \sin 2t_3 \right] + \quad (52)$$

$$+ 2 \left| \frac{1}{2m} \left[z_2^2 + \left(\frac{h}{4} \right)^2 \right] + \left(\frac{h}{2m} + \frac{1}{2} \right) \left(z_2 + \frac{h}{2} \right) \right| - P_w .$$

Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunkach, pole powierzchni dla wyrobisk o kształcie łukowym wylicza się ze wzoru:

$$P_w = 2 \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sqrt{R^2 - \left[z + \left(\frac{h}{2} - a' \right)^2 \right]} - b' dz . \quad (53)$$



Rys. 52. Wyraźne przesunięcie środka symetrii strefy odprężonej po pionowej osi symetrii wyrobiska

Natomiast dla wyrobisk o kształcie właściwym dla obudowy murowej:

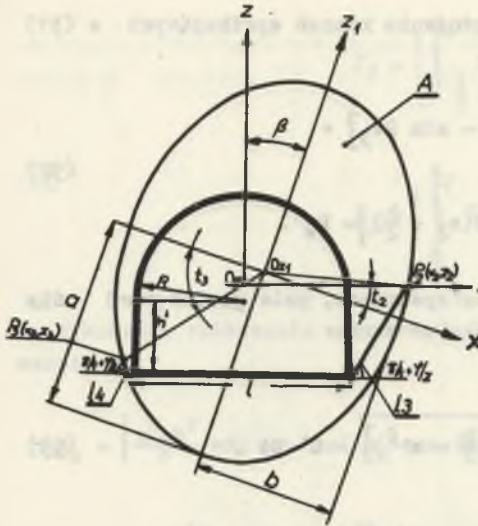
$$P_w = \frac{\pi R^2}{2} + (h - R) l . \quad (54)$$

W górotworze o warstwach ukośnie zalegających (rys. 53, 54) powierzchnie strefy odprężonej A określono wzorem:

$$A = \left| \int_{t_2}^{t_3} X_1(t) dz_1(t) \right| +$$

$$+ \left| \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} X_{13} dz \right| + \quad (55)$$

$$+ \left| \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} X_{14} dz \right| - P_w .$$



Rys. 53. Asymetryczne położenie strefy odprężonej względem osi symetrii wyrobiska

Stosując oznaczenia:

$$J_1 = \left| \int_{t_2}^{\frac{\pi}{2} + t_3} X_1(t) dz(t) \right| =$$

$$= \left| \int_{t_2}^{\frac{\pi}{2}} x dz \right| + \left| \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + t_3} x dz \right| +$$

$$+ \left| \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} x dz \right| + \left| \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + t_3} x dz \right|,$$

$$J_2 = \left| \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{z}{2}} X_{13} dz \right|, \quad (56)$$

$$J_3 = \left| \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{z}{2}} X_{14} dz \right|.$$

Wzór przyjmie postać:

$$A = J_1 + J_2 + J_3. \quad (57)$$

Całkując równania (56) po uwzględnieniu w nich równań wynikających z (33) i (34) otrzymuje się:

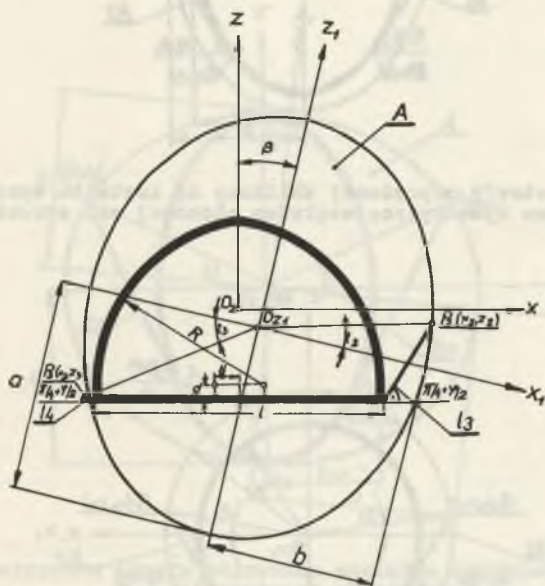
$$J_1 = \left| \frac{ab}{2} \left(\frac{\pi}{2} - t_2 \right) - \frac{ab}{4} \cos 2\beta \cdot \sin 2t_2 + \frac{a^2 + b^2}{8} \sin^2 \beta (1 + \cos 2t_2) + \right.$$

$$\left. + k_x \cdot a \cos \beta (1 - \sin t_2) + k_x \cdot b \cdot \sin \beta \cos t_2 \right| +$$

$$+ \left| \frac{ab}{2} \beta - \frac{ab}{4} \cos 2\beta \sin 2\beta + \frac{a^2 + b^2}{8} \sin 2\beta (\cos 2\beta - 1) + \right.$$

$$\left. + k_x \cdot a \cos \beta (\sin \beta - 1) + k_x \cdot b \sin \beta \cos \beta \right| + \left| \frac{ab}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{ab}{4} \cos 2\beta \sin 2\beta - \frac{a^2+b^2}{8} \sin 2\beta (1 + \cos 2\beta) - \\
 & - k_x \cdot a \cdot \cos \beta \sin \beta + k_x \cdot b \sin \beta (1 - \cos \beta) \left| + \frac{ab}{2} t_3 + \frac{ab}{4} \cos 2\beta \sin 2t_3 - \right. \\
 & - \frac{a^2+b^2}{8} \sin 2\beta (\cos 2t_3 - 1) - k_x a \cos \beta (\sin t_3 + 1) + \\
 & \left. + k_x \cdot b \sin \beta (\cos t_3 - 1) \right|. \quad (58)
 \end{aligned}$$

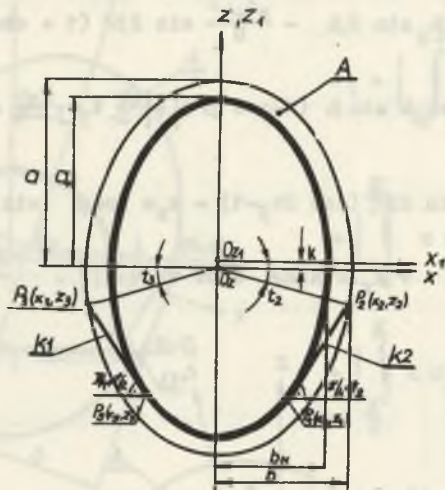


Rys. 54. Asymetryczne położenie strefy odrpęzonej względem osi symetrii wyrobiska

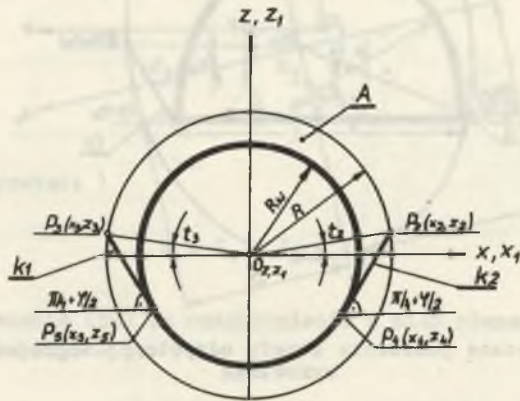
$$J_2 = \left| \frac{1}{2m} (z_2^2 + \frac{h^2}{4}) + (\frac{h}{2m} + \frac{1}{2})(z_2 + \frac{h}{2}) \right| ,$$

$$J_3 = \left| -\frac{1}{2m} (z_3^2 + \frac{h^2}{4}) - (\frac{h}{2m} + \frac{1}{2})(z_3 + \frac{h}{2}) \right| .$$

Dla wyrobisk eliptycznego i kołowego badanych w górotworze o poziomym i pionowym zaleganiu warstw (rys. 55, 56) wzór na pole powierzchni A ma postać:



Rys. 55. Kształt strefy odprężonej zbliżony do kształtu wyrobiska. Strefa odprężona symetryczna względem pionowej osi wyrobiska



Rys. 56. Kołowo-symetryczny kształt strefy odprężonej względem wyrobiska

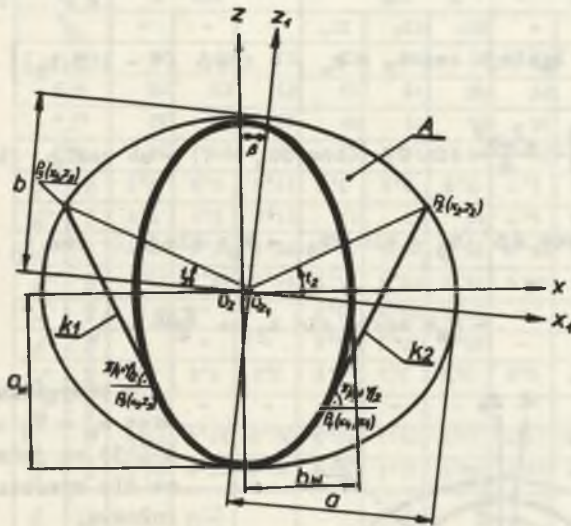
$$A = 2 \left[\left| \int_{t_2}^{t_1} X_{k_1}(t) dz_1(t) \right| + \left| \int_{x_4}^{x_2} X_{k_1} dz \right| \right] - J_w \quad (59)$$

Wykonując całkowanie we wzorze (59) po podstawieniu za wyrażenia podcałkowe równań wynikających z (31) i (34) dostaje się:

$$A = 2 \left[\frac{ab}{2} \left| \frac{\pi}{2} - t_2 - \frac{\sin 2t_2}{2} \right| + \right. \\ \left. + \left| \frac{1}{2m} (z_2^2 - z_4^2) + \frac{\sqrt{a_w^2 + b_w^2 m^2}}{m} (z_2 - z_4) \right| \right] - J_w, \quad (60)$$

gdzie:

$$J_w = a_w b_w \left(\pi - \arccos \frac{|z_4|}{a_w} \right) + |z_4 \cdot x_4|. \quad (61)$$



Rys. 57. Asymetryczna strefa odprężona względem wyrobiska o kształcie spłaszczonej elipsy

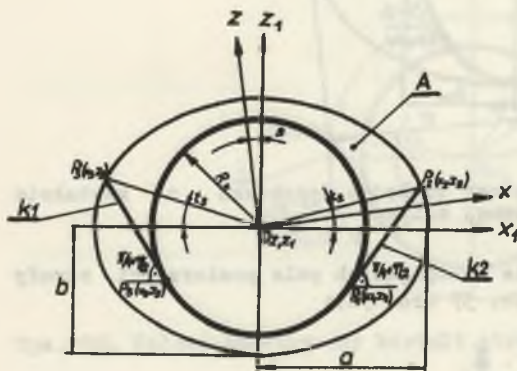
W górotworze o warstwach ukośnie zalegających pole powierzchni strefy odprężonej A wyraża się wzorem (rys. 57 oraz 58):

$$A = \left| \int_{z_4}^{z_2} X_{k_1} dz \right| + \left| \int_{t_2}^{\frac{\pi}{2}} x_1(t) dz_1(t) \right| + \quad (62)$$

$$+ \frac{a_1 b}{4} + \left| \int_x^{\frac{\pi+t_3}{x}} X_{k_1}(t) dz_1(t) \right| + \left| \int_{z_3}^{z_5} X_{k_2} dz \right| - J_w.$$

Analogicznie jak poprzednio wykonując całkowanie we wzorze (62) i po uwzględnieniu równań (31) i (34) wzór (62) przyjmie postać:

$$\begin{aligned}
 A = & \left| \frac{1}{2m} (z_2^2 - z_4^2) + \frac{\sqrt{a_w^2 + b_w^2 m^2}}{m} (z_2 - z_4) \right| + \left| -\frac{1}{2m} (z_5^2 - z_3^2) - \right. \\
 & - \frac{\sqrt{a_w^2 + b_w^2 m^2}}{m} (z_5 - z_3) \left. \right| + \left| -\frac{a^2 + b^2}{8} \sin 2\beta (1 - \cos 2t_2) + \right. \\
 & + ab \cos^2 \beta \left(\frac{\pi}{2} - t_2 \right) - ab \cos 2\beta \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t_2}{2} + \frac{\sin 2t_2}{2} \right) + \\
 & + k_x \sin \beta \cos t_2 + k_x \cdot b \cos \beta (1 - \sin t_2) \left. \right| + \quad (63) \\
 & + \left| -\frac{a^2 + b^2}{8} \sin 2\beta (\cos 2t_3 - 1) + ab \cos^2 \beta (t_3) - \right. \\
 & - \frac{ab}{2} \cos 2\beta (t_3 - \sin 2t_3) - k_x a \sin \beta (-\cos t_3 + 1) - \\
 & \left. - k_x b \cos \beta \sin t_3 \right| + \frac{1}{4} ab - J_w .
 \end{aligned}$$



Rys. 58. Kształt strefy odprężonej w postaci spłaszczonej elipsy po osi pionowej

nowi wielkość statycznego obciążenia obudowy, która zostanie wykonana w wyrobisku w celu jego zabezpieczenia.

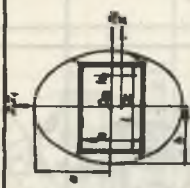

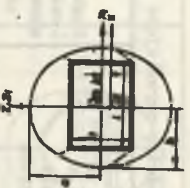
Oczywiście obszar strefy pokruszonej opisanej wzorami w warunkach naturalnych wytworzy się wokół wyrobisk po dłuższym okresie istnienia wyrobiska, jak również przy takiej koncentracji naprężeń, która w efekcie pro-

W przypadku, jeśli $a=b=R$ oraz $a_w = b_w = R_w$ wzory (60) i (63) są jednocześnie słuszne dla wyrobiska o przekroju kołowym.

Przedstawione zależności matematyczne pozwalają w sposób praktyczny określać wielkość powierzchni stref odprężonych stosownie do kształtu i wielkości przekroju wyrobiska oraz zalegania warstw górotworu.

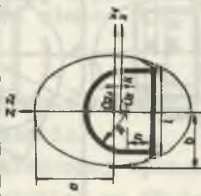

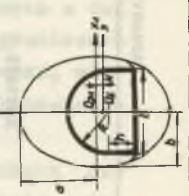
Ciężar skał zawartych w tej strefie, w stanie granicznego wyłężenia górotworu, sta-

Parametry określające kształt i wielkość powierzchni strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska prostokątnego

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw wstęgowych α, β	Wymiary wyrobiska w modelu cm		Parametry obliczeniowe wyznaczone z badań														Obszary powierzchni strefy odprężonej dla modelu obliczone wg wzorów [cm ²]						Obszary powierzchni strefy odprężonej dla rzeczywistych wielkości wyrobiska [m ²]				
		l	h	o	b	k _x	k _y	z ₁	z ₂	z ₃	z ₄	z ₅	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	β	A	A ₁	A ₂	A	A ₁	A ₂				
	0°	25 (2,5)	23,7	30,3	17,5	2,3	2,3	1	1	13,2	13,2	7,5	28	28	28	28	28	28	299	100	97	40	100	97	40	2,9	0,9	0,9
		35 (3,5)	26,2	30,5	22,4	5,6	1	1	16,3	16,3	6,5	7,5	23	23	23	23	23	23	289	602	100	100	100	100	100	6	1	1
		45 (4,5)	39,5	30,5	3,2	1	1	1	25,4	25,4	11,6	11,6	29	29	29	29	29	29	29	1086	158	158	158	158	158	10,8	1,6	1,6
	45°	25 (2,5)	30,9	18,3	27,1	3,3	2,9	13,8	20,3	22,8	17,9	3,4	29	13	60	19	30	220	366	152	152	130	191	149	169	3,7	1,5	1,3
		35 (3,5)	32,6	27,1	3,3	3,3	20,3	26,1	22,8	17,9	15	14	32	14	62	18	250	250	280	644	227	227	169	227	169	11,4	2,3	1,7
		45 (4,5)	46,1	35,3	3,3	3,3	26,1	31,1	22,8	17,9	15	14	32	15	64	27	250	250	280	1140	88	88	274	88	88	2,7	0,8	0,8
	90°	25 (2,5)	24,5	17,5	2,8	1	1	16,9	16,9	6,7	6,7	23	30	30	27	27	27	280	585	105	105	105	105	105	5,8	1	1	
		35 (3,5)	25,9	22,3	3,7	1	1	16,6	16,6	6,3	6,3	28	30	30	26	26	26	280	1058	152	152	152	152	152	10,5	1,5	1,5	
		45 (4,5)	39,1	30,3	3,2	1	1	22,5	22,5	11,7	11,7	28	28	28	26	26	26	28	280	1058	152	152	152	152	152	10,5	1,5	1,5

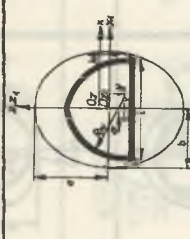
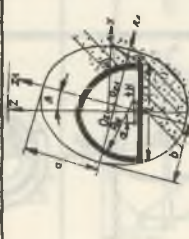
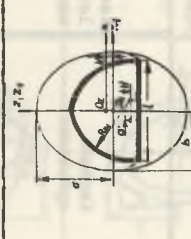
Tablica 4

Parametry określające kształt i wielkość powierzchni strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska o kształcie sklepieniowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska w modelu cm (i rzeczywistej wysokości m)		Parametry obliczeniowe wyznaczone z badań								Powierzchnie strefy odprężonej dla modelu obliczeniowego w warstwach $[cm^2]$		Powierzchnie strefy odprężonej dla rzeczywistych wielkości wyrobiska $[m^2]$				
		szer.	wys.	a	b	k_x cm	k_y cm	z_1 cm	z_2 cm	z_3 cm	t_1 cm	t_2 cm	t_3 cm		β°	φ°	A	57
	0°	30 (3,0)	25 (2,5)	24,5	21	-	1,6	3,7	3,7	3,7	13	13	13	-	500	-	5	
		40 (4,0)	30 (3,0)	26,6	23,5	-	1,7	4	4	4	15	15	15	-	690	-	6,9	
		50 (5,0)	35 (3,5)	31	28,9	-	1,7	6,2	6,2	6,2	17	17	17	-	1000	-	10	
	45°	30 (3,0)	25 (2,5)	26,5	19,4	2	1,6	0,6	10,8	10,8	8	35	18	-	580	-	5,8	
		40 (4,0)	30 (3,0)	30,8	27,2	2,1	1,7	3,5	3,5	10	6	32	18	-	760	-	7,6	
		50 (5,0)	35 (3,5)	36	32,5	2,4	1,9	5,3	5,3	9	5	29	19	-	1080	-	10,8	
	90°	30 (3,0)	25 (2,5)	23	20,5	-	1,4	3,3	3,3	3,3	12	12	-	470	-	4,7		
		40 (4,0)	30 (3,0)	25,7	22,4	-	1,2	3,5	3,5	3,5	14	14	-	650	-	6,5		
		50 (5,0)	35 (3,5)	29	27,4	-	1,8	6,8	6,8	6,8	18	18	-	950	-	9,5		

Tablica 5

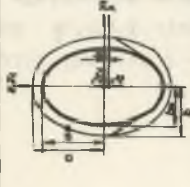

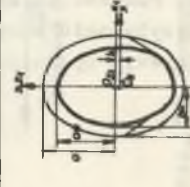
Parametry określające kształt i wielkość powierzchni strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska o kształcie łukowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α_0°	Wymiary wyrobiska w modelu cm (i rzeczywistej wistkości [m])		Parametry obliczeniowe wyznaczone z badań										Powierzchnie strefy odprężonej dla modelu obliczone wg wzorów: [cm ²]		Powierzchnie strefy odprężonej dla rzeczywistych wielkości wyrobiska [m ²]	
		szereż.	wys.	a	b	k _x	k _z	z ₂	z ₃	t ₂ ⁰	t ₃ ⁰	β°	φ°	A	A		
	0°	30 (3,0)	20 (2,0)	19,8	18	-	3,3	5,8	5,8	7	7	-	0°	43	48	A	
		40 (4,0)	25 (2,5)	26,1	22,9	-	3,8	7,9	7,9	9	9	-	26°	320	-	3,2	
		50 (5,0)	30 (3,0)	31,3	27,3	-	4,1	9	9	9	11	11	-	-	480	-	4,8
	45°	30 (3,0)	20 (2,0)	22,8	18,5	17	2,6	2,7	8,3	8	27	12	28°	-	120	4,3	
		40 (4,0)	25 (2,5)	29	23,3	2,8	4,8	11,2	11,2	12	29	14	14	28°	-	670	6,7
		50 (5,0)	30 (3,0)	34,6	29,8	3,2	12,6	12,6	12,6	14	32	17	17	28°	-	101	10,1
	90°	30 (3,0)	20 (2,0)	19,1	17,6	-	3	5	5	6	6	-	-	270	-	2,7	
		40 (4,0)	25 (2,5)	25,3	22,5	-	4	7	7	8	8	-	28°	430	-	4,3	
		50 (5,0)	30 (3,0)	29,3	26,4	-	3,9	7,3	7,3	8	8	-	-	720	-	7,2	

Parametry określające kształt i wielkość strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska kołowego

Kształt wyrobiska	Naochylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska w modelu		Parametry obliczeniowe wyznaczone z badań												Powierzchnie strefy odprężonej dla mode- lu obliczone [cm ²]		Powierzchnia strefy odprężonej dla rzeczywistych wielkości wyrobiska [m ²]											
		szer. 2Rw	wys. 2Rw	R	a	b	k _x	k _y	k _z	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂	y ₃	z ₁	z ₂		z ₃	t ₁ ⁰	t ₂ ⁰	t ₃ ⁰	φ ⁰						
				cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm		cm					cm	cm	cm			
	0°	30 (3,0)	30 (3,0)	19,7	-	-	-	-	12,8	12,8	12,8	3,3	3,3	3,3	7,5	7,5	7,5	10,3	10,3	10,3	10	10	10	-	60	63	A	2,8	
		35 (3,5)	35 (3,5)	22,3	-	-	-	-	14,8	14,8	14,8	2,7	2,7	2,7	9,3	9,3	9,3	10,3	10,3	10,3	28	28	28	-	280	-	A		3,6
		40 (4,0)	40 (4,0)	24,8	-	-	-	-	17,2	17,2	17,2	1,9	1,9	1,9	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	5	5	5	-	540	-	A		5,4
	45°	30 (3,0)	30 (3,0)	-	22,9	17,5	-	-	12,8	12,8	12,8	5,3	6,5	7,5	7,5	7,5	10,3	10,3	10,3	14	14	14	10	-	-	320	A	3,2	
		35 (3,5)	35 (3,5)	-	26	20,3	-	-	14,8	14,8	14,8	7,5	8,4	9,3	9,3	9,3	10,3	10,3	10,3	26	26	26	28	-	-	400	A		4,0
		40 (4,0)	40 (4,0)	-	31,2	25,5	-	-	17,2	17,2	17,2	9,8	10,6	10,6	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	32	32	32	12	-	-	620		A
	90°	30 (3,0)	30 (3,0)	18,3	-	-	-	-	12,8	12,8	12,8	1,5	1,5	1,5	7,5	7,5	7,5	10,3	10,3	10,3	5	5	5	-	260	-	A	2,6	
		35 (3,5)	35 (3,5)	20,9	-	-	-	-	14,8	14,8	14,8	1,2	1,2	1,2	9,3	9,3	9,3	10,3	10,3	10,3	4	4	4	-	340	-	A		3,4
		40 (4,0)	40 (4,0)	23,5	-	-	-	-	17,2	17,2	17,2	1	1	1	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	3	3	3	-	520	-	A		5,2

Parametry określające kształt i wielkość strefy odprężonej w otoczeniu wyrobiska eliptycznego

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska w modelu [cm]		Parametry obliczeniowe wyznaczone z badań												Powierzchnie strefy odprężonej dla modelu		Powierzchnie strefy odprężonej dla rzeczywistych wielkości wyrobiska [m ²]			
		szer.	wys.	a	b	k _x	k _z	x ₄	x ₅	z ₂	z ₃	z ₄	z ₅	t ₂ ^o	t ₃ ^o	β°	ρ°		A		
																			cm	cm	cm
	0°	25 (2,5)	25 (2,5)	24,3	15,2	-	0,5	9,8	9,8	4,5	4,5	14,5	14,5	15	15	-	-	190	-	1,9	
		30 (3,0)	45 (4,5)	25,1	18,3	-	0,7	10,9	10,9	5,2	5,2	15,9	15,9	17	17	-	28°	260	-	2,6	
		35 (3,5)	45 (4,5)	27,3	20,8	-	1	13	13	7,3	7,3	17	17	22	22	-	-	460	-	4,6	
	45°	25 (2,5)		25,8	17,9	0,6	0,6	9,8	9,8	5,8	5,2	14,5	14,5	25	12	5	-	-	2,4	2,4	
		30 (3,0)	45 (4,5)	27,5	21,6	0,8	0,5	10,9	10,8	9,9	9,4	16,2	16,2	29	15	5	28°	-	-	3,7	3,7
		35 (3,5)		31,2	25,8	0,9	0,5	13	13	11,2	11,8	17,6	17,6	32	18	7	-	-	-	6,1	6,1
	90°	25 (2,5)		25	15,9	-	-	9,8	9,8	6	7,9	14,5	14,5	24	24	-	-	220	-	2,2	
		30 (3,0)		26,5	19,6	-	0,9	10,9	10,9	6	6	16,2	16,2	19	19	-	-	300	-	3,0	
		35 (3,5)		28,4	21,7	-	1,1	13	13	8,2	8,2	17,6	17,6	25	25	-	-	520	-	5,2	

wadzi do kruszenia górotworu. Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, że proces kruszenia skał przebiega przy stosunkowo niewielkim wzroście obciążenia górotworu. Tak więc błędnym byłoby przypuszczenie, że dla mniejszego obciążenia tworzy się wokół wyrobiska strefa pokruszonych skał o mniejszych rozmiarach.

W oparciu o uzyskane wyniki wysuwa się kolejną tezę, że: w górotworze uwarstwionym, zwięzłym i jednorodnym o określonym zaleganiu warstw, wokół wyrobisk korytarzowych o właściwym im kształcie i wielkości przekroju poprzecznego - proces kruszenia skał zapoczątkowany zostaje w stanie granicznego wyłężenia górotworu, przy odpowiadającej mu koncentracji naprężeń i obejmuje obszar o określonym zasięgu w głąb calizny. Pokruszone bloki skalne pod wpływem naturalnego ciężenia przemieszczają się do wyrobiska.

W celu uproszczenia operacji matematycznych i zmniejszenia pracochłonności obliczeń podczas posługiwania się wyprowadzonymi zależnościami sporządzono nomogramy pokazane na rys. 59 do 63.

Nomogramy te zbudowano w oparciu o krzywe opisane równaniem:

$$\varphi(A) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0 \quad (64)$$

oraz proste o równaniach:

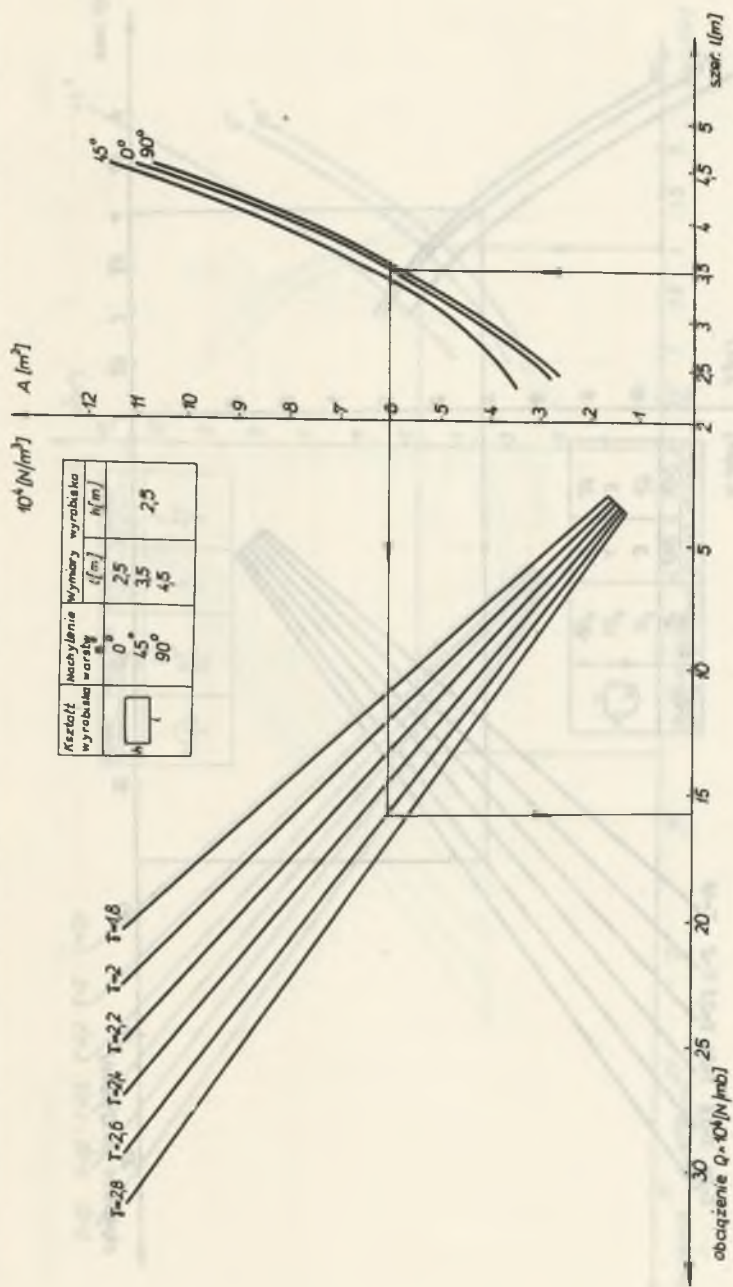
$$Q = f[\varphi(A), \gamma] \quad (65)$$

gdzie:

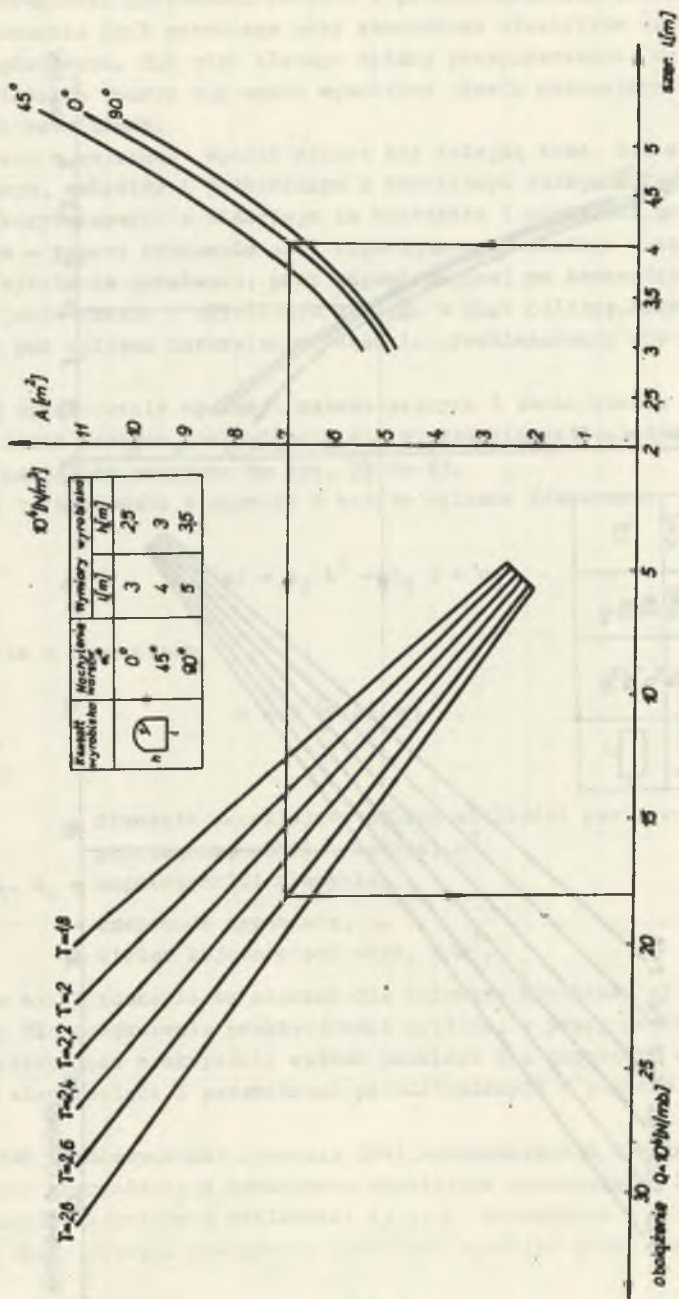
- A - równanie określające zmianę wielkości powierzchni strefy pokruszonej wokół wyrobisk, m^2
- a_2, a_1, a_0 - współczynniki równania,
- l - szerokość wyrobiska, m,
- γ - ciężar objętościowy skał, N/m^3 .

Podane wyżej równania są słuszne dla warunków wyrobisk zbliżonych do badanych. Dla zwiększenia praktyczności wyników, w pracy przebadano przypadki wyczerpujące praktycznie całość problemu dla górotworu o często spotykanych własnościach i parametrach przedstawionych w punkcie 7.1.2 pracy.

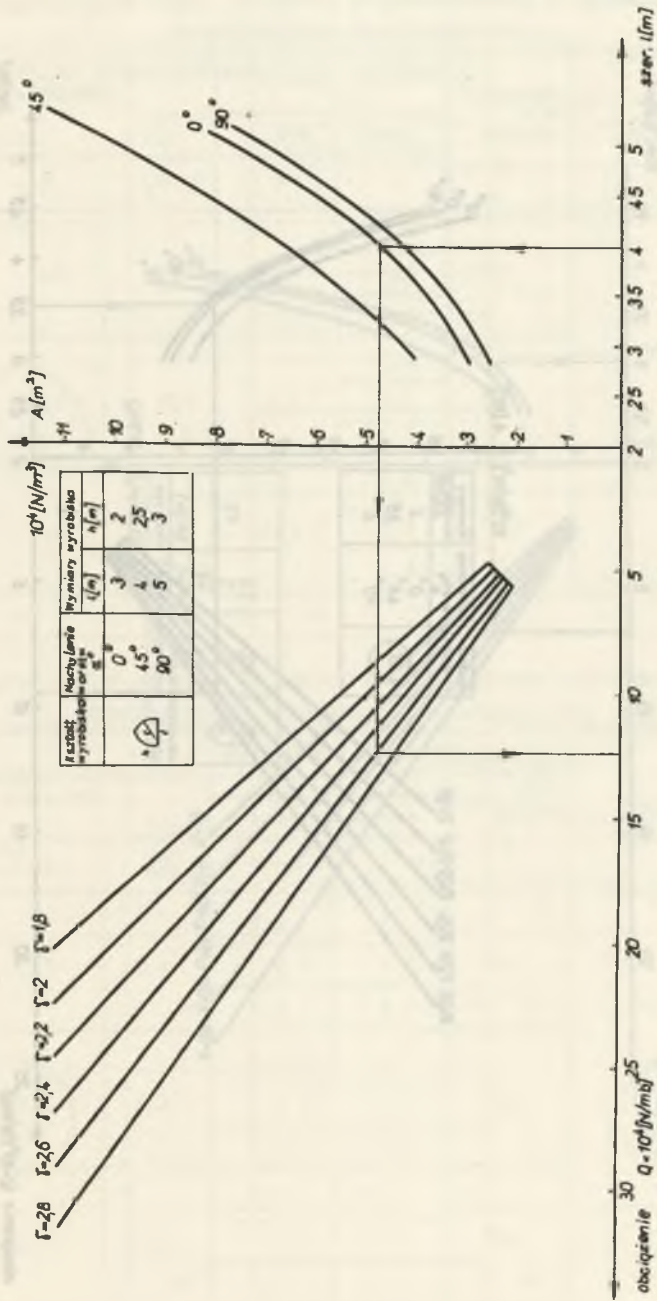
Wielkość współczynników równania (64) zamieszczono w tablicy nr 8 do 12. Podczas korzystania z nomogramów obowiązuje następująca kolejność w odczytywaniu wskaźników i wielkości: l, A, γ prowadzące w efekcie do ustalenia spodziewanego obciążenia Q obudowy wyrobisk przez pokruszone skały.



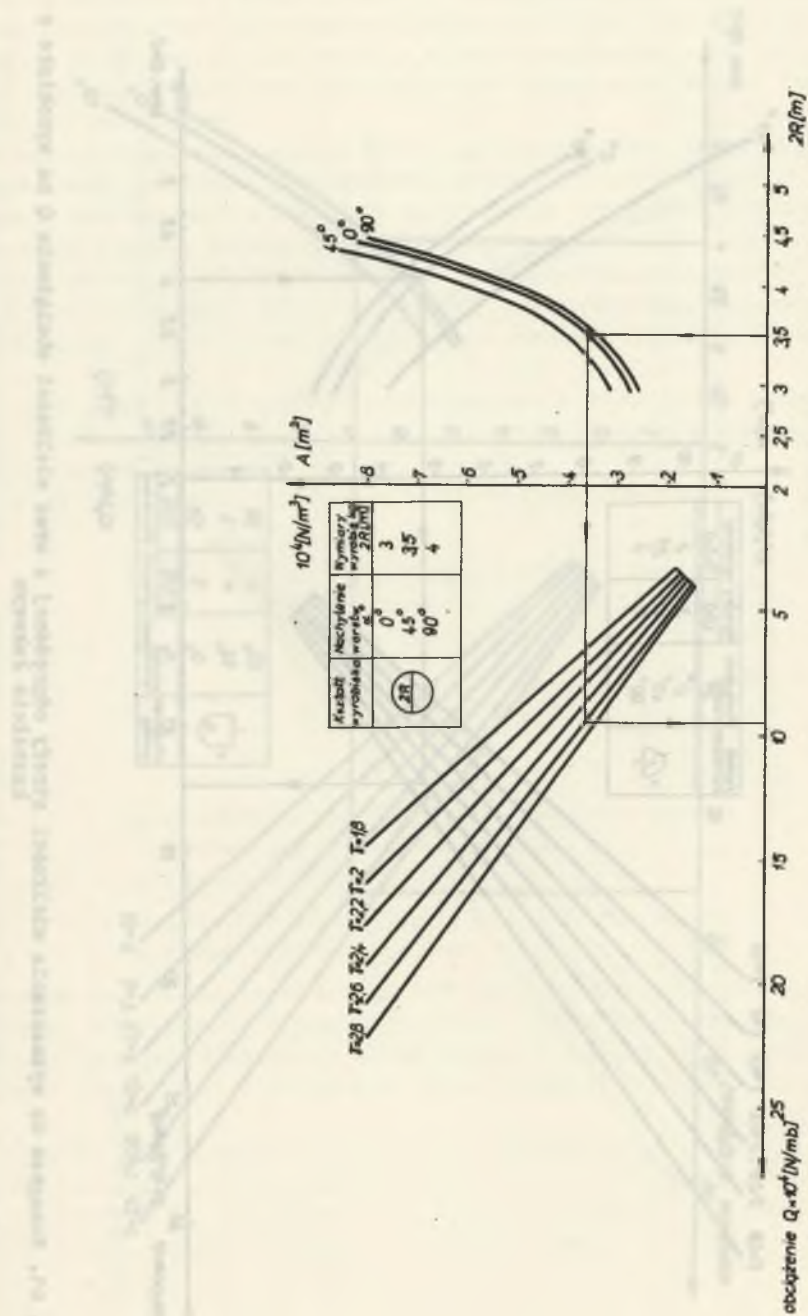
Eys. 59. Nomogram do wyznaczania wielkości strefy odrpężonej A oraz wielkości obciążenia Q na wyrobiska o przekroju prostokątnym



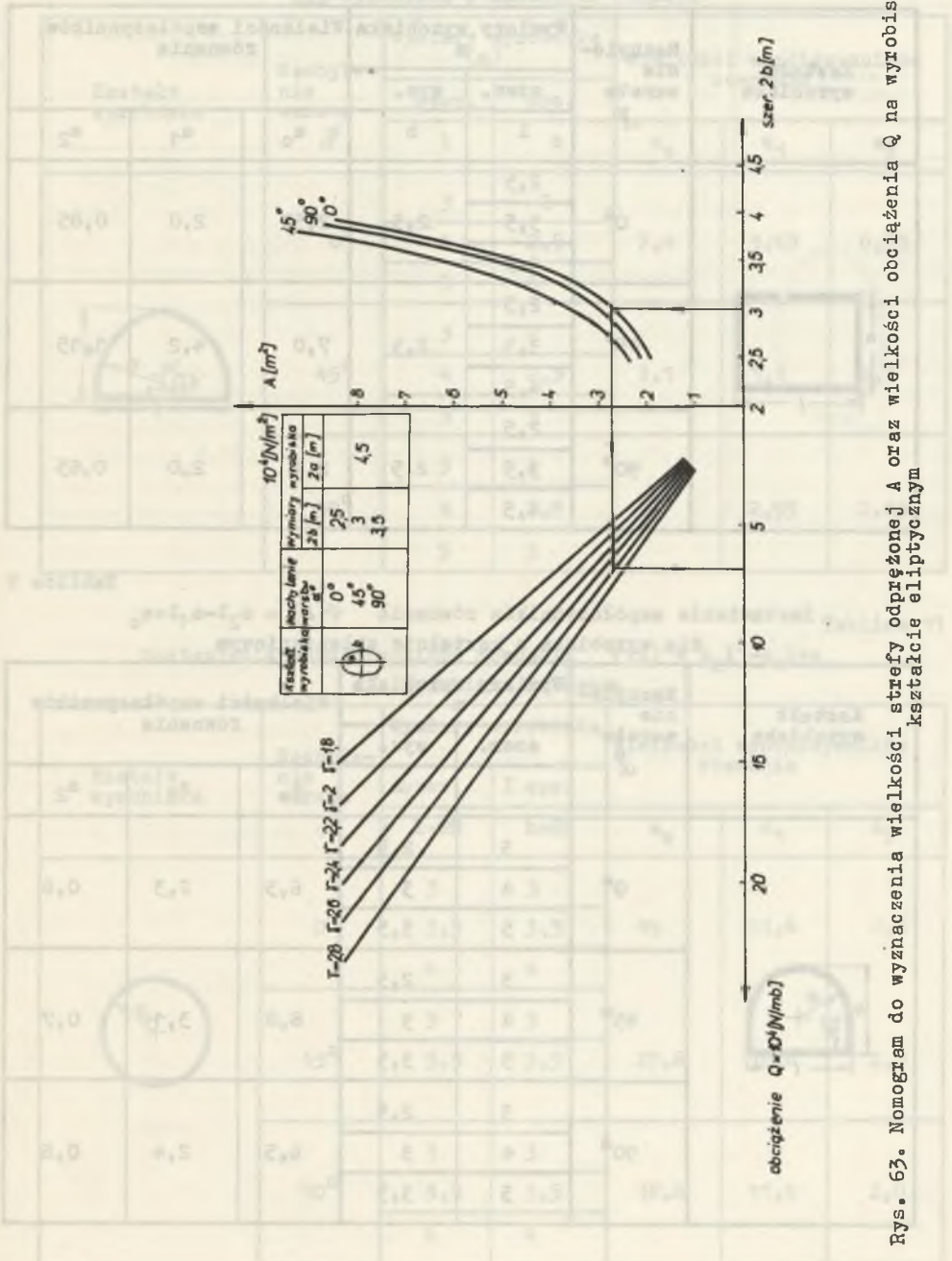
Rys. 60. Nomogram do wyznaczania wielkości strefy odprężonej A oraz wielkości obciążenia Q na wyrobisko o kształcie sklepieniowym



Pys. 61. Nomogram do wyznaczenia wielkości strefy odprężonej A oraz wielkości obciążenia Q na wyrobisko o kształcie łukowym




Rys. 62. Nomogram do wyznaczenia wielkości strefy odprężonej A oraz wielkości obciążenia Q na wyrobisko o kształcie kołowym



Rys. 63. Nomogram do wyznaczenia wielkości strefy odprężonej A oraz wielkości obciążenia Q na wyrobisko o kształcie eliptycznym


Tablica 8

Zestawienie współczynników równania $\varphi(A) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0$
dla wyrobiska prostokątnego

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska m		Wielkości współczynników równania		
		szer.	wys.	a_0	a_1	a_2
		1	h			
	0°	2,5	2,5	2,58	2,0	0,85
		3,5				
		4,5				
	45°	2,5	2,5	7,0	4,2	1,15
		3,5				
		4,5				
	90°	2,5	2,5	2,4	2,0	0,65
		3,5				
		4,5				


Tablica 9

Zestawienie współczynników równania $\varphi(A) = a_2 l - a_1 l + a_0$
dla wyrobiska o kształcie sklepieniowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska m		Wielkości współczynników równania		
		szer.	wys.	a_0	a_1	a_2
		1	h			
	0°	3	2,5	6,5	2,3	0,6
		4	3			
		5	3,5			
	45°	3	2,5	8,8	3,1	0,7
		4	3			
		5	3,5			
	90°	3	2,5	6,5	2,4	0,6
		4	3			
		5	3,5			


Tablica 10

Zestawienie współczynników równania $\varphi(A) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0$
dla wyrobiska o kształcie łukowym

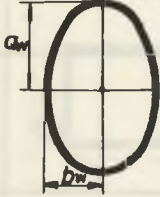
Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska (m)		Wielkości współczynników równania		
		szer.	wys.	a_0	a_1	a_2
		1	h			
	0°	3	2	7,4	3,65	0,75
		4	2,5			
		5	3			
	45°	3	2	3,1	1,1	0,5
		4	2,5			
		5	3			
	90°	3	2	5,7	2,95	0,65
		4	2,5			
		5	3			

Tablica 11

Zestawienie współczynników równania $\varphi(A) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0$
dla wyrobiska kołowego

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Wymiary wyrobiska m		Wielkości współczynników równania		
		szer.	wys.	a_0	a_1	a_2
		1=2R	h=2R			
	0°	3	3	19	11,4	2,0
		3,5	3,5			
		4	4			
	45°	3	3	27,8	16,6	2,8
		3,5	3,5			
	90°	3	3	18,8	11,4	2,0
		3,5	3,5			
		4	4			

Zestawienie współczynników równania $\varphi(\lambda) = a_2\lambda^2 - a_1\lambda + a_0$
dla wyrobiska eliptycznego

Kształt wyrobiska	Nachylenia warstw α°	Wymiary wyrobiska m		Wielkości współczynników równania		
		szer.	wys.	a_0	a_1	a_2
		l	h			
	0°	2,5	4,5	17,9	12,9	2,6
		3				
		3,5				
	45°	2,5	4,5	12,4	9,5	2,2
		3				
		3,5				
	90°	2,5	4,5	19,2	13,8	2,8
		3				
		3,5				

9. PORÓWNANIE WIELKOŚCI STATYCZNEGO OBCIĄŻENIA OBUDOWY WYROBISK KORYTARZOWYCH WG WZORÓW PROJEKTOWYCH ORAZ WYNIKÓW PRACY

Problemy utrzymania wyrobisk korytarzowych na dużych głębokościach $H \geq H_{kr}$ w praktyce górnictwa podziemnego w Polsce nabrały znaczenia dopiero w okresie kilku ostatnich lat. Fakt ten ściśle związany jest z rozbudową nowych Zagłębi Węglowych, aktualnie ROW-u, gdzie główne poziomy wydobycze ze względów techniczno-ekonomicznych lokalizowane muszą być w skałach, dla których osiągnięto bądź przekroczono zakres głębokości krytycznych. Zagadnienia te są bezpośrednią przyczyną problematyki z tego zakresu, której efektem finalnym będzie opracowanie metod i sposobów zapewnienia stateczności wyrobisk górniczych.

W chwili obecnej w praktyce projektowej stosuje się wzory oparte na metodach "siłowych" takich, jak: Birbaumera, P.M. Cymbarjewicza, M. Protodiakonowa, S. Sałustowicza zdając sobie sprawę, że obecne i przyszłe głębokości lokalizacji wyrobisk wykraczają poza zakres stosowania wymiennych metod.

Doraźnym przedsięwzięciem stosowanym w praktyce może być w chwili obecnej np. posługiwanie się sposobami opracowanymi przez badaczy radzieckich dla Zagłębia Donieckiego, poprzez analogię warunków geologicznych, bądź wprowadzenie poprawek w postaci uzupełnień i odpowiednich współczynników do aktualnie obowiązujących norm. Mając na uwadze tę drugą możliwość w pracy przeprowadzono analizę porównawczą między teoretycznymi wielkościami obciążenia obudowy obliczonymi wg wzorów:

M. Protodiakonowa

$$Q = \frac{1}{3} \gamma \frac{1^2}{\mu}, \quad (66)$$

P.M. Cymbarjewicza

$$Q = \frac{4}{3} a_1 \cdot b_1 \cdot \gamma, \quad (67)$$

A. Sałustowicza

$$Q = \frac{2}{3} \gamma l \left(a - \frac{h}{2} \right) \quad (68)$$

oraz wzorów uzyskanych w oparciu o wyniki badań modelowych zdając sobie jednocześnie sprawę z pewnego stopnia ich trudnej porównywalności.

Rezultaty tej analizy mogą zatem posłużyć jako podstawa wprowadzania odpowiednich poprawek normowych. Wyniki otrzymane z obliczeń analizowanych w pracy wyrobisk zestawiono w następujących tablicach:

Wyrobisko prostokątne	- tablica nr 13
Wyrobisko o kształcie właściwym obudowie murowej	- tablica nr 14
Wyrobisko o kształcie dostosowanym do obudowy łukowej	- tablica nr 15
Wyrobisko o kształcie kołowym	- tablica nr 16
Wyrobisko o kształcie eliptycznym	- tablica nr 17

Przeprowadzone obliczenia dla przyjętych do badań rzeczywistych własności górotworu i parametrów wyrobisk podanych w punktach 7.1.2 i 8 pracy - dowodzą, że wyniki uzyskane przy pomocy zapisanych wyżej wzorów znacznie różnią się między sobą. To zróżnicowanie liczbowych wielkości obciążeń wynika ze zbyt dużych rozpiętości obszaru powierzchni strefy odprężonej ustalonej wzorami (66, 67, 68) oraz wzorami podanymi w pracy. Przyczyn tego należy upatrywać w uogólnieniach wzorów (66, 67, 68), których analityczny zapis nie oddaje w pełni cech właściwych zjawiskom kształtowania się strefy skał zruszonych w otoczeniu wyrobiska w warunkach prowadzonych badań w górotworze uwarstwionym w stanie granicznego wyteżenia.

Wyniki uzyskane z badań, aczkolwiek miarodajne dla analizowanych w pracy własności górotworu i wyrobisk i pozwalające na sformułowanie szczegółowych ustaleń w zakresie wyznaczania geometrycznych wielkości obszaru strefy deformacji niesprężystych - trwałych, nie wyczerpują w całości zagadnienia.


Stwarzają jednak podstawę do dalszych badań w tym kierunku, jak również sygnalizują konieczność bardziej wnikliwego przeanalizowania wszechstronności stosowania dotychczasowych wzorów, a w szczególności do występujących w tych wzorach parametrów określających wielkość powierzchni strefy odprężonej. Zamieszczone w tablicach nr 13 do 17 wyniki obliczeń najwyraźniej uzasadniają taką potrzebę.

Jeżeli zważyć, że wyteżenie górotworu do stanu granicznego sprzyja pełnemu wykształtowaniu się obszaru skał pokruszonych o zasięgu i wielkości znacznie przewyższającej strefę wyznaczoną dotychczasowymi wzorami, to najbardziej prawdopodobnymi są wyniki uzyskane z obliczeń wzorami podanymi w pracy. Wynika stąd, że dotychczasowe wzory pozwalają na uzyskiwanie miarodajnych wyników jedynie dla stanów pośrednich lub przejściowych w procesie tworzenia się w otoczeniu wyrobiska strefy zruszenia skał, aż do jej całkowitego ukształtowania.

Dla fazy końcowej stabilizowania się strefy skał zruszonych określonej w myśl założeń poczynionych w pracy przez graniczny stan wyteżenia górotworu, wyniki uzyskane wzorami dotychczas stosowanymi posiadają znacznie

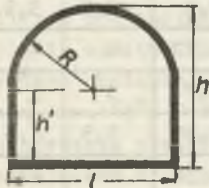
Tablice 13

Zestawienie wielkości obciążeń na obudwę wyrobiska prostokątnego

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Obciążenie $Q \times 10$ kN/mb w g				Wymiary wyrobiska m	
		M.Pro-todia-konowa	P.Cym-bare-wicza	A.Sa-łusto-wicza	Wg wzorów podanych w pracy	szer.	wys.
						1	h
	0°	0,96	1,37	2,9	7,54	2,5	2,5
		1,89	2,45	6,9	15,6	3,5	
		3,13	4,85	12,87	28	4,5	
	45°	0,69	1,37	2,9	9,62	2,5	2,5
		1,89	2,45	6,9	16,64	3,5	
		3,13	4,85	12,87	29,6	4,5	
	90°	0,96	1,37	2,9	7,02	2,5	2,5
		1,89	2,45	6,9	15,08	3,5	
		3,13	4,85	12,87	27,56	4,5	


Tablica 14

Zestawienie wielkości obciążeń na obudowę wyrobiska o kształcie sklepieniowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Obciążenie $Q \times 10$ kN/mb w g				Wymiary wyrobiska m	
		M.Pro-todia-konowa	P.Cym-bare-wicza	A.Sa-łusto-wicza	Wg wzorów podanych w pracy	szer.	wys.
						1	h
	0°	1,4	1,9	4,9	13	3	2,5
		2,4	3,3	8,9	17,94	4	3
		3,9	5	14,4	26	5	3,5
	45°	1,4	1,9	4,9	15,08	3	2,5
		2,4	3,3	8,9	19,76	4	3
		3,9	5	14,4	28	5	3,5
	90°	1,4	1,9	4,9	12,2	3	2,5
		2,4	3,3	8,9	16,9	4	3
		3,9	5	14,4	24,7	5	3,5

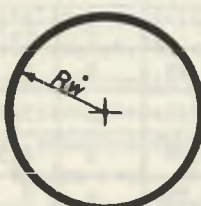
Tablica 15

Zestawienie wielkości obciążeń na obudowę wyrobiska o kształcie łukowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Obciążenie $Q \times 10$ kN/mb wg				Wymiary wyrobiska m	
		M.Pro-todia-konowa	P.Cym-bare-wicza	A.Sa-żusto-wicza	Wg wzorów podanych w pracy	szer.	wys.
						l	h
	0°	-	1,7	3,5	8,32	3	2
			3,2	5,5	12,4	4	2,5
			4,9	9,4	20,54	5	3
	45°	-	1,7	3,5	11,18	3	2
			3,2	5,5	17,42	4	2,5
			4,9	9,4	26,3	5	3
	90°	-	1,7	3,5	7,02	3	2
			3,2	5,5	11,18	4	2,5
			4,9	9,4	18,72	5	3

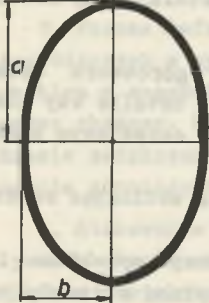
Tablica 16

Zestawienie wielkości obciążeń na obudowę wyrobiska o kształcie kołowym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Obciążenie $Q \times 10$ kN/mb wg				Wymiary wyrobiska m	
		M.Pro-todia-konowa	P.Cym-bare-wicza	A.Sa-żustowicza	Wg wzorów podanych w pracy	szer.	wys.
						l	h
	0°	-	1,95	4,3	7,28	3	3
			2,8	5,7	9,36	3,5	3,5
			3,6	7,5	14,04	4	4
	45°	-	1,95	4,3	8,32	3	3
			2,8	5,7	10,4	3,5	3,5
			3,6	7,5	16,12	4	4
	90°	-	1,95	4,3	6,76	3	3
			2,8	5,7	8,84	3,5	3,5
			3,6	7,5	13,52	4	4

Tablica 17

Zestawienie wielkości obciążeń na obudowę wyrobiska o kształcie eliptycznym

Kształt wyrobiska	Nachylenie warstw α°	Obciążenie $Q \times 10 \text{ kN/mb}$ wg				Wymiary wyrobiska m	
		M.Pro- todia- konowa	P.Cym- bare- wicza	A.Sa- żusto- wicza	Wg wz- rów po- danych w pra- cy	szer.	wys.
						l	h
	0°	-	1,7	1,9	4,94	2,5	4,5
		-	2,3	3	6,76	3	
		-	2,8	4	11,96	3,5	
	45°	-	1,7	1,9	6,24	2,5	4,5
		-	2,3	3	9,62	3	
		-	2,8	4	15,86	3,5	
	90°	-	1,7	1,9	5,72	2,5	4,5
		-	2,3	3	7,8	3	
		-	2,8	4	13,52	3,5	

zaniżone wielkości liczbowe i nie mogą być traktowane jako obiektywne. Stwierdzenie to obejmuje generalnie wszystkie analizowane w pracy wyrobiska, dla których ustalono wielkości obciążeń obudowy. Występujące istotne różnice liczbowych wielkości obciążeń powtarzają się w każdym badanym wariancie zalegania skał niezależnie od kształtu i wielkości przekroju poprzecznego wyrobiska. Świadczy to o wykluczeniu możliwości popełnienia w trakcie wykonywania serii badań zasadniczych błędów pomiarowych jak również w analitycznej interpretacji wyników pomiarowych.

Przeprowadzona analiza wielkości obciążeń obliczonych wzorami podanymi w pracy pozwala na postawienie dalszego stwierdzenia, które sformułować można następująco: dla określonych w pracy kształtów i wymiarów poprzecznych wyrobisk zlokalizowanych na głębokości odpowiadającej granicznej nośności skał, wielkość obciążenia na obudowę nie jest stała jak to wynika z obliczeń dotychczasowymi wzorami lecz zmienia się wraz ze zmianą kąta pochylenia warstw. Dla przyjętych do badań wielkości kątów zalegania warstw, maksimum obciążenia na obudowę wyrobiska przypada na wartość kąta pochylenia $\alpha = 45^\circ$. Z dalszym wzrostem kąta pochylenia, aż do pionowego zalegania warstw obciążenie wydatnie maleje do wielkości bliskiej obciążeniu wynikającemu z usytuowania wyrobiska w warstwach o poziomym zaleganiu.

10. ZAKRES PRAKTYCZNEGO WYKORZYSTANIA WYNIKÓW PRACY

Dla umożliwienia praktycznego stosowania wyników badań zaleca się w obliczeniach stosować nomogramy pokazane na rys. 59, 60, 61, 62, 63. Stosowanie nomogramów eliminuje bowiem pracochłonne obliczenia. W celu określenia wielkości obciążenia na obudowę wyrobiska postuluje się następujący tok rozumowania:

- 1) Dokonać stwierdzenia odnośnie warstwowej budowy górotworu oceniając średnie wielkości cech fizykomechanicznych skał i ustalić czy górotwór może być traktowany jako jednorodny uwarstwiony o określonym kącie pochylecia warstw,
- 2) Dokonać oceny kształtu przekroju wyłomu wyrobiska zbliżając spodziewany kształt do jednego z badanych.
- 3) Na podstawie danych odnośnie przeznaczenia i funkcji wyrobiska ustalić spodziewaną wielkość powierzchni przekroju wyłomu stwierdzając, czy zamyka się ona w obszarze badawczych wielkości przekrojów wyrobisk;
- 4) Dokonać oceny, czy nastąpi w górotworze w otoczeniu zakładanego wyrobiska wyciężenie stanu granicznego górotworu ze względu na:
 - głębokość zalegania wyrobisk,
 - koncentracji naprężeń w wyniku eksploatacji, wpływu ukształtowania i usytuowania frontów wybierania, itp.

Po stwierdzeniu możliwości zaistnienia w przyszłości stanu granicznego wyciężenia górotworu zaleca się skorzystać z odpowiedniego nomogramu. W celu określenia obciążenia należy: na wytypowanym nomogramie na osi poziomej po stronie dodatniej ustalić odpowiadającą szerokość wyrobiska dla określonej wysokości. Punkt ten rzutować na krzywą odpowiadającą kątowi pochylecia warstw. Otrzymany punkt poziomo odwzorować na prostą określającą wpływ ciężaru objętościowego skał, a następnie odwzorować w rzucie pionowym na oś poziomą uzyskując z odczytu na osi poziomej szukaną wielkość spodziewanego obciążenia obudowy. W przypadku trudności w jednoznacznym ustaleniu podstawowych parametrów wyrobisk i czynników naturalno-górnicznych do powyższych ustaleń należy przyjmować parametry i czynniki najbardziej zbliżone do objętych badaniami. Posługiwanie się podanym sposobem pozwala na szybkie ustalenie spodziewanej wielkości obciążeń na obudowę wyrobisk korytarzowych wykonywanych w kopalniach w warunkach zbliżonych do badanych.

11. WNIOSKI KOŃCOWE

Uzyskane w całokształcie badań eksperymentalnych wyniki oraz analiza dotychczasowych ujęć przedmiotowej problematyki prowadzą do wysunięcia niżej przytoczonych wniosków:

1. Proces deformacji skał górotworu w otoczeniu wyrobisk korytarzowych zachodzących w wyniku tworzenia się obszaru spękań, stanowi nadal istotny problem w zagadnieniach ekonomicznego i pewnego zabezpieczenia wyrobisk przez obudowę. Znaczenie problemu uwydatnia się zwłaszcza obecnie, w okresie zwiększania głębokości eksploatacji i zagospodarowania nowych obszarów górniczych.

2. Stosowanie dotychczasowych metod oceny wielkości statycznego oddziaływania górotworu na obudowę w praktyce prowadzi do wielu nie trafnych wyników w projektowaniu obudów wyrobisk, które po wykonaniu w kopalniach ulegają niszczeniu, a wyrobiska wymagają przebudowy.

3. Na podstawie analizy naturalno-górnicych czynników wyrobisk korytarzowych stwierdzono, że obszar i zasięg kruszenia skał w otoczeniu wyrobisk warunkują takie czynniki, jak: wielkość i kształt przekroju wyrobiska, uwarstwienie górotworu, czy też położenie wyrobiska względem uwarstwienia skał. Wymienione czynniki stanowią grupę możliwą do jednoczesnego śledzenia w badaniach modelowych i obserwacjach dołowych, jakkolwiek nie wyczerpują problematyki.

4. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wpływ geometrycznych parametrów wyrobisk na wielkość i zasięg strefy kruszenia modelu. Pokruszone odłamki i fragmenty modelowego górotworu podległy przemieszczaniu do otworów imitujących wyrobiska. Za zasięg strefy kruszenia przyjęto uważać zewnętrzny obrys obszaru charakteryzującego się występowaniem nieciągłych deformacji materiału.

5. Badania wykazują, że linia łamana ograniczająca zewnętrzny obszar strefy kruszenia może być stosunkowo dokładnie aproksymowana elipsą, bądź też wycinkiem elipsy. Na uwagę zasługuje stwierdzenie, że zewnętrzna granica tworzącej się strefy deformacji nieciągłych nie posiada punktów wspólnych z konturem wyrobiska.

6. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że charakterystyczne wymiary elipsy stanowiącej obrys strefy kruszenia pozostają w ścisłym związku z wymiarami i kształtem wyrobisk. Ponadto model górotworu o poziomym i pionowym załaganii warstw charakteryzuje się symetrią położenia strefy

kruszenia względem osi wyrobisk, natomiast model górotworu z ukośnym za-
leganiem warstw cechuje niesymetria strefy względem osi wyrobiska. W ba-
daniach obserwuje się również przesunięcie środka elipsy ograniczającej
strefę kruszenia względem środka wyrobiska.

7. Podane równania opisujące pole wycinków elips umożliwiają praktycz-
nie dokonywać oceny wielkości spodziewanego obciążenia statycznego na obu-
dowy wyrobisk w zakresie wykonywanych w kopalniach wielkości oraz typo-
wych kształtów. Opracowane nomogramy mogą stanowić pomoc w projektowaniu
nośności i wytrzymałości obudów wyrobisk korytarzowych w warunkach zbli-
żonych do badanych.

8. Zrealizowane w ramach niniejszej pracy badania eksperymentalne do-
tyczące prognozowania geometrycznych parametrów strefy deformacji trwa-
łych, plastycznych tworzących się wokół wyrobisk lokalizowanych na dużych
głębokościach nie wyczerpują oczywiście całości zagadnienia. Słusznym wy-
daje się wnioskowanie dalszych prac badawczych w tym zakresie ujmujących
jeszcze inne własności górotworu, w tym własności reologiczne, realizowa-
nych nie tylko w warunkach laboratoryjnych lecz także in situ.

LITERATURA

- [1] Ajtaliew Sz.M.: Isledowanije raboty obdiełok napornych tonnelej kru-gowo oczertania pod diejstwijem nieustanowiwszegosia gornowo dawle-nia. Wkn. Reologiczeskije woprosy mechaniki gornych porod. An. Kaz. SSR. Ałma Ata 1964 r.
- [2] Ajtaliew Sz.M., Jerżanow Ż.S., Masonow Ż.K., Siniajew A.J.: Opriedie-lenie napriażennowo sostojanija anizotropowo (nakłonno-słoistwo) u-prugansledstwiennowo masiwa wokrug odniczných wyrabotok. Wkn.Proble-my reologii gornych porod. Naukowa Dumka, Kijew 1970 r.
- [3] Borecki M.: Podstawowe kryteria prognozowania stateczności wyrobisk kapitalnych. Międzynarodowe Sympozjum "Ochrona przed zawałem skał", Katowice 1973 r.
- [4] Borecki M.: Problemy rozwoju technologii górniczej na dużych głębo-kościach. Przegląd Górniczy nr 2, 1974 r.
- [5] Borecki M., Chudek M.: Mechnika górotworu. Wyd. Śląsk, Katowice 1972 r.
- [6] Borecki M., Szczurkowski A.: Obciążenie i praca obudowy wyrobisk chodnikowych. Przegląd Górniczy nr 5, 1954 r.
- [7] Borecki M.: Zachowanie się skał w układach jednoosiowych obciążeń wy-sokociśnieniowych ze skrępowanym odkształceniem poprzecznym. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Górniczo t. 331, 1971 r.
- [8] Bułyczew N.S., Amusin B.Z., Ołowiennyj A.G.: Rascziet kriepi kapi-talnych gornych wyrabotok. Izd. Niedra, Moskwa 1974 r.
- [9] Chudek M.: Obciążenie obudowy wyrobisk korytarzowych jako funkcja ro-dzaju skał oraz wymiarów i lokalizacji wyrobiska Rudy Żelaza, nr 11-12, 1963 r.
- [10] Chudek M.: Obudowa wyrobisk cz. 1. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Wydawnictwo Śląsk 1975 r.
- [11] Chudek M.: Chodniki kopalniane. Budownictwo betonowe t. XII. Budowle przemysłowe cz. 2, str. 427 do 448. Arkady Warszawa 1971 r.
- [12] Chudek M.: Obudowa kamienna, metalowa i mieszana. Górniczo t.7 Wyd. Śląsk, Katowice 1968 r.
- [13] Chudek M., Pach A., Olaszowski W.: Analiza stanu naprężeń i deforma-cji skał w otoczeniu wyrobisk korytarzowych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. z. 30, 1968 r.
- [14] Chudek M.: Wytrzymałość skał karbońskich w trójosiowym stanie naprę-żeń. Archiwum Górniczo t. XVI z. 3 1971 r.

- [15] Chudek M., Świst E.: Ciśnienie górotworu na obudowę tuneli i wyrobisk górniczych na małych głębokościach. Przegląd Górniczy nr 9, 1971 r.
- [16] Cymbarjewicz P.M.: Rudnicznoje Krieplienije. Moskwa 1951 r.
- [17] Czerniak I. i dr: O mechanizmie deformacji poród na głębokich szachtach wokrug podgotowitielnych wyrobotok nie podwierżniennych wlijaniiu oczistnych robot. Wku Woprosy gornowo dieła. Niedra, Moskwa 1967 r.
- [18] Dziunikowski J.L.: Stan napięcia i odkształcenia górotworu sprężysto-plastycznego w sąsiedztwie szybu. Zeszyty Naukowe AGH nr 92. Rozprawy z. 31, Kraków 1964 r.
- [19] Filcek H.: Stan naprężenia i odkształcenia wokół wyrobiska chodnikowego jako funkcja czasu. Zeszyty Problemowe Górnictwa z. 1, 1963 r.
- [20] Filcek H., Mikość T., Zorychta A.: Wpływ promienia krzywizny 3 naroży na koncentracje naprężeń w otoczeniu wyrobiska korytarzowego o przekroju kwadratowym. Zeszyty Naukowe AGH. Górnictwo z. 45, 1973 r.
- [21] Filcek H., Zorychta A.: Wpływ przyjętego modelu górotworu na wielkość koncentracji naprężeń wokół nieobudowanych wyrobisk chodnikowych. Zeszyty Naukowe AGH. Górnictwo z. 62, 1974 r.
- [22] Gałczyński S.: Próba uogólnienia hipotezy sklepienia ciśnień w sąsiedztwie wyrobiska chodnikowego. Przegląd Górniczy nr 5, 1971 r.
- [23] Głuszko W.T.: Projawlania gornowo dawlenia w głębokich szachtach. Naukowa Dumka, Kijew 1971 r.
- [24] Głuszko W.T., Dilinina N.N., Rożowski M.I.: Ustojeziwost gornych wyrobotok, Naukowa Dumka, Kijew 1973 r.
- [25] Georgowicz Z., Gałczyński S.: Zależność obliczonego ciśnienia górotworu od przyjętych wskaźników wytrzymałościowych ośrodka. Przegląd Górniczy nr 4, 1967 r.
- [26] Hubert M.T.: Teoria sprężystości, Kraków PWN, 1950 r.
- [27] Hobbs D.W.: Scale model of strata movement around mine roadways - IV Roadway shale and size. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences nr 4, 1969 r.
- [28] Jerżanow Z.S., Ajtaliew Sz.M., Mosonow Ż.K.: Ustojeziwost gorizontacznych wyrobotok w nakłonna słoistom massiwie. Nauka - Alma-Ata 1971 r.
- [29] Kidybiński A.: Mechaniczne własności skał karbońskich Zagłębia Górnosląskiego. Przegląd Górniczy nr 11, 1969 r.
- [30] Kidybiński A.: Czasowa stateczność stropów wyrobisk korytarzowych. Przegląd Górniczy nr 4, 1965 r.
- [31] Kidybiński A.: Światowe kierunki prac badawczych nad zagadnieniem zawałów i obrywania się skał stropowych nad wyrobiskiem podziemnym. Przegląd Górniczy nr 4, 1966 r.
- [32] Kidybiński A.: Praktyczne uwagi dotyczące modelowania zjawisk zachodzących w górotworze podczas prowadzenia eksploatacji ścianowej. Ma-

- terialy konferencyjne na Międzynarodowe Seminarium Młodych Inżynierów Górniczo-Geologicznego, GIG, Katowice 1960 r.
- [33] Kacaurov J.N.: Gornyje dowlieniye. *Mechanika gornych porod* cz. II, Moskwa 1972 r.
- [34] Kozjeł A.M.: Gornyje dawlenie i funkcji krepki w gorizontalnych kapitalnych wyrobotkach na głubokich gorizontach. *Trudy WNIMI Sb 63*, Leningrad 1967 r.
- [35] Krupiennikow G.A., Dawydowicz I.L., Zaslawskij J.: Gornyje dawlenie i krepienie kapitalnych wyrobotok pri uwieliczeniu głubiny podziemnych rozrobotok. *Sbornik trudow WNIMI*, Leningrad 1971 r.
- [36] Kwasniewski M.: Pojęcie dużych głębokości z punktu widzenia geotechniki górniczej. *Przegląd Górniczy* nr 12, 1973 r.
- [37] Maksimow A.P.: Wydawliwanie gornych porod, instojeziwost podziemnych wyrobotok. *Gorgortechizdat*, Moskwa 1963 r.
- [38] Nasonow T.N.: *Mechanika gornych porod i krepienie gornych wyrobotok*. Moskwa 1969 r.
- [39] Praca zbiorowa Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni: Podstawowe parametry optymalnej i bezpiecznej współpracy obudowy z górotworem w trudnych warunkach naturalnych i górniczych. Gliwice 1974 r. Praca nieopublikowana.
- [40] Praca zbiorowa Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni: Kryteria lokalizacji wyrobisk kapitalnych w górotworze. Gliwice 1974 r. Praca nieopublikowana.
- [41] Ruppenejt K.W.: *Niekotoryje woprosymiekaniki gornych porod*. Moskwa 1954 r.
- [42] Rumszycki Z.L.: *Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu*. Wyd. Nauk. Techn., Warszawa 1973 r.
- [43] Sałustowicz A.: *Zarys mechaniki górotworu*. Wyd. Śląsk, Katowice 1965 r.
- [44] Sikora W., Kwiatek J.: *Badania nad zachowaniem się wyrobisk korytarzowych na dużych głębokościach*. Międzynarodowe Sympozjum *Mechaniki Górotworu, Górniczo-Geologicznego* 1, 1965 r.
- [45] Szefer G.: Wpływ robót górniczych na stan naprężenia i odkształcenia górotworu w świetle teorii sprężystości. *Zeszyty Problemowe*, t. II, z. 1, 1964 r.
- [46] Takuski S.: *Radiologiczny pomiar strefy zruszenia spągu wyrobiska górniczego*. *Przegląd Górniczy* nr 3, 1964 r.
- [47] Trollope D.H.: *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Stag a. Zienkiewicz (Wiley), 1968 r.
- [48] Trollope D.H.: *The stability of deep Circular shafts in hard rock*. *Proc. 2 and Cong International Society for Rock Mechanics*, Beograd 1970 r.
- [49] Zaslawskij Ju.Z., Zorin A.N., Czerniak I.L.: *Rasezioty parametrów krepki wyrobotok głubokich szacht*. *Technika*, Kijew 1972 r.

- [50] Zaslavskij Ju.Z.: Issledovanie prozavlenij gornovo chawlenia w kapitalnych wyrobotkach glubokich szachr Doniekowo bassejna. Niedra, Moskwa 1966 r.
- [51] BN-73/0434-04: Norma branżowa - Obudowa wyrobisk górniczych. Wyrobiska korytarzowe, poziome i pochyłe w kopalniach. Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych.

ZAGADNIENIE PROGNOZOWANIA OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH NA OBUDOWĘ WYROBISK KORYTARZOWYCH I KOMOROWYCH

S t r e s z c z e n i e

Przy prognozowaniu współpracy obudowy wyrobisk korytarzowych i komorowych z górotworem konieczna jest znajomość wielkości obciążeń, jakie będą działały na obudowę w czasie istnienia wyrobisk. Dotychczas wielkości i zasięg deformujących się skał w otoczeniu wyrobisk korytarzowych, od których zależy wielkość obciążeń na obudowę, określa się metodami: Protodiakonowa, Cymbarewicza i Sałustowicza.

Analizując współpracę obudowy z górotworem w różnych warunkach naturalno-górnicznych, obserwuje się w wielu wypadkach przedczesne deformacje obudowy, co świadczy o niekorzystnej jej współpracy z otaczającym ją górotworem. Dowodzi to między innymi niedoskonałości zaprojektowania i rozmieszczenia obudowy w wyrobisku z powodu zbyt przybliżonego określenia wielkości obciążeń.

W praktyce bowiem wielkość obciążeń statycznych określona wzorami Protodiakonowa, Cymbarewicza, Sałustowicza w większości przypadków nie sprawdza się. Dotyczy to zwłaszcza określenia obciążeń na obudowę wyrobisk lokalizowanych w górotworze na głębokościach wykraczających poza zakres ważności stosowania wspomnianych wzorów. Rozbieżności co do rzeczywistych wielkości obciążenia obudowy wyrobiska, oprócz powyższego, wynikają również z nieuwzględnienia w tych wzorach istotnych czynników takich, jak: kąt nachylenia warstw górotworu oraz kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska posiadającego niewątpliwie wpływ na zasięg strefy odprężonej, a tym samym na wielkość obciążenia jego obudowy.

Powyższe stwierdzenia stały się powodem podjęcia badań modelowych oraz próby opracowania nowej metody pozwalającej na obliczanie stref odprężonych w otoczeniu wyrobisk korytarzowych i komorowych oraz obciążeń statycznych w zależności od rodzaju skał i nachylenia warstw górotworu dla najczęściej stosowanych w praktyce górniczej przekrojów podziemnych wyrobisk korytarzowych i komorowych. Badaniami objęto wyrobiska o przekroju poprzecznym, prostokątnym, łukowym, kołowym, eliptycznym i zbliżonym do kształtu sklepieniowego, właściwego obudowie murowej, wykonane w górotworze, w którym warstwy zalegają pod nachyleniem 0° , 45° i 90° .

Badania przeprowadzono w stoisku (rys. 8) na materiałach ekwiwalentnych wykonanych w oparciu o znane zasady podobieństwa modelowego; wzory (13-28). W zamodelowanym górotworze stabilizowano sieć punktów pomiaro-

wych np. rys. 10 i 13. Obciążenie wywierano siłownikami (rys. 8) wywołując wewnątrz modelu naprężenia o takiej wielkości, aby koncentracja naprężeń była blisko koncentracji naprężeń krytycznych. Czas obciążania z takiej wielkości wynosił 24 godz. Po upływie tego czasu dokonywano w odstępach czasu co 1 godz. pomiaru przemieszczeń punktów (metodą fotogrametryczną) do czasu ustabilizowania się zmiany położenia obserwowanych punktów. Po czym wykonano ręcznie w modelu otwory o żądanym przekroju poprzecznym, imitujące wyrobiska. Po wykonaniu wyrobisk i upływie 3 godz. wykonano kolejny pomiar położenia punktów, a następnie co 1 godz. dwa dalsze pomiary. O ile po upływie takiego czasu w modelu nie występowały spękania warstw, zwiększano obciążenie w 5 % w stosunku do obciążenia pierwotnego i powtarzano cykl pomiarów. Badania przerywano, o ile w modelu obserwowano sieć szczelin wokół wyrobisk.

Wyznaczone opisanym sposobem wielkości poziomych i pionowych przesunięć punktów pozwoliły określić pole przemieszczeń punktów pomiarowych wokół wyrobiska, co było podstawą do określania zasięgu strefy deformacji skał o wielkościach względnych przemieszczeń (poziomych i pionowych) podczas zginania warstw - równych lub większych od wielkości krytycznych. Powierzchnie takie charakteryzujące się opisanymi deformacjami przyjęto uważać za obszary rozluźnione - pokruszone.

Krytyczne wielkości względnych deformacji sieci punktów pomiarowych wyznaczano laboratoryjnie dla zginanych beleczek o wymiarach 100x50x50 mm, jednostronnie sztywno utwierdzonych, obciążonych siłą skupioną przyłożoną na końcu beleczki. Na podstawie odczytów wyznaczono w skali wektory przesunięć dające w zestawieniu z modelem i wyrobiskami pole przemieszczeń punktów. Zewnętrzny obrys strefy pokruszonego modelu ograniczono linią łamaną, po czym w matematycznych rozważaniach sprowadzono ją do regularnej krzywej stożkowej najbardziej zbliżonej kształtem do linii łamanej.

Ustalone w powyższy sposób strefy odprężone dla analogicznych przekrojów poprzecznych i zalegania warstw pod kątem 0°, 45° i 90° podają rys. 13-48. Strefę odprężoną w otoczeniu badanych wyrobisk (rys. 49-58) można obliczyć ze wzorów (38-63) w oparciu o tablice 3-7.

Wielkości obciążeń statycznych Q, jakie będą działały na obudowę wyrobisk korytarzowych określa się ze wzoru:

$$Q = f [\varphi(A) \cdot \eta]$$

$$\varphi(A) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0,$$

gdzie:

- A - równanie określające zmianę wielkości powierzchni strefy pokruszonej wokół wyrobiska, m²
- a₂, a₁, a₀ - współczynniki równania, tablice 8-12

- l - szerokość wyrobiska, m
 γ - ciężar objętościowy skał N/m^3 .

Dla ułatwienia korzystania ze wzorów (38-63) sporządzono nomogramy (rys. 59-62).

Dla danych warunków naturalno-technicznych tj. dla danej szerokości wyrobiska l i jego przekroju poprzecznego oraz skał o ciężarze objętościowym γ zalegających pod nachyleniem 0° , 45° i 90° w stosunku do płaszczyzny stropu (spągu) wyrobiska ustala się wielkości A i następnie Q.

W tablicach 13-17 zestawiono wielkości obciążeń na obudowę wyrobisk wynikających ze wzorów: Protodiakonowa, Sałustowicza, Сымбаревича oraz wzorów podanych w pracy.

ПРОБЛЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КРЕПЬ В УЗКИХ И КАМЕРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Р е з ю м е

При прогнозировании взаимодействия крепи с горной породой для узких и камерных выработок необходимо знать величину нагрузок действующих на крепь во время существования выработок. До настоящего времени для определения величины деформирующихся скал и радиуса их распространения в зоне узких выработок, которые оказывают влияние на величину нагрузок, действующих на крепь пользовались методами Протодяконова, Сымбаревича и Салустовича.

Анализируя взаимодействие крепи с горной породой в различных природно-геологических условиях во многих случаях наблюдается преждевременная деформация крепи, что свидетельствует о неблагоприятном взаимодействии её с окружающей горной породой. Кроме того это свидетельствует также о несовершенстве проектирования и размещения крепи в выработке, вследствие того что величины нагрузок определены слишком приблизительно.

Величина нагрузок, определённая по формулам Протодяконова, Сымбаревича и Салустовича в большинстве случаев не подтверждается практикой. Это касается прежде всего случая определения нагрузок, действующих на крепь в выработках, находящихся на глубинах, для которых упомянутые выше формулы неприменимы. Кроме вышеуказанного, отклонение величины нагрузки, действующей на крепь, от действительной получается вследствие того, что в этих формулах не учитывают таких важных факторов как: угол наклона слоёв горной породы а также форма поперечного сечения выработки, влияющих несомненно на простираение района, в котором происходит отжим породы, а тем самым и на величину нагрузки, действующей на крепь.

Приведенные выше рассуждения привели к началу модельных испытаний а также к попытке разработки нового метода расчёта районов, находящихся среди узких и камерных выработок, в которых происходит отжим породы, а также статичес-

ких нагрузок, в зависимости от вида скал, угла наклона слоёв горной породы для чаще всего встречающихся в горном деле поперечных сечений подземных выработок как узких так и камерных. Испытания проводились в выработках с прямоугольным поперечным сечением, арочным, круглым, эллиптическим, а также с сечением форма которого подобна сводовой, сделанных в горных породах с углом наклона слоёв 0° , 45° , и 90° .

Испытания проводились на стенде, показанном на рис. 8 с применением эквивалентных материалов, изготовленных по известному принципу модельного сходства: формулы 13 и 28.

На модели горной породы закреплена сетка измерительных пунктов (рис. 10 и 13). Модель нагружали с помощью гидроцилиндров (рис. 8) вызывая внутри неё напряжения такой величины, чтобы концентрация их была близка к концентрации критических напряжений. Время действия нагрузки такой величины составляет 24 часа.

По истечении этого времени ежедневно проводились измерения перемещений пунктов (методом фотограмметрическим) до момента установившегося изменения положения измерительных пунктов. После чего в модели вручную сделаны отверстия требуемого сечения, имитирующие выработки. По истечении 3-ёх часов со времени изготовления выработок вновь проведены измерения положения пунктов; после чего проведены ещё два измерения в отрезках времени равных 1 часу. Если по истечении этого времени в слоях модели не образовались трещины, нагрузку увеличивали на 5% по отношению к первоначальной. Испытания прекращались при обнаружении сетки трещин вокруг выработок модели.

Найдены с помощью описанного выше метода величины горизонтальных и вертикальных перемещений пунктов позволили определить зону перемещений измерительных пунктов вокруг выработки, что в свою очередь явилось основой для определения простирающая зоны деформации скал с величиной относительных перемещений (горизонтальных и вертикальных), происходящих во время изгиба слоёв равных критической величине или превышающей её. Поля, характеризующиеся такими деформациями принято называть зонами со снятыми напряжениями (ненапряжёнными) — разрушенными зонами. Критические величины относительных деформаций сети измерительных пунктов определены в результате лабораторных испытаний на изгиб балок с размерами $100 \times 50 \times 50$ мм, жёстко закреплённых с одной стороны и нагруженных сосредоточенной силой, приложенной на конце балки. На основании отсчёта определены в масштабе векторы перемещений, сравнивая которые с моделью и выработками получаем зону перемещений пунктов. Нагруженный контур зоны разрушенной модели ограничен ломаной линией, которую для удобства математических рассуждений заменяют регулярной конусной кривой, наиболее близкой по форме к этой ломаной линии.

Определённые с помощью описанного выше метода зоны со снятыми напряжениями (ненапряжённые) для аналогичных поперечных сечений приведены на рис. 13-48 для пластов залегающих под углом 0 , 45 и 90° . Расчёт зоны со снятыми напряжениями, находящихся среди испытываемых выработок можно произвести по формулам 38-63, опираясь на таблицах 3-7.

Величины статических нагрузок Q , действующих на крепь в узких выработках определяют по формуле:

$$Q = r [\varphi|A|] \cdot \gamma$$

$$\varphi|A| = a_2 l^2 - a_1 l + a_0$$

где:

- A — равенство, определяющее изменение величины поверхности зоны разрушенной вокруг выработки, m^2 ,
 a_2, a_1, a_0 — коэффициенты, см. таблицы 8-12,
 l — ширина выработки, m ,
 γ — объёмный вес скал H/m^3 .

Для удобства пользования формулами 38-63 составлены номограммы приведённые на рис. 59-62.

Для данных природно-технических условий, т.е. для данной ширины выработки l и её поперечного сечения а также для скал с объёмным весом γ , с пластами падающими под углом $0, 45, 90^\circ$ по отношению к кровле (почве) выработки определяют величины A и Q .

В таблицах 13-17 сопоставлены величины нагрузок, действующих на крепь, рассчитанных по формулам Протодяконова, Салустовича, Цымбаревича а также по формулам приведенным в настоящей работе.

THE PROBLEM OF FORECASTING STATIC LOADS FOR STRUCTURES LINING UNDERGROUND EXCAVATIONS FOR GALLERIES AND CHAMBERS

S u m m a r y

To forecast reciprocal actions between supporting structures lining room and gallery excavations and orogenic rock it is necessary to know the load magnitudes that will act upon the supporting structure during the existance of the excavations. So far, the magnitudes and extent of rock deformation in the surroundings of gallery excavations, on which the load magnitudes acting upon the lining structure depend, are determined by methods developed by Protodiakonow, Cymbarewicz and Salustowicz.

Analysing the cooperation of the lining with the rock under different natural and mining conditions, premature deformation of the supporting lining structures can be observed in many cases, giving evidence of their unfavourable collaboration with the surrounding rock.

This suggests among others, imperfect design and localisation of the lining in the excavation, due to very approximative determination of the load magnitudes.

Experience shows, that the magnitudes of static loads as defined by the formulas developed by Protodiakonow, Cymbarewicz and Salustowicz have not

been confirmed by the practice in most of the cases. This concerns especially the determination of loads for excavation linings localised at depth's surpassing the validity limits set for the formulae mentioned above.

Apart from discrepancies between theoretical and practical load magnitudes acting upon the supporting structures of excavations, an additional source is the ignorance in those formulas of such essential factors as: the dipping angle of rock strata and the shape of the transversal cross-section of the excavations, which undoubtedly have their impact upon the extent of the decompressed zone, and consequently on the load magnitudes the lining structure will have to bear. The specified reasons have led to conclusions of taking up model investigations and trying to develop a new method permitting the calculation of decompressed zones in the vicinity of room and gallery excavations in dependence on rock types and dipping angle of rock strata, for underground gallery and chamber excavation types most frequently used in the mining practice.

Investigation work encompassed excavations with transverse cross-sections showing orthogonal, circular, elliptic and arch shapes as well as such approaching vault forms being significant for wall lining carried out in rock with strata showing dipping angles of 0° , 45° and 90° .

The investigations have been performed on a stand shown on drg. 8, with equivalent materials and carried out according to known principles of model analogy, see formulae 13 to 28.

Within the rock model, a net of measuring points have been stabilised, see drg. 10 and 13. Pressure been exerted by jacks (drg. 8) creating in the interior of the model stress intensifications of magnitudes required for achieving concentrations being close to critical stress concentrations. The model remained under such stresses for 24 hours.

After that time, hourly measurements (by photogrammatic method) of the displacement of the particular points have been carried out until a stabilisation of the changed positions of the measured points have been reached. Subsequently, imitating excavation openings of the required transverse cross-section have been manually driven into the model. Three hours afterwards, a consecutive measurement of the positions of the points was being performed, and subsequently two more measurements at hourly intervals. If no crackings appeared in the model strata after that investigation period, the load was augmented by 5 per cent against the primordial load, and the measurement cycle repeated. The investigations were interrupted, when a net of fissures appeared around the openings of the model. The magnitudes of vertical and horizontal movement of the measured points determined in the described manner, permitted the determination of the area of displacement of the measuring points around the excavations. This constituted the basis for the determination of the extension of the zone of rock deterioration at magnitudes of relative displacement (horizontal and vertical) during strata bending, being equal or greater than the critical

magnitudes. Surfaces characterised by such deformations were regarded as loosened respectively crushed areas. The critical magnitudes of relative deformation of the net of measurement points have been determined by laboratory methods, for bending beams of 100x50x50 mm dimensions, rigidly fastened on one end and subjected to a concentrated load applied to its unfastened end. On the basis of read-outs, the displacement vectors have determined in proportion, this giving in correlation with the model and excavations the area of point displacement. The external contour of the crushed model zone have been limited by a broken line, to be afterwards - in the mathematical considerations - reduced to a regular tapered curve being closest to the shape of the broken line.

Determined in the above described manner, the decompressed zones for analogical transverse crosssections and strata dipped at angles of 0° , 45° and 90° are indicated on drgs. 13 to 48.

The decompressed zone around the investigated excavations can be calculated according to formulae 38 to 63 and tables 3 to 7.

The magnitude of a static load Q , which will be acting on the lining structures of gallery excavations, can be calculated using formula:

$$Q = f [\varphi(\Delta)] \cdot \gamma$$

$$\varphi(\Delta) = a_2 l^2 - a_1 l + a_0$$

where:

- Δ = equation defining the change of the surface magnitude of the crushed zone around the excavation, in m^2 ,
- a_2, a_1, a_0 = equation coefficients, tables 8 to 12,
- l = excavation width, in m,
- γ = volume weight of rock in N/m^3 .

To simplify the use of formulae 38 to 63 nomograms shown on drgs. 59 to 62 have been prepared.

For the given natural/technical conditions, that is, for a given width l of excavation, and its transverse crosssection as well as the given rock of volume weight γ stratified at angles of 0° , 45° and 90° against the plane of the roof resp. floor of the excavation, the magnitude Δ is to be determined first and subsequently the magnitude Q .

Tables 13 to 17 demonstrate load magnitudes acting upon excavation lining structures as obtained from formulae recommended by Protodiakonow, Sałustowicz and Cymbarewicz as well as from those given in this paper.

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻ-
NA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- Gliwice** — Księgarnia Techniczna, ul. M. Strzody 14b;
Gliwice — Punkt sprzedaży Studenckiej Spółdzielni Pracy, ul. Wrocławska 4/6;
Katowice — Księgarnia nr 004, ul. Warszawska 11;
Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33;
Bytom — Księgarnia nr 048, pl. Kościuszki 4;
Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22;
Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2;
Rybnik — Księgarnia nr 126, Rynek 1;
Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7;
Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288;
Zawiercie — Księgarnia nr 250, ul. 3 Maja 11;
Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw PAN, Pałac Kultury i Nauki.

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.