

ELASTOOPTYCZNE BADANIE MODELOWE GÓROTWORU NA PRZYKŁADZIE SZYBU Z WYROBISKIEM

ROMAN STEFAN DOROSZKIEWICZ, JERZY LIETZ
i BOGDAN MICHAŁSKI (WARSZAWA)

W pracy przedstawiono trójwymiarowe badania elastooptyczne modelu w postaci bryły z pustkami obciążonej równomiernym ciśnieniem na powierzchni zewnętrznej. Model był odwzorowaniem pewnego obszaru górotworu osłabionego skrzyżowaniem szybu z wyrobiskiem poziomym. Stosowano technikę «zamrażania naprężeń», obciążając model hydraulicznie w specjalnym pojemniku. Wyniki podano w postaci wykresów naprężeń w charakterystycznych przekrojach. Praca poprzedzona jest krótkim omówieniem ważniejszych publikacji dotyczących elastooptycznych badań górotworu dla potrzeb górnictwa.

1. ELASTOOPTYCZNE BADANIA MODELOWE GÓROTWORU

Metody badań modelowych, a w szczególności metody elastooptyczne, znalazły uznanie jako wartościowe techniki badań złożonych zagadnień mechaniki górotworu występujących w górnictwie kopalnianym.

Na podstawie wyników pomiarów odkształceń masywów skalnych, naruszonych wyrobiskami górniczymi stwierdzono, że w wielu przypadkach omawiane zagadnienia można rozwiązywać przy założeniach teorii sprężystości, na których oparta jest klasyczna elastoplastyka. Badania takie umożliwiają poznanie, przynajmniej od strony jakościowej, rozkładów naprężeń w górotworze i ich zmian, wywołanych wyrobiskami górniczymi w postaci szybów i chodników. Dają one przez to podstawę wyboru racjonalnych sposobów konstruowania i wzmacniania obudowy szybów i chodników i bezpiecznego ich wymiarowania wraz z ustaleniem wzajemnych odstępów, zapewniających maksymalną stateczność ich form początkowych i bezpieczeństwo ze względu na zniszczenie obudowy.

Badania elastooptyczne górotworu są prowadzone w dwojaki sposób: 1) przez modelowanie za pomocą materiału elastooptycznego ośrodków górotworu naruszonego wyrobiskami górniczymi i szybami wydobywczymi; 2) przez modelowanie ośrodków górotworu i ewentualnie konstrukcji obudowy szybów i chodników — za pomocą modeli wykonanych z materiałów nieelastooptycznych, o zbliżonych do rzeczywistych charakterystykach i strukturach układów «górotwór-obudowa-model». Modele te pokrywa się cienką warstwą materiału elastooptycznego. Ten ostatni kierunek badań reprezentowany między innymi przez Van Duzoma, Jacobiego i Ewertinga oraz Jenkinsa jest znacznie mniej rozwinięty i bywa stosowany

głównie w analizach statycznych i wytrzymałościowych różnych rodzajów i typów konstrukcji obudowy szybów i chodników górniczych.

H. Van Duzom badał modele obudowy wyrobisk górniczych pokryte warstwą elastooptyczną, obserwując rozkład naprężeń powierzchniowych w obudowie wywołanych różnymi oddziaływaniami górotworu [1].

O. Jacobi i S. Ewerting badali modele kilku typów obudowy w różnych warunkach oddziaływań górotworu; dążyli oni do ustalenia wpływu kształtu przekroju i sztywności obudowy na stopień stateczności obudowy i otaczającego górotworu. Masy górotworu modelowano używając mieszanin gipsu i betonu, natomiast obudowę wykonywano z aluminium. Autorzy ci zastosowali obciążenia wywołujące parcie ośrodka na obudowę o wartości 30 kG/cm^2 , zbliżone do rzeczywistych naprężeń, występujących w warunkach naturalnych [1]. Jenkins badał rozkład naprężeń w podłożu górotworu od nacisku części oporowych obudowy szybów górniczych przy różnych grubościach tego podłoża [1].

W dużo większym stopniu rozwinięte są prace pierwszego rodzaju, to jest modelowanie za pomocą materiałów elastooptycznych ośrodków górotworu wraz z wyrobiskami górniczymi w postaci otworów wykonywanych w modelach. W tej grupie na wyróżnienie zasługują badania stanu naprężenia górotworu wywołanego wyrobiskami górniczymi — na modelach elastooptycznych, odwzorowujących pochyły, warstwowy ośrodek górotworu. Badania prowadzone były przez A. M. Iltajna i W.P. Trumbačova. Wyróżniają się też badania naruszenia zwartości masywu górotworu w obszarach wyrobisk i jego wpływ na obudowę. Te ostatnie wykonał F. Schnerman [1] na modelach z materiałów elastooptycznych o strukturach ciągłych, wielowarstwowych, ze szczelinami.

Zagadnieniem szczególnie ważnym dla praktyki górniczej jest zagadnienie stateczności masywu górotworu — podczas wykonywania zespołów szybów. Nieodpowiednie zaprojektowanie i usytuowanie szybów, szczególnie w masywach górotworu o niezbyt dużym stopniu stateczności, może spowodować znaczne odkształcenie górotworu (do wyłomów włącznie), co w konsekwencji może doprowadzić do zniszczenia obudowy i zawałów. Modelowe badania elastooptyczne dają jakościowe informacje o stanie naprężenia w ośrodkach naturalnych górotworu i pozwalają na ocenę spiętrzenia naprężeń i charakteru nierównomierności rozkładu naprężeń przy powstawaniu wyłomów w masywie, realizacji wyrobisk i szybów. Wyjaśnienie niektórych z tych zjawisk miały na celu badania elastooptyczne, prowadzone w Instytucie Górniczym im. Plechanova [2]. Rozkłady naprężeń w obszarach górotworu otaczających szyb, ich zmiany wywołane wyrobiskiem o przekroju prostokątnym o różnym pochyleniu i przy różnej odległości tego wyrobiska od osi szybu — były badane na modelach elastooptycznych przez IEVLEVA [3]. Elastooptyczne badania modelowe zjawisk mechanicznych, występujących w naturalnym górotworze mogą dawać jedynie przybliżony obraz rozkładu naprężeń. Stopień tego przybliżenia zależy od wielu czynników; na niektóre z nich zwraca uwagę SIBSON [4].

Dużą trudność w technice modelowej sprawia adekwatne modelowanie podziemnego układu obciążeń. Na rozpatrywany obszar górotworu działają siły masowe ciężaru własnego oraz zewnętrzne siły powierzchniowe. Przy modelowaniu obszaru

leżącego na dużej głębokości pomija się wpływ sił masowych, rozpatrując jedynie siły zewnętrzne. Modelując obszary przy powierzchni, można siły ciężkości odwzorować za pomocą sił masowych, powstających w wirówce [5]. Za pomocą płaskich modeli elastoptycznych można badać obszary górotworu, w których usprawiedliwione jest przyjęcie płaskiego stanu odkształcenia. Przy rozwiązywaniu zagadnień trójwymiarowych, których nie można sprowadzić do zadania płaskiego, korzystamy w badaniach górotworu przeważnie z techniki «zamrażania naprężeń».

W przypadku płaskich badań modelowych górotworu należy dążyć do stosowania modeli o odpowiednio dobranych wymiarach. Tak np. STERNBERG i SADOWSKY [6] wykazują, że przy zwiększeniu stosunku grubości modelu do średnicy otworu, naprężenia styczne w obszarach przyległych do otworów zależne są od współczynnika Poissona i mogą znacznie różnić się od naprężeń występujących w masywie naturalnym o innym współczynniku odkształcalności poprzecznej. Niektóre wyżej wymienione niedoskonałości metod modelowych muszą być uwzględnione w badaniach modelowych górotworu, zarówno przy ustalaniu programu badań jak i przy interpretacji wyników i wyciąganiu wniosków.

Przedstawione tutaj przykłady wykorzystania metod elastoptycznych do rozwiązywania zagadnień mechaniki górotworów kopalnianych świadczą o celowości rozwijania tych metod oraz o ich przydatności. W przypadku procesów tak skomplikowanych, jak procesy zachodzące w górotworze, otrzymanie choćby nawet przybliżonych informacji o stanie naprężenia jest cenne. Wyniki uzyskiwane za pomocą tych metod, poza bezpośrednim wykorzystaniem w praktyce górniczej, mogą mieć także znaczenie przy ustalaniu racjonalnego programu kosztownych badań w warunkach rzeczywistych.

2. PRZYKŁAD SKRZYŻOWANIA SZYBU Z WYROBISKIEM

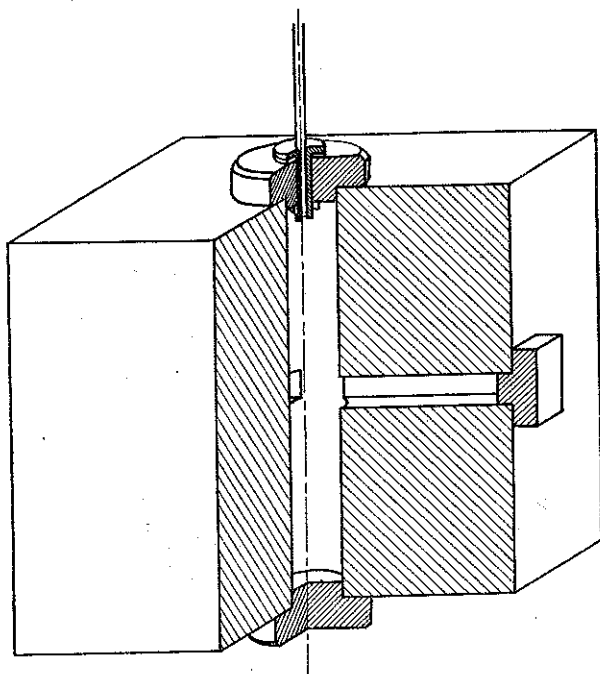
Celem badania przeprowadzonego przez autorów było określenie stanu naprężenia w otoczeniu przecięcia się pionowego szybu o przekroju kołowym z poziomym wyrobiskiem o przekroju prostokątnym, przy czym osie szybu i wyrobiska leżały w jednej płaszczyźnie. Przyjęto następujące podstawowe założenia modelowania: 1) ośrodek jest liniowo sprężysty; 2) rozpatrywany jest obszar górotworu, leżący na tak dużej głębokości, że stan naprężenia w pewnej odległości od szybu i wyrobisk traktować można jako parcie hydrostatyczne.

Postawiony problem jest oczywiście trójwymiarowy i wymaga zastosowania jednej z metod elastoptycznych badań przestrzennych. Najważniejsze z nich — to metoda «zamrażania naprężeń», metoda warstwy czulej i metoda światła rozproszonego. Można wykazać, że najwłaściwszą w opisywanym tutaj zagadnieniu jest metoda «zamrażania naprężeń», gdyż dostarczyć może ona z jednego modelu najwięcej informacji przy najwyższej zarazem dokładności.

Opisywane tutaj badanie traktowane jest jako pierwsze z szeregu dalszych, dotyczących stanu naprężenia w górotworze i dlatego zwrócono szczególną uwagę na technologię wykonania modeli i technikę badania. Należało wykonać model z materiału elastoptycznego w postaci bryły, wewnątrz której znajdują się kanały

modelujące szyb i wyrobisko. Następnie model ten trzeba obciążyć na powierzchni zewnętrznej równomiernym ciśnieniem z tym zastrzeżeniem, że wewnątrz kanałów zachowuje się ciśnienie atmosferyczne. Tak obciążony model musi zostać nagrany do temperatury ok. 130°C , przetrzymany w tej temperaturze przez kilka godzin, a następnie bardzo wolno i równomiernie schłodzony do warunków pokojowych. Utrwalone są w ten sposób odkształcenia, a związany z nimi efekt optyczny badany jest w różnych przekrojach metodami elastoptycznymi — po pocięciu modelu na warstewki według starannie opracowanego programu.

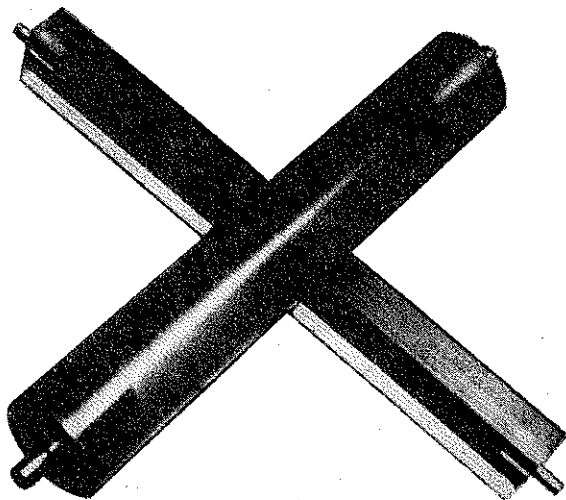
Model elastoptyczny w kształcie sześciangu wykonano z żywicy epoksydowej araldit B techniką odlewania na gorąco (rys. 1). Pierwszym etapem było sporządzenie modelu rdzenia odlewniczego, dającego odwzorowanie szybu i wyrobiska w skali 1:280 (rys. 2). Wykonano go z twardej żywicy epoksydowej, stosując obróbkę mechaniczną i klejenie. Przez zaformowanie tego modelu w gipsie otrzymano złożoną z dwu części formę gipsową (rys. 3).



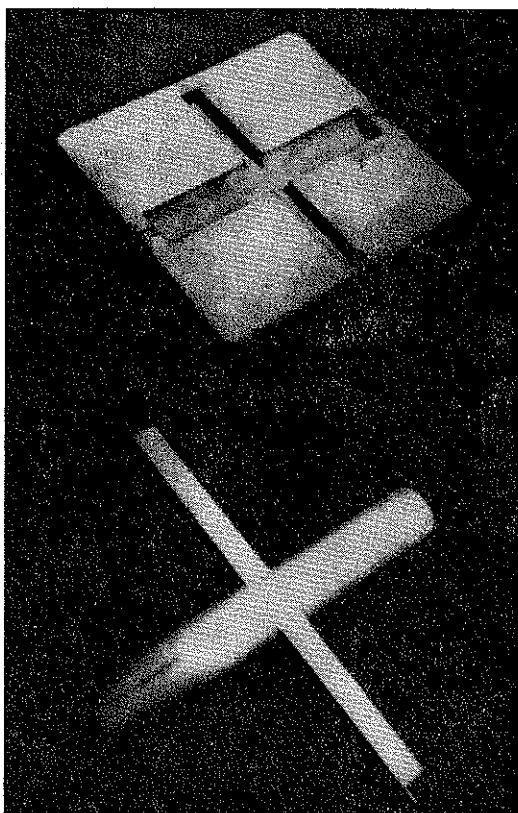
Rys. 1.

Po wysuszeniu formy umieszczono w niej rozbierny szkielet metalowy i następnie odlano właściwy rdzeń odlewniczy z kauczuku silikonowego. Kauczuk silikonowy jako materiał rdzenia jest odporny na wysoką temperaturę i daje się łatwo wykrużyć z gotowego odlewu.

Formę do odlania modelu wykonano z blach mosiężnych łączonych przez lutowanie. Wnętrze formy pokryto roztworem kauczuku silikonowego CKT w toluenie i do formy wmontowano rdzeń.

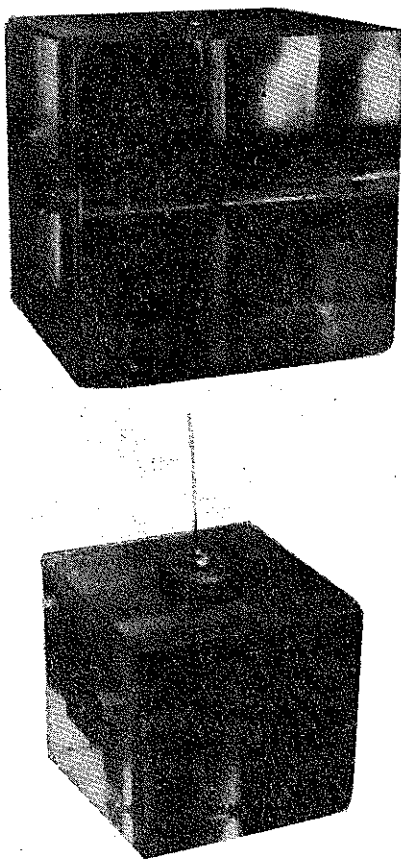


Rys. 2.



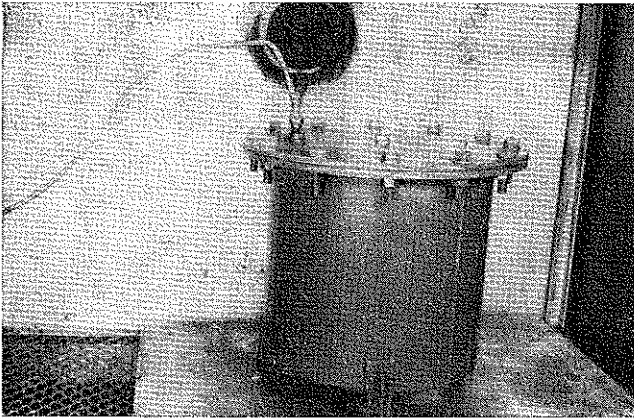
Rys. 3.

Do gorącej formy wlano gorącą żywicę araldit B z dodatkiem 20% bezwodnika kwasu maleinowego, jako utwardzacza. Odlew odpowietrzano w komorze próżniowej. Proces polimeryzacji prowadzono przez 48 godzin w temperaturze 95°C, następnie wygrzewano przez 6 godzin w temperaturze 120°C, po czym odlew schłodzono do temperatury pokojowej z prędkością 5°C na godzinę. Otwory wyjścia szybu i wyrobiska na powierzchnię modelu zaślepiono wklejonymi korkami, aby można było z zewnątrz model obciążyć hydraulicznie. Aby zapewnić wewnątrz szybu stałe ciśnienie atmosferyczne, przez jeden z korków wyprowadzono ciekłą rurkę służącą do połączenia wnętrza modelu z atmosferą. Tak sporządzony model przedstawia rysunek 4.

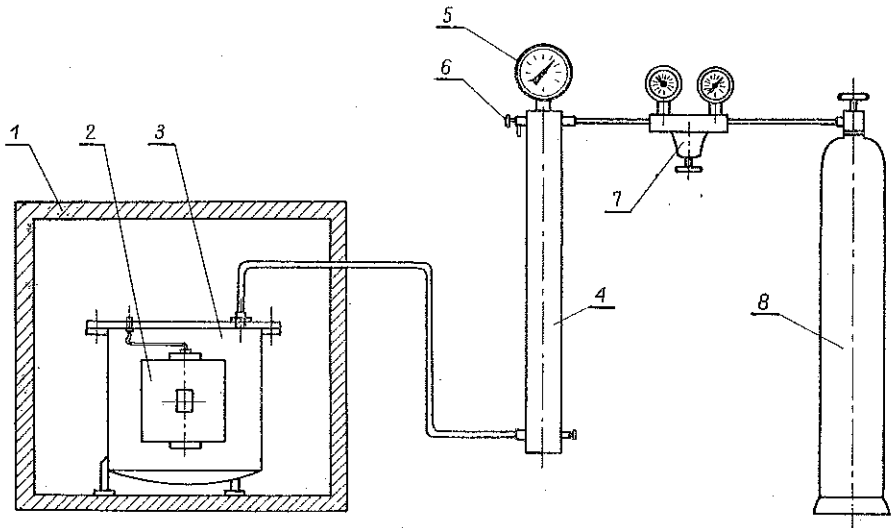


Rys. 4.

Podstawową częścią urządzenia do hydraulicznego obciążenia modelu jest stalowy spawany zbiornik ciśnieniowy zamknięty szczelnie pokrywą (rys. 5). Zbiornik ten wypełniony gliceryną można wstawić do komory termicznej i w ten sposób zmieniać jego temperaturę według ustalonego programu. Schemat urządzenia użytego do «zamrażania naprężeń» w modelu przedstawia rysunek 6.



Rys. 5.



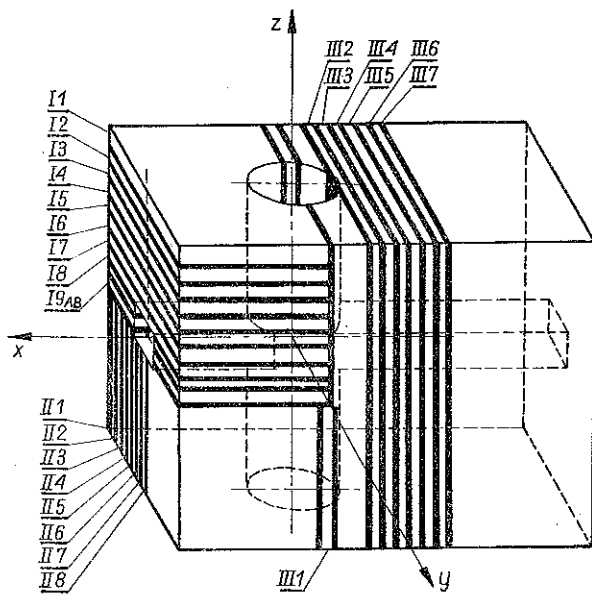
Rys. 6.

Model 2 pogrążony jest w glicerynie, w zamkniętym zbiorniku 3. Wnętrze modelu cienką rurką wyprowadzoną przez pokrywę łączy się z atmosferą. Zbiornik zamknięty jest w komorze 1 z programowaną regulacją temperatury. Kolumna 4 służy do przeniesienia ciśnienia gazu (azotu) na ciecz (glicerynę) wypełniającą zbiornik. W dolnej części kolumny znajduje się ciecz, w górnej gaz. Znaczna rozszerzalność termiczna gliceryny wywołuje zmiany poziomu cieczy w kolumnie. Ciśnienie ustala się reduktorem 7 według wskazań dokładnego manometru 5. Zawór 6 zapewnia stały, niezmienny wpływ gazu, co polepsza stabilizację ciśnienia. Całość zasilana jest butlą ze sprężonym azotem 8.

Zbiornik ciśnieniowy z modelem nagrzano do temperatury 130°C i utrzymywano tę temperaturę przez 20 godzin. Obniżanie temperatury odbywało się począt-

kowo z prędkością 1°C na godzinę, a poniżej 100° z prędkością $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Utrzymywano przez cały czas stałe ciśnienie $3\text{ kG}/\text{cm}^3$ z dokładnością 3% .

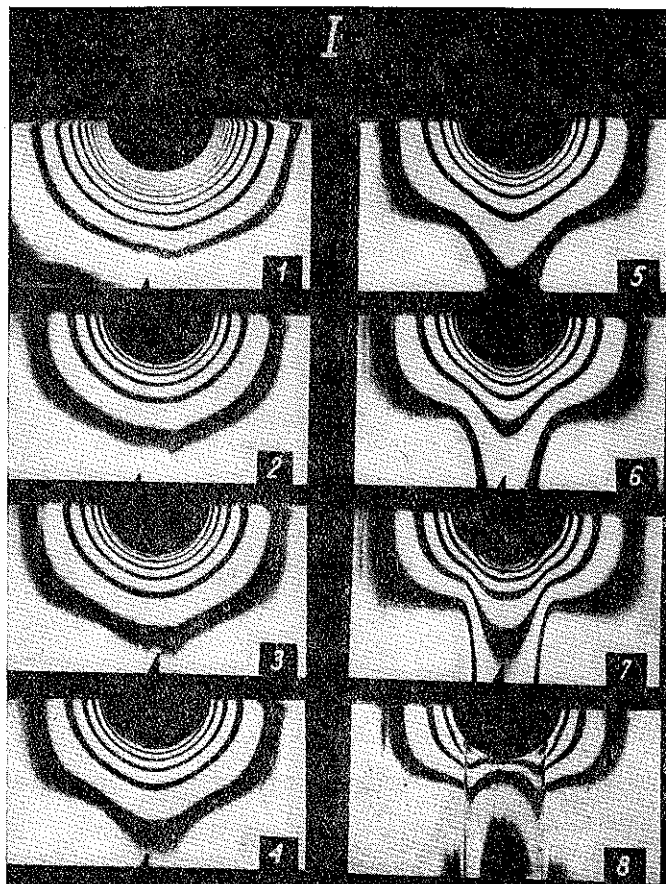
Po tym procesie model został pocięty na warstewki. Na rysunku 7 przedstawiono układ wszystkich cięć (obszary czarne) i oznaczenia wszystkich wyciętych do zbadania warstewek. Dzięki temu, że badany model miał trzy płaszczyzny symetrii, udało się uzyskać wszystkie warstewki potrzebne do analizy przez przecięcie jednego tylko zamrożonego modelu.



Rys. 7.

Przy opracowaniu wykresów naprężeń przyjęto jako zasadę, że wszystkie wartości naprężeń odniesione będą do jednostkowego naprężenia hydrostatycznego w strefie oddalonej od miejsca przecięcia szybu i wyrobiska. Stąd też dla wycechowania materiału modelu i określenia stałej izochromy, konieczne było zbadanie warstewki prostopadłej do szybu w przekroju oddalonym od miejsca przecięcia szybu z wyrobiskiem, w którym panuje hydrostatyczny stan naprężenia. Jak wiadomo z teorii sprężystości, współczynnik spiętrzenia naprężeń w tarczy z kołowym otworem podlegającej dwuosowemu obciążeniu wynosi 2. Porównując tę liczbę z wartością efektu optycznego na brzegu szybu i uwzględniając grubość warstewki, można określić, jakiemu naprężeniu odpowiada izochroma pierwszego rzędu.

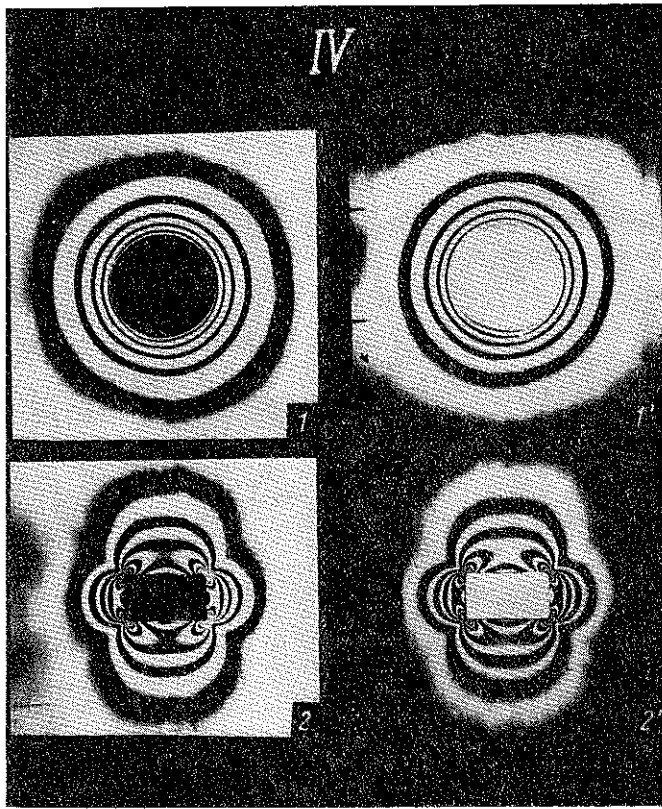
Na podstawie otrzymanych zdjęć izochrom dla poszczególnych warstewek (rys. 8, 9 i 10) sporządzono wykresy izochrom dla wybranych warstewek należących do wszystkich trzech podstawowych kierunków przekrojów I, II i III. Stanowiły one punkt wyjścia przy sporządzaniu wykresów naprężeń brzegowych i dawały obraz zmienności stanu naprężenia w pobliżu przecięcia szybu z wyrobiskiem. Zdjęcia izochrom pozwoliły sporządzić wykresy naprężeń brzegowych w prost-



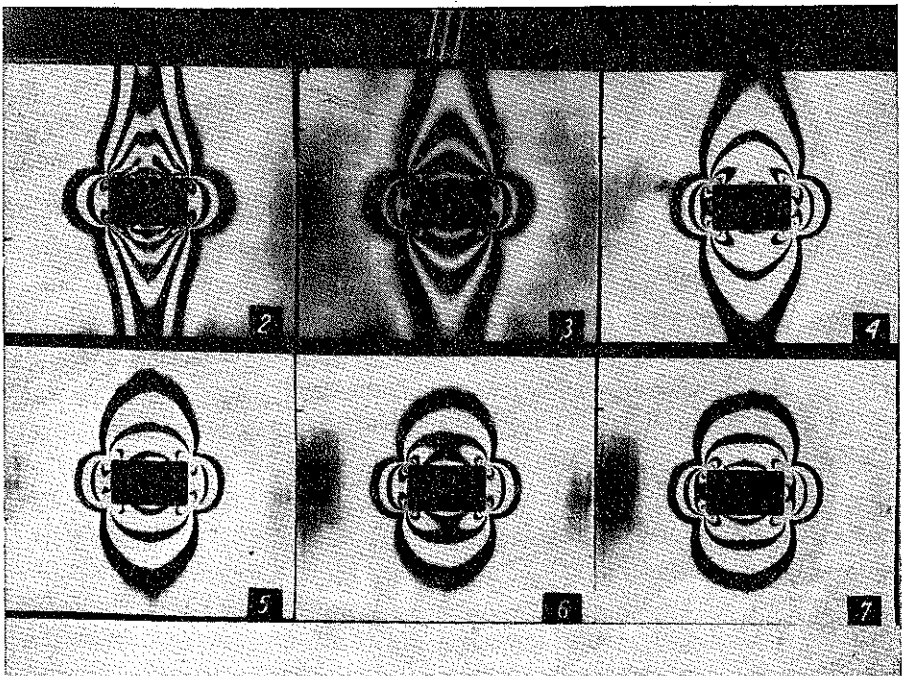
Rys. 8.

padłych przekrojach szybu, położonych w różnych odstępach od miejsca skrzyżowania osi szybu i wyrobiska (rys. 11). Ilustrują one charakterystyczną zmianę naprężeń w miarę zbliżania się do wyrobiska.

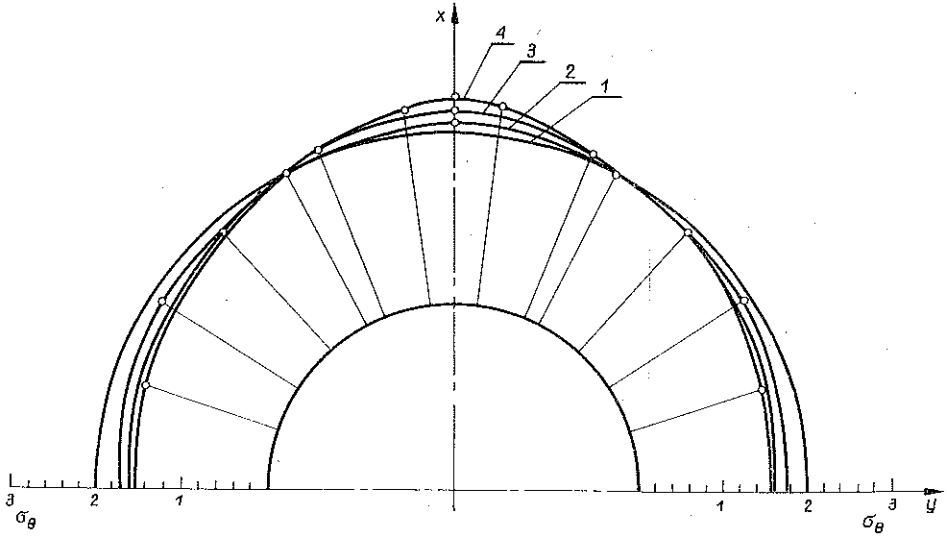
Załączone wykresy naprężeń brzegowych w dwóch przekrojach prostopadłych do osi wyrobiska (rys. 12), pozwalają ocenić, w jakim stopniu zmieniają się wartości tych naprężeń w miarę zbliżania się do szybu. Podstawowe znaczenie mają wykresy naprężeń brzegowych dla trzech przekrojów symetrii, przedstawione na rysunkach 13-15.



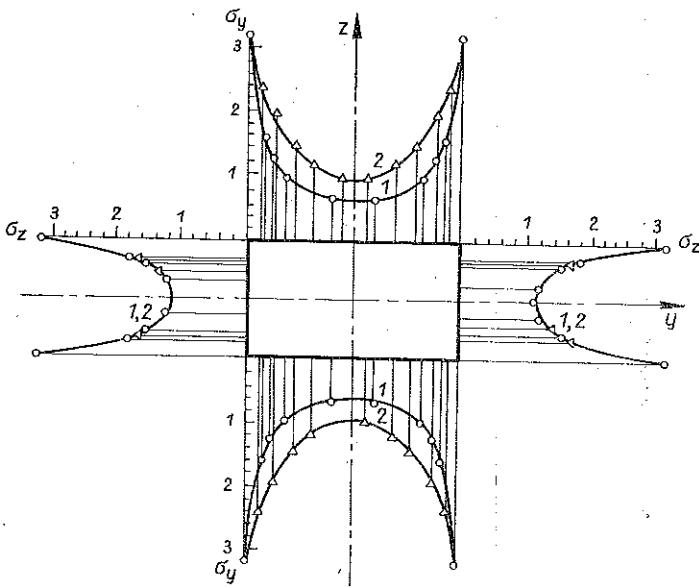
Rys. 9.



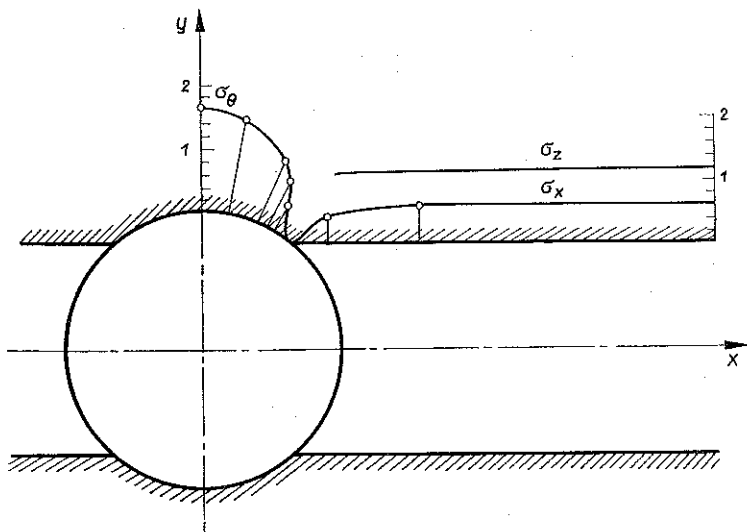
Rys. 10.



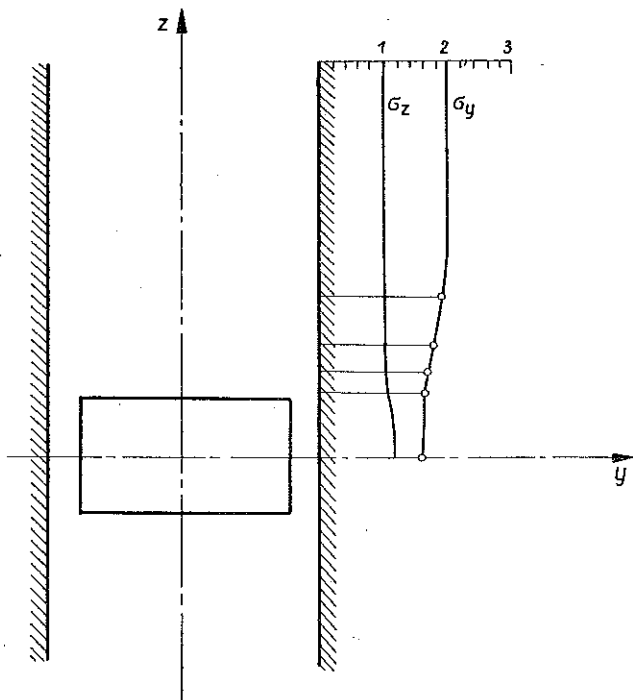
Rys. 11.



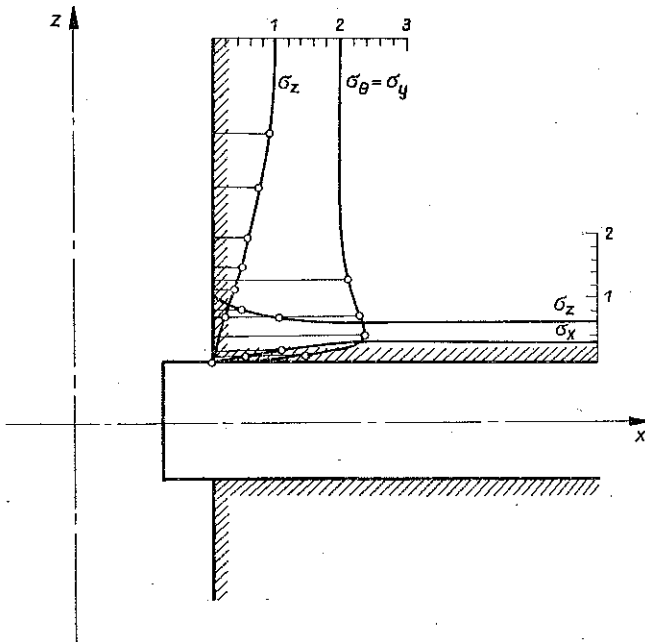
Rys. 12.



Rys. 13.



Rys. 14.



Rys. 15.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. E. S. PRIGOŽIN, *Parížskij kongress po gornomu davleniju.*
2. E. A. ZIMINA, E. N. TARASENKO, *Issledovanie napriazennogo sostoianija porod vokrug vertikalnych vyrabotok metodom fotouprugosti, Zapiski Leningradского ordenov Lenina i Trud. Krasn. Znam. Gornogo Inst. im. G. V. Plechanova, 57, 1, 1969.*
3. G. A. IEVLEV, *Isseldovanie metodom fotouprugosti vliania očistnoj vyrabotki na raspredelenie napriazėnij vokrug vertikalnogo ŗachtного stvola, Gornoje Davlenie, 67, 92-105, 1967.*
4. J. N. S. SIBSON, *Technical note, photoelastic investigation of shaft stress changes due to mining, Institution of Mining and Metallurgy, 77, 734, 1968.*
5. E. HOEK, *The design of a centrifuge for the simulation of gravitational force fields in mine models, J. S. Afr. Inst. Min. Metal., 65, 9, 455-87, 1965.*
6. E. STERNBERG, M. A. SADOWSKY, *Three-dimensional solution for the stress concentration around a circular hole in a plate of arbitrary thickness, J. Appl. Mech., 16, 27-38, 1949.*

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРУГИХ МОДЕЛЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ШАХТНОГО СТВЛА С ВЫРАБОТКОЙ

В работе представлены трехмерные эластооптические исследования модели, в виде тела с пустотами, нагруженной равномерным давлением на внешней поверхности. Применен поляризационно-оптический метод, техника замораживания напряжений, нагружая модель гидравлически в специальном контейнере. Результаты приведены в виде диаграмм

напряжений в характеристических сечениях. Работа начинается кратким обсуждением более важных публикаций по фотоупругости, касающихся исследований горных пород для потребностей горного дела.

SUMMARY

PHOTOELASTIC MODEL INVESTIGATION OF ROCKS ON AN EXAMPLE OF CROSSING OF SHAFT WITH EXCAVATION

A three-dimensional photoelastic model investigation of a body with voids loaded by uniform pressure on the external surface is presented. The model represents a certain rock region weakened by the crossing of a shaft with horizontal excavation. The «stress freezing» technique was applied by loading the model hydraulically in a special container. The results are presented in the form of stress diagrams in the characteristic cross sections. In the introduction a short review of the most important publications dealing with photoelastic rock investigations in mining is given.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 15 października 1976 r.
