

Mirosław Chudek, Ryszard Żyliński

ZAGADNIENIE WYTRZYMAŁOŚCI SKAŁ ZAMROŻONYCH  
W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zależności  $\sigma - \epsilon$  w trójosiowym stanie napięcia.

W zakończeniu dokonano krótkiej analizy uzyskanych rezultatów oraz podano szereg uwag i wniosków w zakresie dalszych prac badawczych.

1. Wstęp

Najbardziej skuteczną i rozpowszechnioną metodą głębinienia szybów, w trudnych warunkach hydrogeologicznych, jest metoda sztucznego zamrażania skał. Istota tej metody polega na wytwarzaniu wokół zarysu projektowanego szybu ścianki - cylindra zamrożonych skał przez odprowadzenie z górotworu odpowiedniej ilości ciepła. Powstający w ten sposób cylinder skał zamrożonych ma za zadanie przede wszystkim zabezpieczyć przodek szybowy przed wdarciami się do niego wody oraz przejąć istniejące poziome ciśnienie skał ciekłych czy wody. Koniecznym staje się zatem określenie optymalnej grubości płaszcza skał zamrożonych - zapewniającego odpowiedni stopień bezpieczeństwa pracy załogi, a także odpowiednie wskaźniki ekonomiczne. Problem ten jest rozwiązywany dwoma ściśle uzupełniającymi się drogami:

- doskonalenie matematycznych metod obliczeniowych w oparciu o przyjęte uproszczone schematy obliczeniowe grubości płaszcza zamrożonych skał,
- dokładne poznanie własności fizyko mechanicznych.

2. Wytrzymałość skał zamrożonych w świetle dotychczasowych badań i rozważań teoretycznych

Zagadnienie określenia wytrzymałości skał zamrożonych było przedmiotem badań laboratoryjnych oraz opracowań teoretycznych. Należy tu podkreślić, że istniejące w tej chwili opracowania w tym zakresie należą do uczonych rzadziej. W Polsce przeprowadzono również badania własności skał zamrożonych, a wyniki ich przedstawiono w pracy [2] i [6].

Na podstawie dotychczas wykonanych badań w tym zakresie stwierdzono że wytrzymałość skał zamrożonych jest funkcją takich czynników jak: tempera-

tura, porowatość skał, wilgotność, uziarnienie, czas działania obciążenia oraz warunków, w jakich zachodzi zamrażanie.

W zakresie tym wyodrębniono szereg podstawowych problemów, które są przedmiotem prac badawczych. Do najważniejszych z nich należą:

- warunki tworzenia się kriogenicznej tekstury skał, jej wpływ na wytrzymałość doraźną i pełzanie zamrożonych skał,
- proces deformacji zamrożonych skał oraz czynniki mające wpływ na szybkość i wielkość deformacji,
- wytrzymałość doraźna i długotrwała zamrożonych skał oraz czynniki warunkujące wielkość spadku wytrzymałości doraźnej po upływie określonego przedziału czasu.

W opracowaniu niniejszym rozpatrzono jedynie zagadnienie wpływu zmiany na prężen na wielkość i charakter odkształceń próbek zamrożonych skał.

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań laboratoryjnych wpływu na prężen na zmianę odkształceń ustalono, że

$$\epsilon_0 = A_0 \xi^m \quad \text{przy } t = 0$$

$$\epsilon_t = A_t \xi^m \quad \text{przy } t > 0,$$

gdzie

$m$  - tzw. współczynnik wzmocnienia

$A_t$  - współczynnik deformacji zależny od czasu działania obciążenia.

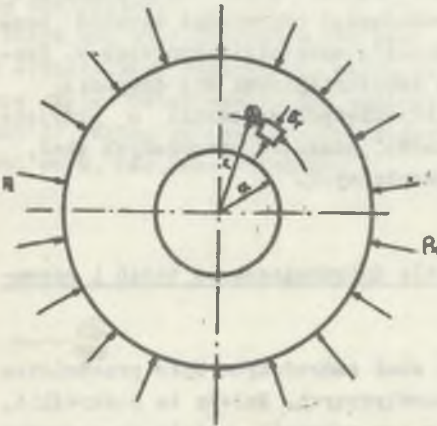
Współczynnik ten przy  $0 < t < \infty$  zmienia się w przedziale

$$A < A_t < A_\infty$$

$t$  - czas działania obciążenia.

Analizując stan naprężeń w cylindrze zamrożonych skał należy stwierdzić, że na płaszczyźnie odsłonięcia - ociosie, rozpatrywanej jako nieskończenie małej kostce, panuje płaski stan naprężeń (rys. 1) o składowych  $\epsilon_t$  i  $\epsilon_z$   $\epsilon_r = 0$ .

Jeżeli będziemy rozpatrywać stan naprężeń w identycznej kostce skalnej wyciętej z przestrzeni między ściankami cylindra mrożonych skał, to panujący stan naprężeń jest stanem trójosiowym o składowych  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_r$  i  $\epsilon_z$ .



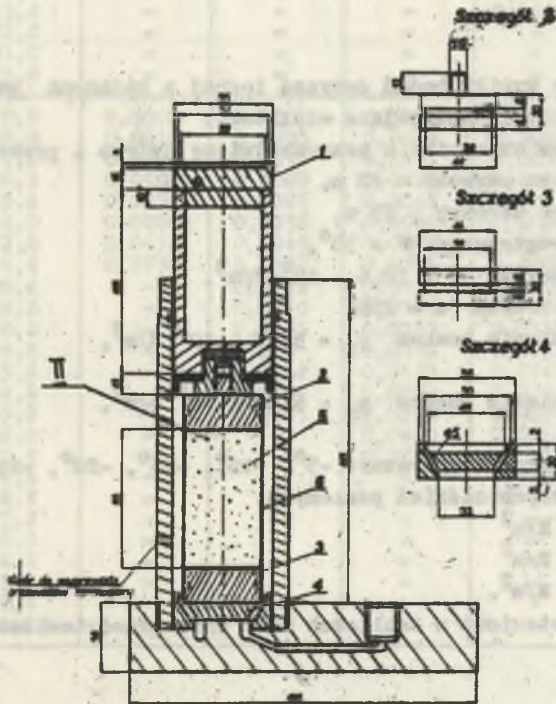
Rys. 1. Schemat rozkładu naprężeń w cylindrze skalnym

Dotychczasowe badania wytrzymałościowe skał mrożonych wykonywane były w Polsce w jednoosiowym stanie naprężeń [2], [6]. Uzyskane w ten sposób parametry wytrzymałościowe nie odpowiadały zatem faktycznie istniejącemu stanowi naprężeń, dlatego też w Instytucie Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni podjęto próbę określenia zależności  $\sigma - \epsilon$  w trójosiowym stanie napięcia wykonując serię badań laboratoryjnych.

### 3. Sposób wykonania badań laboratoryjnych

Badania własności wytrzymałościowych skał zamrożonych miały na celu określenie zależności  $\sigma - \epsilon$  oraz doraźnej wytrzymałości skał zamrożonych w odniesieniu do zmiennych temperatur zamrażania. Badania przeprowadzono w trójosiowym stanie napięcia dla przyjętego układu ciśnienia pionowego i poziomego, przy czym wielkość ciśnienia poziomego określono na podstawie profilu litologicznego otworu, z którego pobrano próbki.

Zasadniczym elementem stoiska badawczego był aparat do badania skał (rys. 2), którego część II dolna znajdowała się w komorze adyabatycznej



Rys. 2. Schemat aparatu do badań skał zamrożonych

wypełnionej płynem "Borygo". W komorze tej znajdował się parownik układu mroźniowego, dzięki któremu obniżano temperaturę płynu "Borygo" do żądanej wielkości.

Płyn ten był także w układzie dolnego cylindra, co pozwalało na utrzymanie żądanej temperatury również w samej próbce.

Do badań użyto próbki skalne w kształcie walca o wymiarach  $d = 40$  mm;  $h = 80$  mm.

Próbki skalne mrożone w aparacie typu "Friger", gdzie panowała temperatura taka, w jakiej dane próbki były później badane w stanowisku do badań wytrzymałościowych.

Po zamrożeniu próbek powierzchnię ich szlifowano, a następnie wstawiano próbkę do lodówki w celę ponownego zamrożenia. Następnie próbki [5] po założeniu specjalnej koszulki gumowej (6) wstawiano do aparatu. W czasie badań mierzono następujące wielkości:

- ciśnienie pionowe,
- ciśnienie poziome - utrzymywane jako stałe,
- odkształcenie pionowe ściskanej próbki,
- temperaturę próbki,
- odstępy czasowe.

#### 4. Wyniki badań

Przedstawione wyniki badań dotyczą jednej z badanych warstw skalnych, którą charakteryzują następujące wielkości:

- piasek o różnym uziarnieniu przewarstwiony twardym i przerostami mułku,
- głębokość stropu warstwy - 40 m,
- głębokość spągu warstwy - 53 m,
- kąt tarcia wewnętrzznego  $\varphi = 30^\circ$ ,
- ciężar objętościowy  $\gamma = 18,6 \cdot 10^6$  N/m<sup>3</sup>,
- wilgotność naturalna  $w = 25\%$ ,
- całkowite ciśnienie boczne  $p_x = 3,57 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  
w stropie
- całkowite ciśnienie boczne  $p_x = 6,82 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  
w spągu
- zakres stosowanych temperatur:  $-5^\circ$ ,  $-12^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-25^\circ$ .
- zakres stosowanych ciśnień poziomych:
  - $p_x = 15 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>
  - $p_x = 10 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>
  - $p_x = 5 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>.

Wyniki badań zestawiono w tablicach nr 1 oraz przedstawiono na wykresach rys. 3-7.

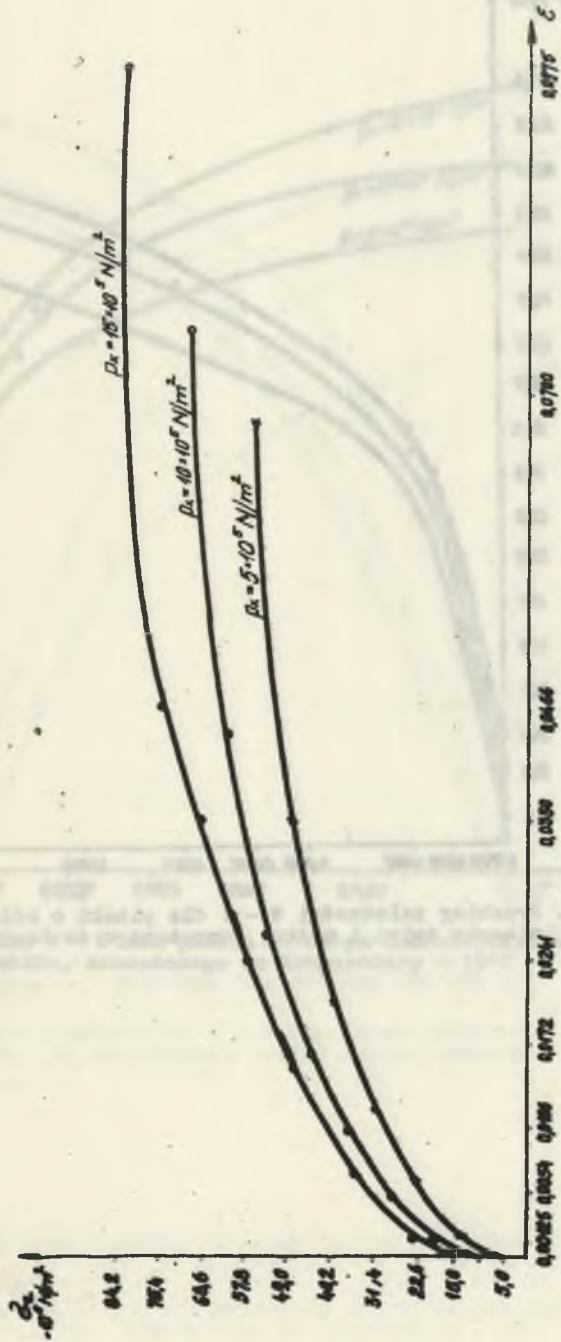
Tablica 1

## Wyniki badań wytrzymałości owych skał zamrożonych

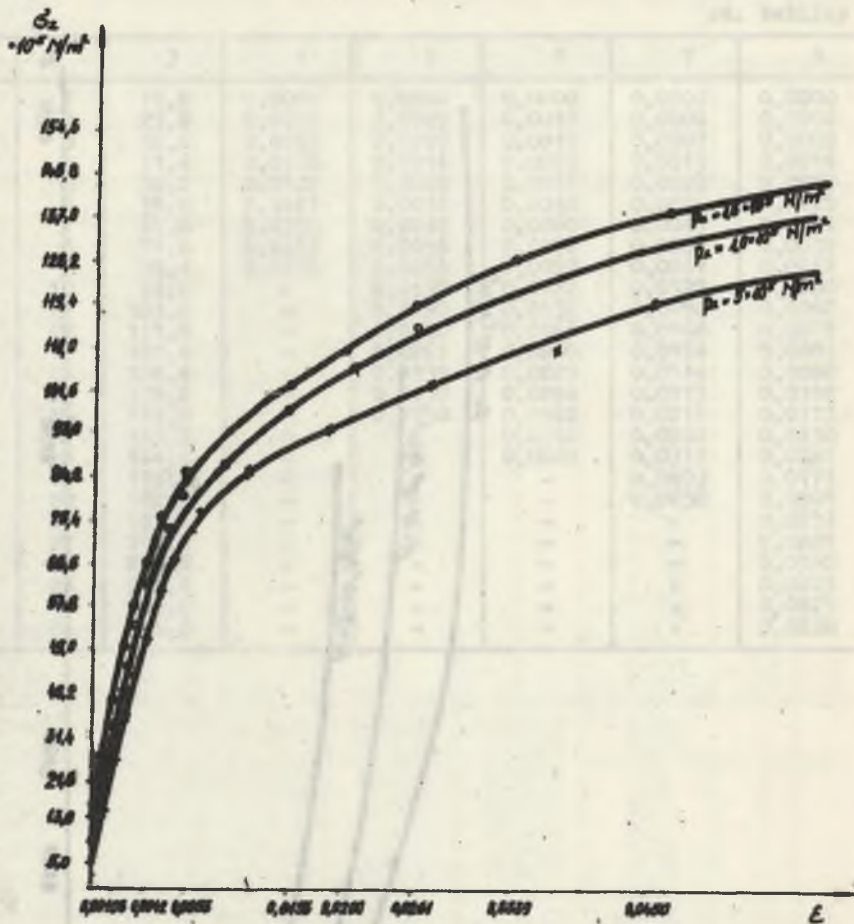
$P_x$	Lp.	$10^5 \text{ N/m}^2$ $\sigma_z$	$t = - 5^\circ$	$t = - 12^\circ$	$t = - 15^\circ$	$t = - 20^\circ$	$t = - 25^\circ$
			$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$	$\epsilon_1$
1	2	3	4	5	6	7	8
$P_x = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	1	3,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	13,8	0,0015	0,0008	0,0012	0,0007	0,00016
	3	22,6	0,0062	0,0015	0,0027	0,0022	0,00028
	4	31,4	0,0118	0,0022	0,0037	0,0035	0,00032
	5	40,2	0,0206	0,0028	0,0052	0,0050	0,0051
	6	49,0	0,0350	0,0037	0,0065	0,0065	0,0075
	7	57,8	0,0680	0,0050	0,0077	0,0078	0,0091
	8	66,6	-	0,0062	0,0097	0,0090	0,0106
	9	75,4	-	0,0077	0,0112	0,0107	0,0115
	10	84,2	-	0,0114	0,0132	0,0125	0,0127
	11	93,0	-	0,0175	0,0152	0,0138	0,0142
	12	101,0	-	0,0250	0,0181	0,0157	0,0160
	13	110,6	-	0,0356	0,0237	0,0178	0,0169
	14	119,4	-	0,0431	0,0300	0,0200	0,0187
	15	128,2	-	0,0625	0,0412	0,0229	0,0206
	16	137,0	-	-	0,0670	0,0272	0,0237
	17	145,8	-	-	-	0,0325	0,0262
	18	154,6	-	-	-	0,0381	0,0307
	19	163,4	-	-	-	0,0488	0,0350
	20	172,2	-	-	-	-	0,0412
	21	181,0	-	-	-	-	0,0512
	22	189,8	-	-	-	-	0,0738
$P_x = 10 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	1	10,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	18,8	0,0014	0,0005	0,0010	0,0006	0,0010
	3	27,6	0,0048	0,0012	0,0017	0,0019	0,0019
	4	36,4	0,0102	0,0020	0,0022	0,0034	0,0030
	5	45,2	0,0178	0,0025	0,0047	0,0046	0,0039
	6	54,0	0,0260	0,0032	0,0060	0,0060	0,0050
	7	62,8	0,0413	0,0045	0,0072	0,0071	0,0069
	8	71,6	0,0750	0,0057	0,0085	0,0085	0,0081
	9	80,4	-	0,0072	0,0106	0,0098	0,0094
	10	89,2	-	0,0110	0,0106	0,0112	0,0103
	11	98,0	-	0,0155	0,0131	0,0130	0,0111
	12	106,8	-	0,210	0,0152	0,0150	0,0132
	13	115,6	-	0,0262	0,0172	0,0167	0,0148
	14	124,4	-	0,0356	0,0200	0,0194	0,0160
	15	133,2	-	0,0475	0,0312	0,0220	0,0175
	16	142,0	-	-	0,0430	0,0260	0,0195
	17	150,8	-	-	0,0750	0,0310	0,0212
	18	159,6	-	-	-	0,0380	0,0234
	19	168,4	-	-	-	0,0500	0,0257
	20	177,2	-	-	-	-	0,0287
	21	168,0	-	-	-	-	0,0337
	22	194,8	-	-	-	-	0,0400
	23	203,6	-	-	-	-	0,0494
	24	212,4	-	-	-	-	0,0638
	25	221,2	-	-	-	-	0,0812

cd. tablicy 1

1	2	3	4	5	6	7	8
$p_x = 15 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	1	15,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	23,8	0,0012	0,0005	0,0010	0,0004	0,0006
	3	32,6	0,0054	0,0007	0,0019	0,0007	0,0008
	4	41,4	0,0106	0,0016	0,0026	0,0015	0,0016
	5	50,2	0,0172	0,0025	0,0031	0,0022	0,0020
	6	59,0	0,0241	0,0032	0,0040	0,0035	0,0025
	7	67,8	0,0350	0,0042	0,0060	0,0045	0,0031
	8	76,6	0,0466	0,0055	0,0072	0,0056	0,0039
	9	85,4	0,0975	0,0065	0,0097	0,0067	0,0046
	10	94,2	-	0,0130	0,0122	0,0122	0,0080
	11	103,0	-	0,0150	0,0152	0,0094	0,0062
	12	111,0	-	0,0200	0,0165	0,0108	0,0072
	13	120,6	-	0,0261	0,0200	0,0124	0,0081
	14	129,4	-	0,0339	0,0225	0,0144	0,0090
	15	128,2	-	0,0450	0,0294	0,0175	0,0102
	16	147,0	-	0,0750	0,0362	0,0216	0,0113
	17	155,8	-	-	0,0462	0,0262	0,0130
	18	164,6	-	-	0,0688	0,0319	0,0147
	19	173,4	-	-	-	0,0403	0,0171
	20	182,2	-	-	-	0,0638	0,0201
	21	191,0	-	-	-	-	0,0234
	22	199,8	-	-	-	-	0,0281
	23	208,6	-	-	-	-	0,0360
	24	217,4	-	-	-	-	0,0475
	25	226,2	-	-	-	-	0,0675
	26	235,0	-	-	-	-	0,0838

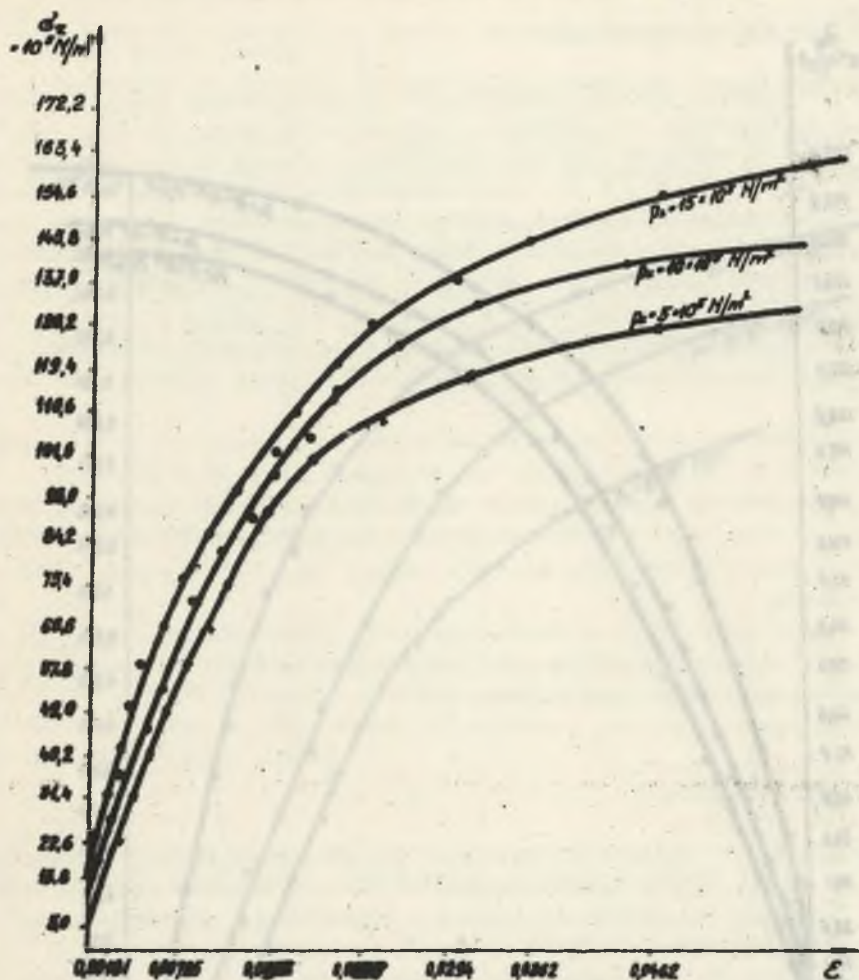


rys. 3. Przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  dla piasku o różnym uwarstwieniu z domieszką żwiru i mułku, zamrożonego do temperatury  $-5^\circ\text{C}$ .

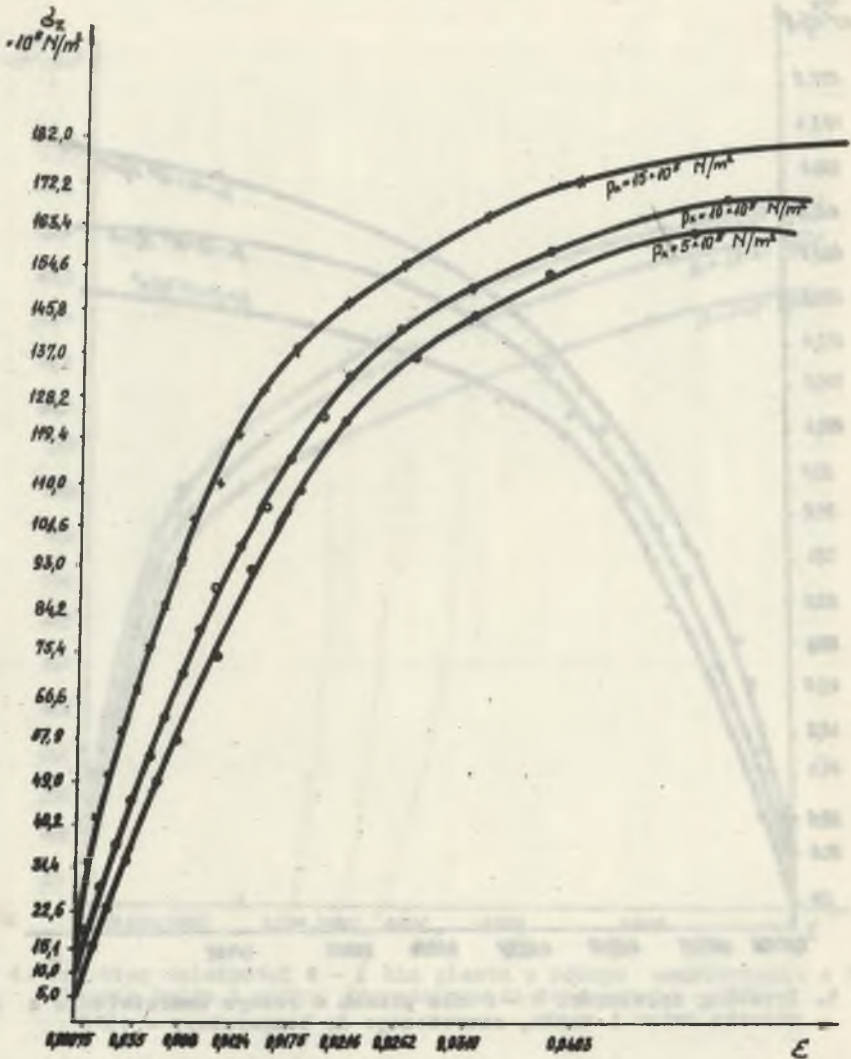


Rys. 4. Przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  dla piasku o różnym uwarstwieniu z domieszką żwiru i mułku, zamrożonego do temperatury  $-12^\circ\text{C}$

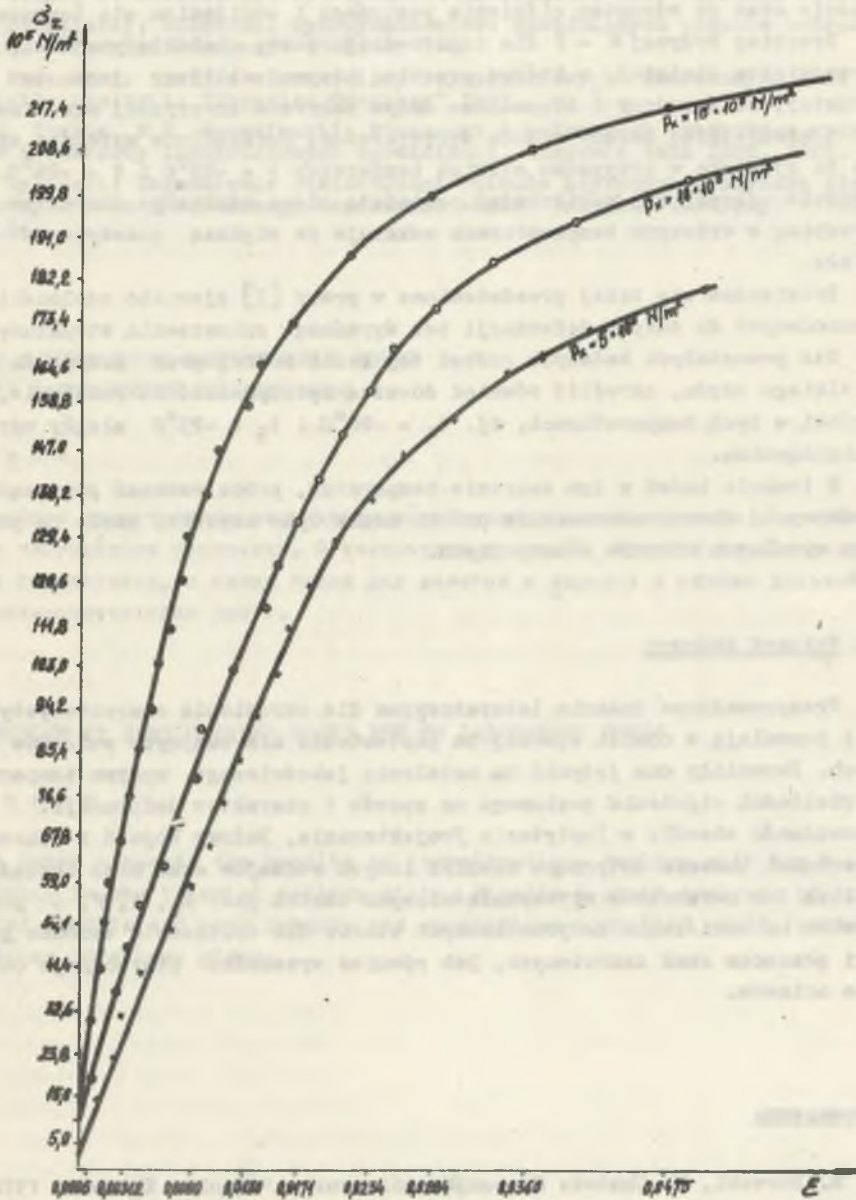




Rys. 5. Przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  dla piasku o różnym uwarstwieniu z domieszką żwiru i mułku, zamrożonego do temperatury  $-15^{\circ}\text{C}$



Rys. 6. Przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  dla piasku o różnym uwarstwieniu z domieszką żwiru i młku, zamrożonego do temperatury  $-20^\circ\text{C}$



Rys. 7. Przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  dla piasku o różnym uwarstwieniu z domieszką żwiru i mułku, zamrożonego do temperatury  $-25^{\circ}\text{C}$

## 5. Analiza uzyskanych wyników

Uzyskane wyniki badawcze wskazują, że uzyskane funkcje zwrócone są wypukłością w kierunku osi naprężeń, a kąt ich nachylenia względem osi  $\epsilon$  rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia poziomego i obniżaniem się temperatury.

Przebieg krzywej  $\sigma - \epsilon$  dla tego rodzaju skały charakteryzuje się dużym przedziałem obciążeń, w którym przebieg krzywej zbliżony jest do linii prostej, co świadczy o stosunkowo dużym zakresie sprężystej pracy materiału i niewielkiej zmiany modułu sprężystości. Szczególnie wyraźnie występuje to zjawisko w przypadku niskich temperatur  $t = -20^{\circ}\text{C}$  i  $t = -26^{\circ}\text{C}$ . Pozostałe wykresy tej serii badań posiadają nieco odmienny charakter i ich przebieg w wyższych temperaturach wskazuje na większą plastyczność materiału.

Potwierdza się tutaj przedstawione w pracy [7] zjawisko zdolności skał zamrożonych do dużych deformacji bez wyraźnego zniszczenia struktury.

Dla pozostałych badanych próbek tej serii można, przy przyjęciu niewielkiego błędu, określić również doraźną wytrzymałość na ściskanie, gdyż próbki w tych temperaturach, tj.  $t_4 = -20^{\circ}\text{C}$  i  $t_5 = -25^{\circ}\text{C}$  uległy wyraźnym zniszczeniom.

W trakcie badań w tym zakresie temperatur, prócz wskazań przyrządów pomiarowych, moment zniszczenia próbki można było określić także na podstawie wyraźnych efektów akustycznych.

## 6. Wniosek końcowy

Przeprowadzone badania laboratoryjne dla określenia charakterystyk  $\sigma(\epsilon)$  nie pozwalają w chwili obecnej na postawienie miarodajnych wniosków ogólnych. Pozwoliły one jedynie na ustalenie jakościowego wpływu temperatury i wielkości ciśnienia poziomego na sposób i charakter deformacji. Prowadzone obecnie w Instytucie Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni badania dotyczące również innych rodzajów skał oraz dokładna analiza ich parametrów wytrzymałościowych takich jak:  $R_c$ ,  $A$ ,  $\varphi$ ,  $C$  pozwolą bowiem na uściślenie dotychczasowych wzorów dla obliczania zarówno grubości płaszcza skał zamrożonych, jak również wysokości statecznego obnażenia ociosów.

## LITERATURA

1. M. Borecki, M. Chudek: *Mechanika górotworu*. "Śląsk", Katowice 1972.
2. B. Kłeczek: *Własności reologiczne skał płynnych mrożonych podczas głębieńienia szybów*. Praca doktorska, Kraków 1972.

3. G.T. Mańkowski: Specjalnyje sposoby sorużenije stwożow szacht. Izdatielstwo Nauka. Moskwa 1965.
4. R. Majchrzak, F. Poloczek: Laboratoryjne badania dla ustalenia grubości płaszcza skał zamrożonych. Praca dyplomowa, Gliwice 1973.
5. Z. Orłóś, A. Jakubowicz: Wytrzymałość materiałów. WNT, Warszawa 1968.
6. Z. Strzelecki: Własności wytrzymałościowe zawodnionych piasków kwarcowych. "Przegląd Górniczy" 1962, nr 7-8.
7. M. Waszewski: Analiza własności wytrzymałościowych zamrożonych skał w świetle reologii. "Przegląd Górniczy" 1967, nr 5.
8. S.S. Vjałow, W.G. Gmoszinskij: Procznost i počuczest mierzłych gruntow i raščoty ledogruntowych ograżdzenij. Akademia Nauk ZSRR, 1962.
9. R. Żyliński: Zagadnienie stateczności ociosów szybowych w szybach głębinowych metodą sztucznego zamrażania skał. "Przegląd Górniczy" 1973 nr 5.

#### ВОПРОС УСТОЙЧИВОСТИ ЗАМОРОЖЕННЫХ ПОРОД В СВЕТЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

##### Резюме

В работе представлены результаты исследований зависимости  $\sigma_1 - \epsilon$  в трёхосевом напряжённом состоянии. В заключении проведён краткий анализ полученных результатов, а также подан ряд замечаний и выводов в объёме дальнейших исследовательских работ.

#### THE PROBLEM OF REFRIGERATED ROCKS PUT TO LABORATORY TESTS

##### Summary

The paper presents the results of investigations dealing with the  $\sigma_1 - \epsilon$  dependence in the triaxial voltage state. Finally a short analysis of the achieved results and some remarks and suggestions connected with further researches have been given.