

Marek DYDECKI  
Stanisław TAKUSKI  
AGH Kraków

#### BADANIA MODELÓWE WPŁYWU PODSADZKI NA PODPORNOŚĆ FILARÓW W KOMOROWO-FILAROWYM SYSTEMIE EKSPLOATACJI ZŁÓŻ RUD Zn-Pb

**Streszczenie.** W pracy podano wyniki badań modelowych nad wpływem rodzaju podsadzki i szczelności podsadzania na wytrzymałość filarów przy występowaniu odkształceń w stanie przedgranicznym i pozagranicznym. Ustalono zależność funkcyjną między wytrzymałością filarów a stosowaną podsadzką, która może być wykorzystana przy projektowaniu systemów komorowo-filarowych w podsadzkach.

Niektóre odmiany systemu komorowo-filarowego wymagają pozostawienia filarów podporowych. Filary te w dalszym etapie eksploatacji rozstrzeluje się lub otacza podsadzką.

W eksploatacji złóż rud Zn-Pb rejonu Olkusza stosuje się głównie system komorowo-filarowy z podsadzką hydrauliczną. Poziome lub prawie poziome zaleganie złoże w połączeniu z małą głębokością eksploatacji stwarza trudności w szczelnym podsadzaniu. Istnienie zer podsadzkowych powoduje, że podsadzka nie przejmuje obciążenia skał stropowych. Strop obciąża wystająca z podsadzki przystropową część filara, zaś jego zasadniczą część pracuje w warunkach trójosiowego stanu naprężeń, gdzie składową poziomą wywołuje parcie podsadzki na filar oraz jej opór przeciwko zagęszczeniu wynikającym z odkształceń poprzecznych filara.

Aktualnie, bezpośrednio przed podsadzeniem wybiera się pewną ilość filarów w polu, a także niekiedy świadomie wykonuje się niepełne podsadzenie, mając na względzie korzyści techniczne oraz ekonomiczne. Postępowaniu takiemu towarzyszy przekonanie, że podsadzka wpływa na filar, zwiększając jego podporność.

Zagadnienie współpracy podsadzki z niszczonej filarem dotyczy współdziałania ośrodka sprężystego, jakim jest filar z otaczającym go ośrodkiem sypkim niespójnym (podsadzka sucha), ośrodkiem sypkim o określonej spójności (podsadzka hydrauliczna) i ośrodkiem sprężystym (podsadzka utwardzana). Układ ten charakteryzuje się zmianą własności mechanicznych filara w miarę jego niszczenia i zmianą naprężeń w podsadzce w miarę jej zagęszczenia. Przy analizie współdziałania obydwu ośrodków należy uwzględnić także własności spągu i stropu oraz współdziałanie własności mechanicznych górotworu złoże.

Przy przyjęciu pewnych uproszczeń można sformułować następującą ogólną zależność:

$$W = f(\sigma_z, \varepsilon, h, d, s, \nu, H, \delta_p, \lambda),$$

gdzie:

$$W = \frac{R_{cF}}{R_{cF}} 100\% \text{ - współczynnik wzrostu podporności filara,}$$

- $R_{cF}$  - podporność filara nieotoczonego podsadzką  $MN/m^2$ ,
- $\Delta R_{cF}$  - przyrost podporności na skutek otoczenia podsadzką  $MN/m^2$ ,
- $h, d, s$  - wysokość, średnica, szerokość filara  $m$ ,
- $\sigma_z$  - naprężenie pionowe w filarze  $MN/m^2$ ,
- $\varepsilon$  - odkształcenie filara  $mm/m$ ,
- $\nu$  - liczba Poissona,
- $H$  - wysokość otoczenia filara podsadzką  $m$ ,
- $\delta_p$  - ciężar objętościowy podsadzki  $KN/m^3$ ,
- $\lambda$  - współczynnik parcia bocznego podsadzki.

Wyniki dotychczasowych badań (głównie radzieckich) nad wpływem poszczególnych parametrów opisujących układ podsadzka-filar na wzrost jego podporności stanowią rezultat opracowań analitycznych oraz prac eksperymentalnych, modelowych z użyciem materiałów ekwiwalentnych. Przegląd wyników badań można ująć następująco:

Rozwiązania analityczne są trudne do praktycznego wykorzystania [1, 2, 3]. Prace eksperymentalne w zasadniczej większości dotyczą podsadzek utwardzanych [4, 6]. W badaniach modelowych wpływu podsadzek nieutwardzanych na podporność filara istotną trudność stanowi modelowanie ośrodków sypkich. W tej problematyce ma miejsce rozbieżność sądów i polemika [6]. Aktualnie w literaturze brakuje jednoznacznie podanych kryteriów modelowania podsadzek górniczych w aspekcie ich współpracy z górotworem [7]. W rozważaniach teoretycznych i badaniach eksperymentalnych uzyskiwano współczynniki wzmocnienia od 10% dla podsadzek suchych do 150% dla podsadzek utwardzanych. Należy zaznaczyć, że różni autorzy dla tych samych warunków uzyskiwali wyniki różniące się o 100% i więcej [8, 9, 10, 11].

Wyniki prac eksperymentalnych przedstawione są w postaci opisu jakościowego, bez podania ilościowych związków pomiędzy wzrostem podporności filara a parametrami układu filar-podsadzka. Jako cel pracy przyjęto: ustalenie wpływu niektórych parametrów opisujących filar i podsadzkę na wzrost jego podporności, przy zastosowaniu badań modelowych z użyciem materiałów ekwiwalentnych. Badania przeprowadzono dla 4 rodzajów podsadzek górniczych, dla różnych wysokości otoczenia filara podsadzką przy przyjęciu trzech rodzajów skał budujących filar, a charakterystycznych dla rejonu Otkusza. Dodatkowym parametrem zmiennym badanego układu filar-pod-

śadzka były własności geometryczne filara (stosunek wysokości do średnicy), typowe dla filarów podporowych o przekroju kołowym.

W oparciu o wyróżnione trzy rodzaje górotworu ołkuskiego modelowano filary zbudowane ze skał mocnych, średnich i słabych [12, 13].

Do zamodelowania górotworu posłużono się materiałem ekwiwalentnym o spoiwie kłutanowym z domieszką kredy [14, 15]. Przyjęto, że przy doborze receptury materiału ekwiwalentnego decydującym parametrem jest jego wytrzymałość na ściskanie  $R_c$ , przy zachowaniu odpowiednich relacji wielkości modułu Younga i liczby Poissona pomiędzy wyróżnianymi rodzajami górotworu. Własności górotworu rzeczywistego i modelowego przedstawiono w tablicach 1 i 2.

Tablica 1

## Własności mechaniczne skał w naturze

Rodzaj skał	$R_c$ MN/m <sup>2</sup>	$R_r$ MN/m <sup>2</sup>	E MN/m <sup>2</sup>	$\nu$	$\delta_o$ 10 <sup>4</sup> N/m <sup>3</sup>
Skały mocne	70	4	8000	0,06	2,6
Skały średnie	35	2,2	6000	0,20	2,6
Skały słabe	15	0,9	2400	0,35	2,6

Tablica 2

## Własności mechaniczne skał w modelu

Rodzaj skał	$R_c$ MN/m <sup>2</sup>	$R_r$ MN/m <sup>2</sup>	E MN/m <sup>2</sup>	$\nu$	$\delta_o$ 10 <sup>4</sup> N/m <sup>3</sup>
Skały mocne	0,350	0,07	72	0,04	1,3
Skały średnie	0,175	0,05	54	0,15	1,3
Skały słabe	0,076	0,035	47	0,21	1,3

Problem modelowania własności podsadzek górniczych w aspekcie ich współpracy z górotworem jest nadal otwarty. Stosunkowo proste jest zagadnienie modelowania podsadzek utwardzanych, wobec których logiczne wydaje się być stosowanie zasad modelowania ustalonych dla ośrodków sprężystych [8]. Dla jednego z rodzajów podsadzek modelowanych w niniejszej pracy - podsadzki utwardzanej z odpadów hutniczych - przyjęto kryteria modelowania jak dla ośrodków sprężystych.

Modelowanie ośrodków sypkich jest bardzo rzadko stosowane poprzez dobór materiałów ekwiwalentnych. Skład granulometryczny, kąt tarcia wewnętrznej, kąt naturalnego zrypu, spójność, spójność pozorna, porowatość to podstawowe parametry wpływające na własności ośrodka sypkiego i trudne do odwzorowania innym ośrodkiem sypkim przy uwzględnieniu geometrycznej



skali modelowania. Istnieją pewne zasady modelowania własności sypczych, lecz przenoszenie ich jako metody odwzorowania własności podsadzki górniczej bywa krytykowane. Bardziej trafne wydają się być propozycje stosowania reguł modelowania wypracowanych dla ośrodków sprężystych z uwzględnieniem specyfiki ośrodka sypkiego. I tak w omawianym zagadnieniu część autorów proponuje modelowanie podsadzki poprzez stosowaną w mechanice gruntów wielkość parcia bocznego ośrodka sypkiego na pionową ściankę [16] z uwzględnieniem skali geometrycznej i skali ciężarowej [5, 9]. Ten sposób modelowania jest także krytykowany [6], szczególnie w odniesieniu do podsadzki hydraulicznej, z uwagi na niezachowywanie właściwej relacji pomiędzy wielkością spójności pozornej a ogólnym parciem bocznym warstwy podsadzki w naturze i modelu.

$$P_c = H \gamma_p \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - K \frac{2 \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

gdzie:

- $\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznej podsadzki,
- $K$  - spójność podsadzki,
- $H$  - wysokość otoczenia filara podsadzka,
- $\gamma_p$  - ciężar objętościowy podsadzki.

W niniejszej pracy celem zamodelowania podsadzki nieutwardzanej wytypowano siedem ośrodków sypkich zróżnicowanych pod względem własności fizykomechanicznych.

Przy poszukiwaniach sposobu modelowania podsadzki nieutwardzanej pierwotnie oparto się na wzorach opisujących parcie ośrodka sypkiego na bocznej ściankę. Przyjmując za wyjściowe własności w naturze podsadzki suchej i hydraulicznej klasy I i II, spośród kilku ośrodków sypkich wybrano trzy spełniające kryterium modelowania [17]:

Parcie boczne w naturze = parciu w modelu  $\times$  skala geometryczna  $\times$  skala ciężarowa.

Uzyskane wyniki wstępnych badań nie dały zadowalających rezultatów. Wzrost wielkości parcia bocznego w modelowanych podsadzkach nie powodował oczekiwanego wzrostu podporności filarów.

Wstępne badania wpływu wytypowanych ośrodków sypkich (podsadzek modelowych) na wzrost podporności modeli filarów i analiza parametrów opisujących poszczególne ośrodki wskazywała, że wzrost współczynnika wzmocnienia modelu filara znajduje odzwierciedlenie w spadku współczynnika określającego ściśliwość ośrodka sypkiego. Na ten parametr - zasadnicze kryterium oddające w górnictwie własności mechaniczne podsadzki - zwracano już uwagę przy wstępnej analizie możliwości praktycznego rozwiązania problemu stawianego w tej pracy. Większość związanych ze sobą parametrów opisujących stan sypki, jak: ciężar, porowatość, kąt tarcia wewnętrznej, spójność pozorną, skład granulometryczny reprezentuje i zawiera w sobie współ-

czynnik ściśliwości, będąc jednocześnie w zależności funkcyjnej od naprężeń i odkształceń występujących w podsadźce. Brakuje jednakże opracowań teoretycznych i empirycznych określających warunki modelowania ściśliwości [7].

W trakcie wstępnej analizy problemu zamierzono wykorzystywać ściśliwość jako kryterium modelowania, sięgnięto jednak najpierw do omawianych już wzorów Sokołowskiego [16] z uwagi na duże wątpliwości:

Po pierwsze: Ściśliwość  $\gamma$  opisuje własności podsadzki w przestrzeni zamkniętej wobec przyjmowanej w założeniach niniejszej pracy niemożności szczelnego podsadzenia (podsadzka współpracuje z filarem a nie ze stropem).

Po drugie: Zależność funkcyjna ściśliwości od panujących naprężeń jest nieliniowa i posługiwanie się wartością średnią ściśliwości czy też jak dalej przyjęto średnią wartością modułu odkształcalności jest obarczone pewnym błędem.

Z uwagi jednak na uzyskiwane wyniki badań i ich porównanie z danymi liczbowymi opierającymi własności stosowanych modeli podsadzek zdecydowano na posługiwanie się średnim modułem odkształcalności liniowej podsadzki ( $E_p$ ).

$$E_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_{pi}}{\epsilon_{pi}}$$

gdzie:

$\sigma_{pi}$  - wielkość naprężeń w podsadźce MN/m<sup>2</sup>,

$\epsilon_{pi}$  - wielkość odkształceń w podsadźce.

Stosownie do zasad modelowania:

$$E_{P_m} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta_m}{\delta_n} E_{P_n}$$

Uzyskiwane z obliczeń wartości  $E_{P_m}$  nie odpowiadają ściśle uzyskiwanym w badaniach laboratoryjnych wartościom  $E_{P_m}$ , jednakże uzyskano stałą w przybliżeniu wartość stosunku  $E_{P_m}$  uzyskaną z obliczeń do wartości  $E_{P_m}$  uzyskanej z badań laboratoryjnych, zachowując relatywność charakterystyki różnych podsadzek modelowych względem siebie i względem podsadzek w naturze (tablica 3). Zatem za regułę modelowania podsadzki nieutwardzanej przyjęto zależność:

$$E_{P_n} \frac{1}{\alpha} \frac{\delta_m}{\delta_n} = \frac{E_{P_m} \text{ obliczone}}{E_{P_m} \text{ empiryczne}} \approx \text{const}$$

Tablica 3

Wartości obliczone i empiryczne  
współczynnika odkształcalności podsadzki

Rodzaj modelowego materiału podsadzki	Wartości ciężaru objętościowego ( $\delta_p^*$ ) i modułu odkształcalności ( $E_{P_m}$ ) ustalone dla modelowego materiału podsadzki		Obliczone wg zależności wartości modułu odkształcalności podsadzki ( $E_m$ )		
			suchej (I)	hydraulicznej (II)	hydraulicznej (III)
			charakteryzujących się rzeczywistym ciężarem objętościowym ( $\delta_{P_n}$ ) i modułem odkształcalności ( $E_{P_n}$ )		
	$\delta_{P_n}$	$E_{P_n}$	$\delta_{P_n} = 1,3$	$\delta_{P_n} = 1,7$	$\delta_{P_n} = 1,9$
			$E_{P_n} = 58$	$E_{P_n} = 1,7$	$E_{P_n} = 398$
PG	0,83	13,2	0,34	0,72	1,74
PW	1,58	22,5	0,64	1,37	3,32
ŻM	1,47	10,0	0,59	1,28	3,0
RM	1,98	5,1	0,80	1,72	4,17
PD	1,36	27,0	0,55	1,18	2,85
PL	0,85	2,2	0,34	0,74	1,78
ŻC	1,35	1,9	0,55	1,04	2,52

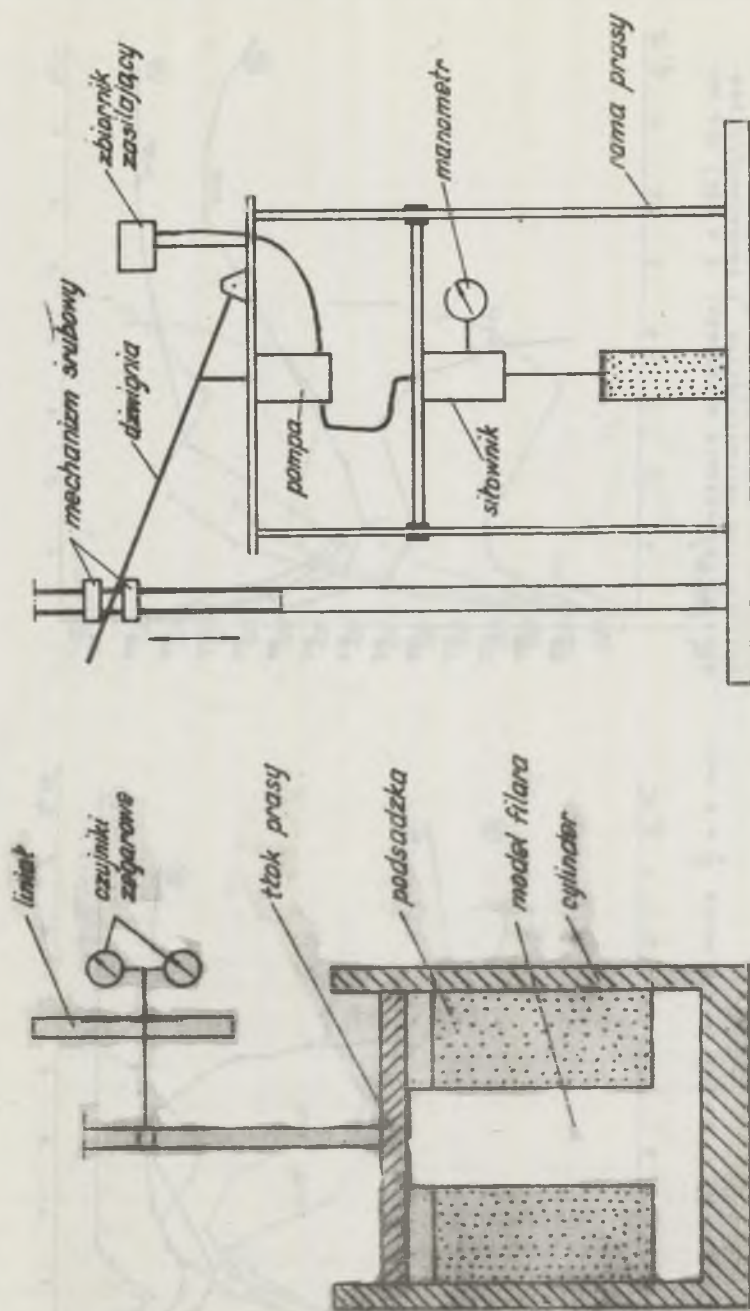
□ - wartości spełniające zależność (20) wybrane do modelowania.

W oparciu o powyższe zasady przyjęto w badaniach odwzorowanie: podsadzki suchej - popiołem lotnym, podsadzki hydraulicznej piaskowej ze skalą płoną - rudą mieloną, podsadzki hydraulicznej piaskowej - żużlem pomie-dziwym, podsadzki utwardzanej - skalą modelową piaskową o spoiwie kłuta-nowym.

Stanowisko badawcze składało się z zespołu obciążającego z układem po-miarowym i modelu filara otoczonego podsadzką. Badania polegały na obciąż-aniu modelu filara i rejestracji odkształceń podłużnych pniowych (rys. 1, 2).

Przebadano modele filarów zbudowanych z trzech rodzajów skał (mocnej, średniej, słabej) o trzech ilorazach wysokości do średnicy. Modele fila-rów otaczano jednym z czterech rodzajów podsadzki przy trzech wysokoś-ciach otoczenia. Każdorazowo badania podporności filara otoczonego pod-sadzką porównywano z badaniami filara wolnostojącego. Łącznie przebadano 117 wariantów układu filar-podsadzka w pięciu seriach pomiarowych, co w połączeniu z badaniami wstępnymi i koniecznością pewnych powtórzeń dało



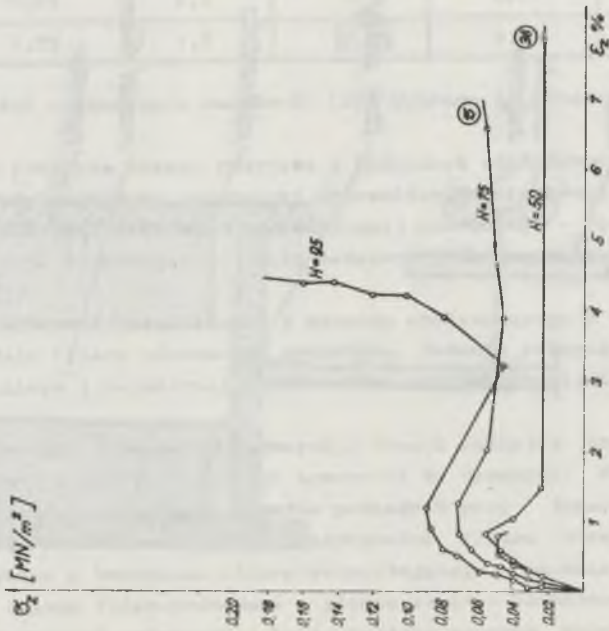


Rys. 1. Schemat stanowiska do badań modelowych

Rys. 2. Schemat prasy hydraulicznej

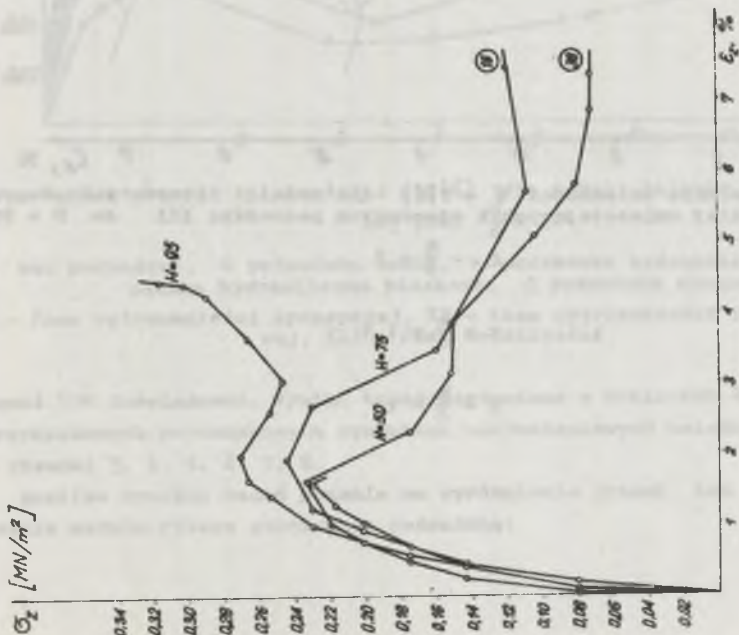


Rys. 4. Zależność  $\sigma_2 = f(\epsilon_2)$  skala średnia  $\frac{h}{d} = 2$   
podszadzka III

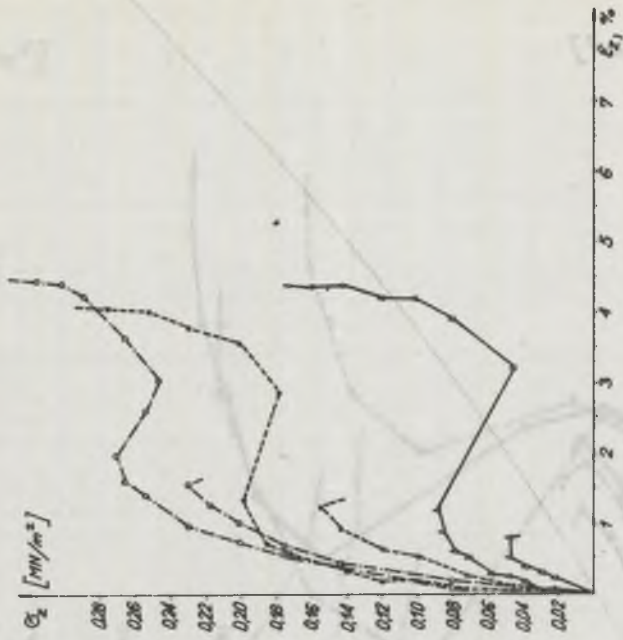


Rys. 3. Zależność  $\sigma_2 = f(\epsilon_2)$  skala słaba  $\frac{h}{d} = 2$   
podszadzka III



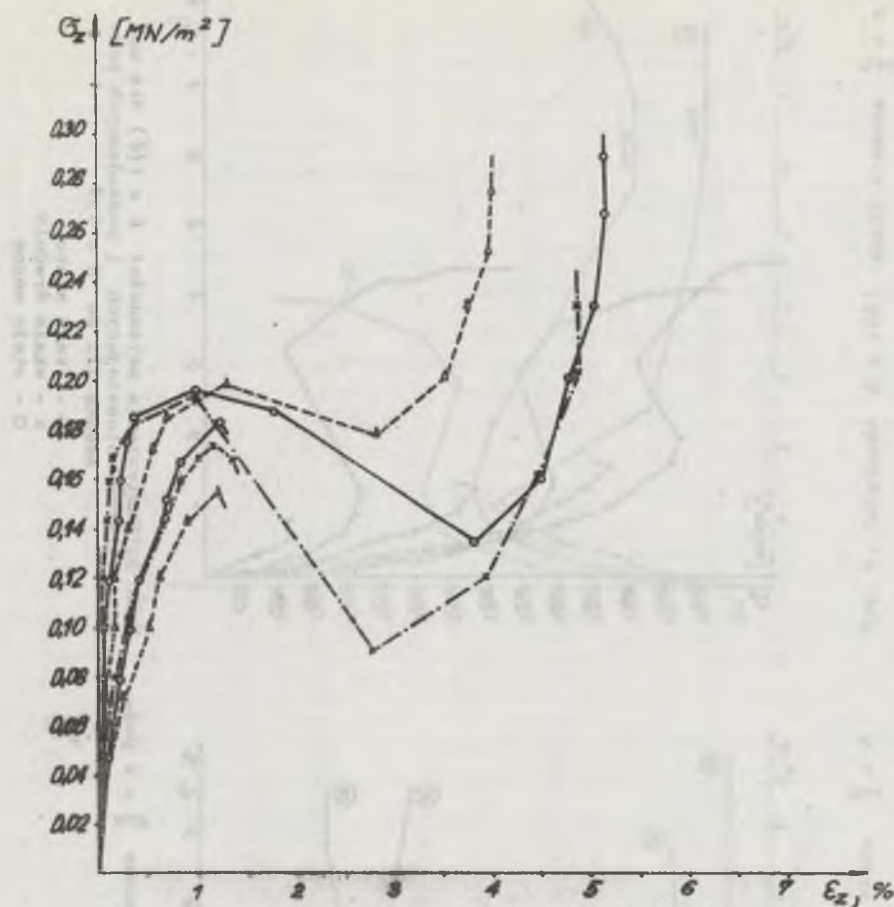


Rys. 5. Zależność  $\epsilon = f(\delta)$  skała mocna  $\frac{h}{d} = 2$  pod-sadzka III



Rys. 6. Zestawienie zależności  $\epsilon = f(\delta)$  dla modeli filarów wolnostojących i podsadzonych podsadzka III do  $H = 95\%$

$\Delta$  - skała słaba  
 $x$  - skała średnia  
 $O$  - skała mocna

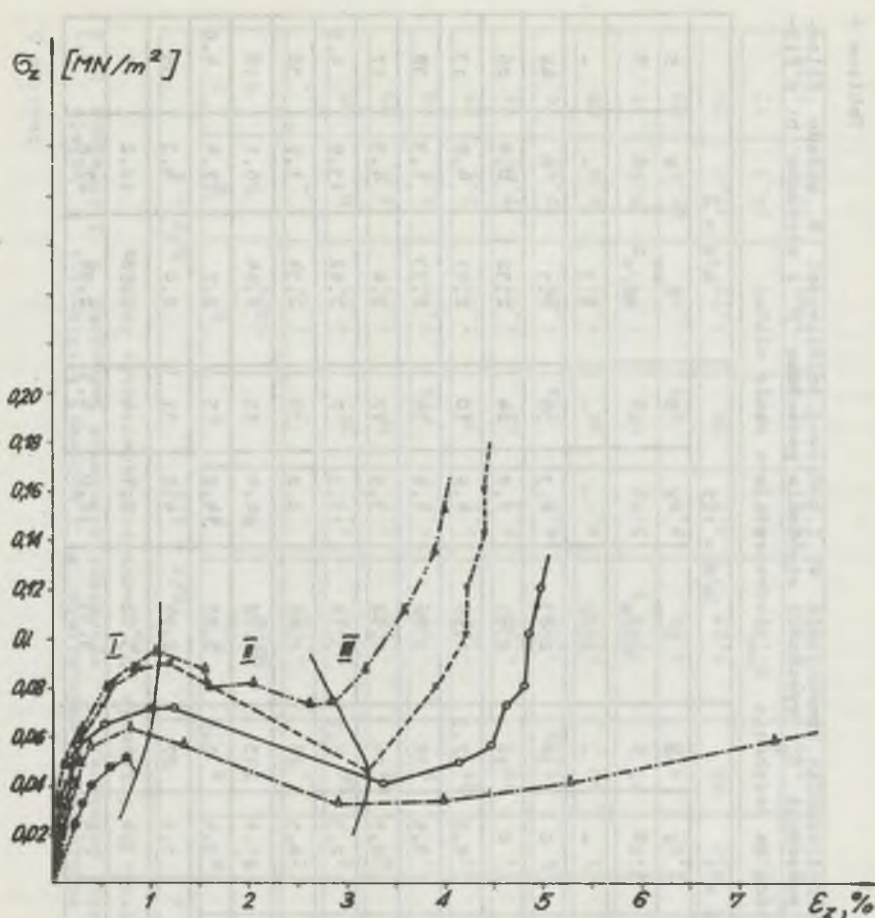


Rys. 7. Zestawienie zależności  $\sigma = f(\epsilon)$  dla modeli filarów zbudowanych ze skały średniej wolnostojącej i otoczonych podsadką III do  $H = 95\%$

$$\Delta - \frac{h}{d} = 2$$

$$\times - \frac{h}{d} = 1,5$$

$$\circ - \frac{h}{d} = 1$$



Rys. 8. Zestawienie zależności  $\sigma = f(\epsilon)$  dla modeli filarów ze skały słabej przy  $\frac{h}{d} = 2$

$\circ$  bez podsadzki,  $\Delta$  podsadzka sucha,  $\diamond$  podsadzka hydrauliczna,  $\times$  podsadzka hydrauliczna piaskowa,  $\triangle$  podsadzka utwardzana

I - faza wytrzymałości sprężystej, II - faza wytrzymałości pozniszczeniowej, III - faza ścisłości

ponad 700 doświadczeń. Wyniki badań zestawiono w tablicach 4, 5, 6 oraz w przykładowych porównawczych rysunkach zestawieniowych zależności  $\sigma = f(\epsilon)$  - rysunki 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Analiza wyników badań pozwala na wyróżnienie trzech faz procesu niszczenia modelu filara otoczonego podsadzką:



Tablica 4

Zestawienie wyników badań modelowych współczynnika wzmocnienia  $W$  i końcowej ściśliwości  $S$  układu filar-podsadzka od modułu odkształcalności podsadzki  $E_p$ , wysokości otoczenia podsadzką  $H$  i stosunku  $h$ :  $d$  filtra o wytrzymałości na ściskanie  $R_{cm}$  odzorowujące skałę szłąb

Rodzaj	h/d = 1					h/d = 1,5					h/d = 2				
	$E_{pm}$ MN/m <sup>2</sup>	H %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	
-	0	0	3,48	-	-	2,82	-	-	2,3	-	-	2,3	-	-	
Sucha	1,9	50	3,47	0	38	2,83	0,3	38	2,3	0	44	2,32	0,8	26	
		75	3,48	0	16	2,85	1,0	24	2,41	4,8	13	2,33	1,3	38	
		95	3,50	0,5	7,3	2,96	4,9	10	2,4	4,3	17	2,62	13,9	4,6	
Hydrau- liczna	5,1	50	3,49	0,5	18	2,86	1,4	34	2,33	1,3	38	2,4	4,3	17	
		75	3,50	0,5	14	2,92	3,5	17	2,4	4,3	17	2,62	13,9	4,6	
		95	3,56	2,3	5,7	3,14	11,3	7	2,88	2,2	30	2,34	1,7	38	
Hydrau- liczna	10,0	50	3,50	0,5	28	2,88	2,2	30	2,44	6,1	16	2,34	1,7	38	
		75	3,52	1,1	15	2,99	6,0	15	2,44	6,1	16	2,44	6,1	16	
		95	3,6	3,4	5,0	3,22	14,2	5	2,7	17,4	4,6	2,7	17,4	4,6	
Utwardza- na	-	50	3,52	1,1	27	2,94	4,2	31	2,4	4,3	35	2,4	4,3	35	
		75	3,6	3,4	14	3,02	7,1	14	2,58	12,2	15	2,58	12,2	15	
		95	3,67	5,5	2,5	3,33	18,0	4,3	2,94	27,8	4,1	2,94	27,8	4,1	

Tablica 5

Zestawienie wyników badań modelowych współczynnika wzmocnienia  $W$  i końcowej ściśliwości  $S$  układu filar-podsadzka od modułu odkształcalności podsadzki  $E_p$ , wysokości otoczenia podsadzki  $H$  i stosunku  $h/d$  filara o wytrzymałości na ściskanie  $R_{cm}$  odzorowującej skalę średnią

Podsadzka w modelu	$h/d = 1$				$h/d = 1,5$				$h/d = 2$					
	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	$H$ %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	$W$ %	$S$ %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	$W$ %	$S$ %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	$W$ %	$S$ %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	$W$ %	$S$ %
-	0	0	1,84	-	-	1,72	-	-	1,56	-	-	-	-	-
		50	1,84	0	36	1,74	1,1	36	1,55	0	40	1,55	0	40
Sucho	1,9	75	1,84	0	21	1,74	1,1	20	1,59	2,0	23	1,59	2,0	23
		95	1,86	1	9	1,77	1,9	6,9	1,70	8,9	10	1,70	8,9	10
Hydrau- liczna	5,1	50	1,85	1	31	1,74	1,1	34	1,60	2,5	29	1,60	2,5	29
		75	1,86	1	17	1,76	2,3	16	1,67	7,05	15	1,67	7,05	15
		95	1,92	4	5,35	1,89	10,0	5,2	1,84	17,95	4,7	1,84	17,95	4,7
Hydrau- liczna	10,0	50	1,86	1	30	1,73	0,5	32	1,59	2,0	28	1,59	2,0	28
		75	1,90	3,2	17	1,82	5,8	18	1,71	9,6	15	1,71	9,6	15
		95	1,98	7,6	5,4	1,94	12,8	4,9	1,96	25,6	4,3	1,96	25,6	4,3
Utwar- dzana	12,2	50	1,88	2,2	26	1,75	1,7	30	1,75	12,2	30	1,75	12,2	30
		75	1,92	4,3	16	1,87	8,7	16	1,94	24,3	13	1,94	24,3	13
		95	2,00	8,7	5,0	2,20	18,6	4,2	2,08	39,7	3,24	2,08	39,7	3,24

Tablica 6

Zestawienie wyników badań modelowych współczynnika wzmocnienia  $W$  i końcowej ścisłości  $S$  układu filar-podsadzka od modułu odkształcalności podsadzki  $E_p$ , wysokości otoczenia podsadzki  $H$  i stosunku  $h:d$  filara o wytrzymałości na ściskanie  $R_{cm}$  odzwiercudniającej skalę mocną

Podsadzka w modelu		$h/d = 1$				$h/d = 1,5$				$h/d = 2$				
Rodzaj	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	H %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %	$R_{cm}$ MN/m <sup>2</sup>	W %	S %
-	0	0	0,76	-	-	0,62	-	-	0,51	-	-	-	-	-
Sucha	1,9	50	0,76	0	41	0,62	0	41	0,53	0	41	0,53	3,9	39
		75	0,76	0	22	0,64	0	28	0,58	3,2	28	0,58	13,7	23
		95	0,78	2,6	11	0,71	14,5	11	0,63	14,5	11	0,63	23,5	13
Hydrau-liczna	5,1	50	0,76	0	38	0,64	0	36	0,56	3,2	36	0,56	9,8	36
		75	0,8	5,2	17	0,7	12,9	17	0,67	12,9	17	0,67	31,4	15
		95	0,86	13,1	5,25	0,74	19,3	7	0,7	19,3	7	0,7	37,2	4,9
Hydrau-liczna	10,0	50	0,79	3,9	36	0,64	3,2	36	0,57	3,2	36	0,57	11,7	36
		75	0,8	5,3	16	0,78	25,8	16	0,74	25,8	16	0,74	45,1	15
		95	0,89	17,1	5,2	0,86	38,7	6,5	0,85	38,7	6,5	0,85	66,6	5
Utwar-dzona	12,2	50	0,8	5,2	34	0,69	11,3	32	0,6	11,3	32	0,6	17,6	34
		75	0,84	10,5	15	0,8	29,0	14	0,8	29,0	14	0,8	56,8	14
		95	0,94	23,6	3,4	0,88	51,6	4,5	0,94	51,6	4,5	0,94	84,3	4,1



Faza pracy sprężyste.j:

Poszczególne parametry układu wpływają na efekt wzmocnienia filara w sposób następujący: Im słabsza skała, tym efekt otoczenia podsadzką większy. Parametry podsadzki, tzn. współczynnik odkształcalności podsadzki i stopień wypełnienia komory podsadzką wydają się być czynnikiem oddziaływującym silniej niż w proporcji prostej. Analizując graficzne opracowanie wyników badań, nie obserwuje się trendu zależności odkształcenia krytycznego od parametrów układu filar-podsadzka.

Faza pracy pozniszczeniowej układu:

W fazie tej obserwuje się wyraźnie wpływ otoczenia podsadzki na podporność próbki. Ocena wymiaru uzyskiwanego efektu przyrostu podporności jest trudna. W próbkach nieotoczonych podsadzką zjawisko podporności pozniszczeniowej udało się zarejestrować jedynie dla modeli filarów zbudowanych ze skał słabych o małym stosunku  $h/d$ .

W warunkach otoczenia podsadzką efekt wytrzymałości pozniszczeniowej zarejestrowano w większości doświadczeń dla wszystkich rodzajów skał i stosunków  $h/d$ . Można zatem stwierdzić, że podsadzka posiada znaczący wpływ na wzrost wytrzymałości pozniszczeniowej. Ocena uzyskanych wyników pozwala na stwierdzenie, że najistotniejszy jest stopień wypełnienia komory podsadzki oraz relacja własności mechanicznych podsadzki do własności mechanicznych skały. To znaczy im mniej ściśliwa podsadzka wokół modelu ze słabej skały (o najmniejszej  $R_c$ ), tym wielkość wytrzymałości pozniszczeniowej ( $R_{cp}$ ) większa i mniejszy kąt nachylenia krzywej malejącej -  $R_{cp} = f(\xi_z)$  [18].

Faza pracy ściśliwej:

W fazie tej po zniszczeniu modelu filara, dalsze obciążenie powoduje wgniatanie powstałych okruchów w podsadzkę i rozgniatanie resztek filara. Ośrodek ten ulega zagęszczeniu, uzyskując coraz większą podporność. Ta część przebiegu zależności  $\xi_z = f(\sigma_z)$  nosi charakter krzywych ściśliwości skał sypkich dążących do pewnych asymptot oznaczających maksymalne zagęszczenie ośrodka. Średnie wartości odkształceń  $\xi_z$  w procentach [5], w których badane modele po zniszczeniu i zagęszczeniu osiągnęły swe asymptoty, oznaczono w każdym badaniu, co przedstawiono na przykładowych rysunkach 3, 4 i 5. W tej fazie uzyskiwano duży rozrzut wyników w obrębie jednego układu pomiarowego. Dlatego też na wykresach prezentujących wyniki badań przedstawiających zależność  $\xi_z = f(\sigma_z)$  według punktów uśrednionych nie zamieszczono tej fazy pracy układu filar-podsadzka. Nieustalony charakter fazy pracy ściśliwej układu wiąże się z losowym składem granulometrycznym części ośrodka sypkiego powstałym ze zniszczenia modelu filara. Odrębnie należy potraktować tę fazę pracy układu dla wariantu podsadzki utwardzonej, która charakteryzuje się modułem Younga a nie ściśliwością. Odcinek wykresu (rys. 3, 4, 5, 6, 7, 8) od utraty wytrzymałości

pozniszczeniowej malejącej aż do osiągnięcia pewnej asymptoty odkształcenia przedstawia wytrzymałość pozniszczeniową ustabilizowaną oraz zagęszczenie rozkruszonego wycinka modelu filara znajdującego się ponad podsadzką utwardzoną.

Zasadę ekwiwalencji modelowania układu filar-podsadzka wobec natury można przypisać jedynie do pierwszej fazy - sprężystej pracy filaru.

W związku z powyższym oraz z faktem, iż wzrost podporności filara na skutek działania podsadzki posiada najistotniejsze znaczenie praktyczne właśnie dla tej fazy współpracy układu, ocenę ilościową zjawiska przeprowadzono analizując wpływ poszczególnych parametrów układu na efekt wzmocnienia modelu filara do chwili utraty jego własności sprężystych. Polegała ona na przeprowadzeniu obliczeń matematycznych, które miały na celu znalezienie możliwie najlepszej zależności funkcyjnej pomiędzy "współczynnikiem wzmocnienia" ( $W$ ) a parametrami opisującymi kolejne warianty pomiarowe układu stanowiska modelowego:  $R_c$ ,  $E_p$ ,  $h/d$ ,  $H$ .

Najlepsze dopasowanie uzyskano dla zależności:

$$W = 0,0016 H \frac{h}{d} \frac{E_p}{R_c}$$

Dla podsadzek nieutwardzanych uzyskano przedział wzrostu podporności 0-66%. Przykładowo dla podsadzki piaskowej, słabej skały,  $h: d = 1,5$ ; podsadzenia na wysokość 95%, współczynnik wzmocnienia wyznaczony doświadczalnie wynosi 38,7%. Dla tychże warunków wartość obliczona powyższym wzorem wyniesie

$$W = 36,7\%$$

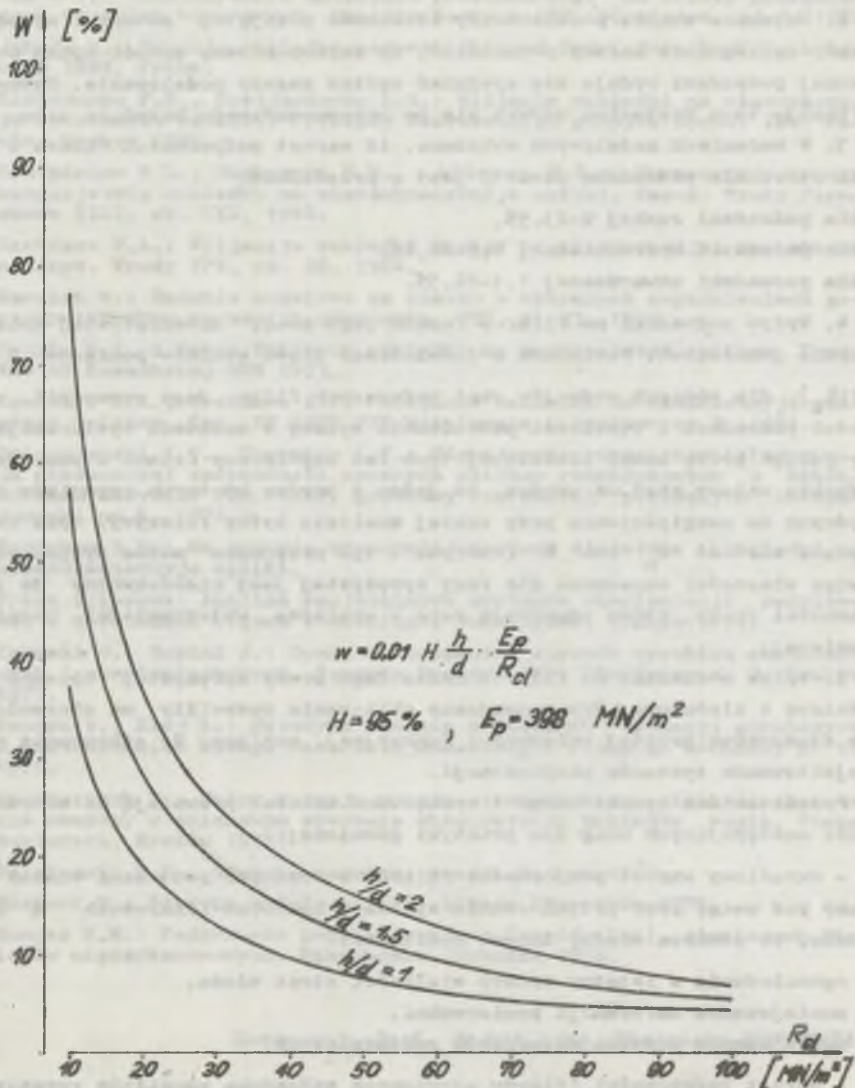
Po uwzględnieniu stosunków skały modelowania wzór przybiera postać:

$$W = 0,01 \frac{hHE_p}{dR_c}$$

Biorąc dane rzeczywiste:  $R_c = 15 \text{ MN/m}^2$ ;  $E_p = 398 \text{ MN/m}^2$

$$W = 37,8\%$$

Na podstawie powyższego wzoru sporządzono nomogram (rys. 9) wartości współczynnika wzmocnienia przy zastosowaniu podsadzki hydraulicznej, wysokości podsadzenia  $H = 95\%$  dla różnych rodzajów skał budujących filary o stosunkach  $h: d$  równych 1; 1,5; 2,0. Nomogram ten może być wykorzystany dla celów projektowania systemów komorowo-filarowych.



Rys. 9. Zależność współczynnika wzmocnienia  $W$  od wytrzymałości na ścisnienie skał budujących filar ( $R_d$ ) dla podsadzki piaskowej



Wyniki badań modelowych można podsumować następująco:

1. W zakresie jakościowego opisu współpracy filara z podsadzką wyniki badań są porównywalne z dociekaniem i pracami eksperymentalnymi znanymi w literaturze.

2. Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętej metody i metodyki badań, szczególnie należy podkreślić, iż zaproponowany sposób opisu modelowanej podsadzki wydaje się spełniać ogólne zasady modelowania. Pewną weryfikację tego kryterium uzyskuje się po przeprowadzeniu badań *in situ*.

3. W badaniach modelowych wykazano, iż wzrost podporności filara w wyniku otoczenia podsadzką zawarty jest w przedziale:

- dla podsadzki suchej 0-23,5%,
- dla podsadzki hydraulicznej 0,5-66,6%,
- dla podsadzki utwardzanej 1,1-84,3%.

4. Wpływ podsadzki na filar w fazach jego pracy niesprężystej opisano jedynie jakościowo. Posiadana z doświadczeń ilość wyników pomiarów  $R_{Cp} = f(\xi_z)$  dla różnych rodzajów skał budujących filar, jego geometrii, własności podsadzki i wysokości podsadzania byłaby w zasadzie wystarczająca, aby podjąć próbę oceny ilościowej tych faz współpracy filara z podsadzką. Jednakże należy mieć na uwadze, że jeden z bardzo istotnych czynników niezbędnych do uwzględnienia przy takiej analizie byłby fałszywy. Opis skały poprzez wartość  $R_c$  lub  $E$  (którymi w tym przypadku można dysponować), a więc własności oznaczone dla fazy sprężystej jest nieadekwatny do tych własności skały, które odgrywają rolę w wymiarze wytrzymałości pozniszczeniowej.

5. Wpływ podsadzki na filar w fazie jego pracy sprężystej opisano jakościowo i ilościowo. Przeprowadzane obliczenia pozwoliły na sformułowanie stosunkowo prostej zależności funkcyjnej, możliwej do stosowania przy projektowaniu systemów eksploatacji.

Przedstawione wyniki badań i opracowane wnioski pozwalają na sformułowanie następujących uwag dla praktyki górniczej:

- określony wzrost podporności filarów otoczonych podsadzką winien być brany pod uwagę przy projektowaniu systemów komorowo-filarowych z podsadzką, co stwarza między innymi możliwości:

- a) ograniczenia w istotny sposób wielkości strat złoza,
- b) zmniejszenia deformacji powierzchni,
- c) zmniejszenia zużycia materiałów podsadzkowych,

- wzrost podporności filarów otoczonych podsadzką umożliwi rozszerzenie zakresu stosowania systemów komorowo-filarowych z podsadzką hydrauliczną dla grubych złóż z podziałem na warstwy.

## LITERATURA

- [1] Faustow G.T., Rusanow P.A., Abaszin P.A.: Ob uprocznieni rudnych celikow zakładkoj. Razrabotka rudnych miestoroždienij. Wyp. 16, 1973.
- [2] Mikoś T.: Oddziaływanie materiału podsadzkiego na ociosy podsadzonych wyrobisk komorowych. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, z. 2, 1980.
- [3] Jahoda K.: Zvysuje zakładka nosnost piliru? Rudy, Rocnik 30/5, kwiecień 1982, Praha.
- [4] Kiriozenko F.S., Kostjuczenko L.M.: Wlijanie zakładki na niesuszczuju sposobnost celikow. Problemy razruszenija gornych porod. Izd. Nauka, Moskwa 1969.
- [5] Wodopianow W.L., Barkowski W.M., Artemow W.G.: Uproczniajuszczyje wozdikowije zakładki na mieždukamiernyje celiki. Naucz. Trudy Permskowo NIUI, sb. VII, 1964.
- [6] Rachimow W.A.: Wlijanije zakładki kamier na niesuszczuju sposobnost celikow. Trudy TPI, sb. 28, 1964.
- [7] Kawulok M.: Badania modelowe na piasku w wybranych zagadnieniach geotechniki oraz mechaniki górotworu. OTG, z. 23, 1973.
- [8] Dołgin N.P. i inni: Wlijanie zakładki na ustoičiwost celikow. Trudy IGD AN Kazachskoj SSR 1973.
- [9] Agoszkow M.I., Trebukow A.P.: Wlijanie zakładki na raszczetnyje razmiery celikow. Izv. AN SSSR OTN Metalurgia i toplivo nr 3, 1961.
- [10] Brezjujewski I.W., Trebukow A.P.: Niekatoryje riezultaty isledowanija niesuczczziej sposobnosti opornych celikow rozpolożonych w zakładczom masywie. Fiz.-tech. problemy rozrabotki polieźnych iskopajemych, nr 4, 1972.
- [11] Sugłubow S.N.: Ob ocenkie uproczniajuszczewo diejstwija zakładki na mieždukamiernyje celiki.
- [12] Praca zbiorowa: Analiza racjonalnych systemów eksploatacji podziemnej w kopalniach rejonu olkuskiego. Maszynopis, Kraków 1974.
- [13] Takuski S., Sepiał J.: Ocena stateczności stropów wyrobisk chodnikowych i eksploatacyjnych. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo z. 3, Kraków 1977.
- [14] Konopa W., Klej L.: Metodyka badania modelowych sytuacii górniczych z zastosowaniem nowego materiału modelowego. Przegląd Górniczy nr 12, 1976.
- [15] Majcherczyk T.: Wpływ rodzaju warstw stropowych na wielkość obciążenia obudowy w ścianowym systemie eksploatacji pokładów węgla. Praca doktorska, Kraków 1977.
- [16] Sokołowaki W.W.: Statyka supuczej sredy. Moskwa 1960.
- [17] Hosdorf H.: Statyka modelowa. Wyd. Arkady, Warszawa 1975.
- [18] Kumysz N.M.: Podporność pozniszczeniowa (residualna) górniczych filarów mieždykomorowych. Maszynopis, Wrocław 1978.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz PODGÓRSKI

Wpłynęło do Redakcji w maju 1983 r.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАКЛАДКИ  
НА ПОДПОРНОСТЬ ЦЕЛИКОВ ПРИ КАМЕРНО-ЦЕЛИКОВОЙ СИСТЕМЕ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАЛЕЖЕЙ РУД Zn-Pb

Р е з ю м е

В работе даны результаты модельных исследований над влиянием рода закладки и герметичность закладывания на устойчивость целиков при наличии деформаций в пред и по граничном состоянии. Определена функциональная зависимость между устойчивостью целиков и применяемой закладкой. Зависимость эта может быть использована при проектировании камерно-целиковых систем с закладками.

MODEL INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF STOWING UPON THE SUPPORTING  
PROPERTIES OF PILLARS IN THE CHAMBER-PILLAR EXPLOITATION  
OF Zn-Pb ROE DEPOSITS

S u m m a r y

The paper presents the results of model investigations on the effect of the kind and tightness of stowing upon the strength of the pillars when in the boundary and extra-boundary state deformations occur. The functional relation between the strength of the pillars and the applied kind of stowing has been found, which may come in useful in the designing of chamber-pillar systems of stowing.