ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: GÓRNICTWO z. 85

Nr kol. 555

Walery SZUŚCIK Kazimierz KOŚLACZ

PROJEKTOWANIE METODĄ NA DOPUSZCZALNY UDŹWIG OBUDOWY KOŁOWEJ KORYTARZOWEJ SZTYWNEJ W NIEODKSZTAŁCALNYM GÓROTWORZE OBCIAŻONEJ SIŁĄ SKUPIONĄ

<u>Streszczenie</u>. W pracy określono graniczne obciążenie skupione kokowej obudowy sztywnej. Rozwiązania problemu dokonano,stosując zasadę równowagi ogniw, klasyczną oraz własną uwzględniejąc odkształcenia sprężyste. Podano wartości obciążenie granicznego dla łuków o profilu G 110 o promieniu r = 125, 150, 175, 200 i 225 cm.Porównano wyniki z obudową wolno stojącą oraz z wynikami metody projektowanie na dopuszczalne naprężenie. Zdeterminowano graniczne wartości obciążenie dla obudowy w górotworze podatnym.

### 1. Wprowadzenie

W związku z prowadzeniem eksploatacji pokładów na coraz to większych głębokościach oraz w bardziej złożonych warunkach górniczo-geologicznych poważnym zagadnieniem staje się utrzymenie wyrobisk kapitalnych. Jedną z obudów, która może przyczynić się do rozwiązania tego problemu, jest obudowa kołowa sztywna. W pracy zajęto się projektowaniem takiej obudowy. Znane są prace starające się rozwiązać ten problem metodą projektowania na dopuszczalne naprężenie [1, 2, 3, 9, 10, 11, 19, 20]. Bardziej precyzyjną metodą projektowania jest metoda nośności granicznej. W związku z powyższym podjęto próbę opracowania tej metody.

Analizę teoretyczną przeprowadzono przy wykorzystaniu metody równowagi ogniw, a więc podejścia kinematycznego określenia nośności granicznej [4, 5, 6, 7, 8, 18].

Rozważania teoretyczne przeprowadzono przy stosowaniu klasycznej metody równowagi ogniw oraz metody własnej z uwzględnieniem zmiany długości i kształtu łuku obudowy na wskutek odkształceń sprężystych.

### 2. Analiza wytrzymałościowa kołowej obudowy korytarzowej sztywnej

## 2.1. Zastosowanie klasycznej metody równowagi ogniw

Łuk stalowej obudowy kołowej sztywnej obciążony siłą skupioną 2P (rys. 1) jest dociskany do górotworu na odcinku łuku 2or (rys. 2). Zakładając,





że górotwór jest nieodkształcalny, na odcinku 20, nie wystąpi żadna zmiana promienia krzywizny łuku, w związku z tym moment zginający w tej części łuku jest równy zeru, a reakcja górotworu q musi być stała [1].

Na odcinku łuku 20; wystąpi jedynie siła podłużna N.

Na pozostałym odcinku łuku kołowego wystąpią trzy wielkości wewnętrzne, moment zginający M, siła podłużna N, i siła poprzeczna T, zaś na styku tych łuków pojawiają się reakcje (siły skupione) R [1] (rys. 2).

Z chwilą osiągnięcie przez konstrukcję (łuk kołowy) stanu równowagi granicznej siła 2P staje się siłą graniczną 2P<sub>gr</sub>, a w konstrukcji pojawiają się przeguby plastyczne. Materiał w przegubach plastycznych zaczyne płynąć (punkty A, B, rys. 3), a odkaztałcenia mogą narastać bez wzrostu obciążeń.

Wystąpienie przegubów plastycznych zdeterminowanych kątami o musi być związane z przejściem konstrukcji z układu geometrycznie niezmiennego w mechanizm, czyli w układ mający w tym przypadku co najmniej jeden sto-



Rys. 3

A Par My B Mu Nu

Rys. 4

pień swobody (przejście to uzależnione jest od powstawania odpowiedniej liczby przegubów plastycznych).

Ne rys. 4 przedstewiono schemat obliczeniowy kołowej obudowy sztywnej z uzewnętrznieniem granicznych wielkości wewnętrznych; momentów zginających M i M<sub>1gr</sub>, sił podłużnych N<sub>gr</sub> i N<sub>1gr</sub> i siły poprzecznej P<sub>gr</sub>. Warunki równowagi dla tak przyjętego schematu zgodnie z klasyczną zasadą równowegi ogniw [4, 5, 6] opisano zależnością (1) - (równania równowagi dla ogniwa nieodkształconego):

$$M_{gr} + M_{1gr} - P_{gr} r \sin \beta_1 - N_{gr} r(1 - \cos \beta_1) = 0$$
  
-  $P_{gr} + N_{1gr} \sin \beta_1 = 0$  (1)  
$$N_{gr} - N_{1gr} \cos \beta_1 = 0$$

Na podstawie prac [12, 14, 15, 16] dla profilu stalowej obudowy korytarzowej można wyznaczyć równania krzywych granicznych w postaci funkcji:

$$M_{gr} = M_{gr}(P_{gr}, N_{gr})$$
(2)

$$\mathbf{M}_{1gr} = \mathbf{M}_{1gr}(\mathbf{N}_{1gr}) \tag{3}$$

Z uwegi na to, iż występujące tutaj wartości siły poprzecznej  $P_{gr}$  możne uznać za mełe [5, 12, 15], zeleżność (2) możne przedstawić w postaci funkcji przybliżonej:

$$M_{gr} = M_{gr}(N_{gr}) \tag{4}$$

Przyjmując krzywe graniczne (3) i (4) w postaci równań

$$M_{gr} = C_1 - C_2 N_{gr}^2$$
 (5)

$$M_{1gr} = C_1 - C N_{1gr}^2$$
 (6)

otrzymeno ukżad równań (1), (5), (6), z których wyznaczone obciążenie P<sub>gr</sub> ma postać:

$$P_{gr} = \frac{-r \sin \beta_1 (1 - \cos \beta_1) + \sqrt{\left[r \sin \beta_1 (1 - \cos \beta_1)^2 + 8C_1 C_2 \sin^2 \beta_1 (1 + \cos^2 \beta_1)\right]}}{2 C_2 (1 + \cos^2 \beta_1)}$$
(7)

gdzie:

72

Pgr - obciążenie graniczne w przegubie środkowym,

- promień obudowy,

kąt rozwarcia ogniwa,

C., C. - stałe dla danego profilu żuku obudowy.



Rys. 5

Zeleżność (7) poswela na wyznaczenie metodą kolejnych przybliżeń obciążenia granicznego obudowy 2P<sub>gr</sub> oraz położenia przegubów plastycznych P<sub>1</sub>.

Przyjmując zmienny kąt  $\beta_1$ , możne zależność (7) przedstawić graficznie w postaci wykresu w układzie  $\beta_1$ ,  $2P_{gr}$  (rys. 5), którego maksimum stanowi rozwiązenie, a więc szukaną wartość obciążenie granicznego obudowy  $2P_{gr}$  i odpowiadający tej wartości kąt rozwarcie ogniwe  $\beta_1$ .

# 2.2. Metoda własna równowegi ogniw uwzględniająca zmiane długości i kształtu łuku na wskutek odkyztałceń spreżystych

Na rys. 6 przedstawiono położenie ogniwa łuku AB (patrz rys. 3) przed i po uwzględnieniu odkształceń sprężystych Δl. W wyniku odkształceń sprężystych ogniwo AB obraca się w spósób sztywny o kąt φ dokoła punktu B, przy czym promień łuku kołowego r nie ulega praktycznie zmianie [13].

Funkt A' o współrzędnych r sin i r cos przemieszcze się do punktu A o współrzędnych 0 i y<sub>o</sub>. Położenie punktu B określeją współrzędne r sin i r cos β<sub>1</sub>. Korzystejąc z zeleżności trygonometrycznych, otrzymeno wertość współrzędnej y<sub>o</sub> oraz kąta ψ (podobnie jak w pracy[13])

$$y_0 = r \left[ \cos \beta_1 + \sqrt{(1 - \cos \beta_1)^2 - 2 \frac{\Delta 1}{r} \sin \beta_1 + (\frac{\Delta 1}{r})^2} \right]^2$$
 (8)

Projektowanie metodą na dopuszczelny udźwig ...

$$\sin \frac{\pi}{2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{r}\right)^{2} + \left[1 - \cos\beta_{1} - \sqrt{\left(1 - \cos\beta_{1}\right)^{2} - 2\frac{\Delta I}{r}\sin\beta_{1} + \left(\frac{\Delta I}{r}\right)^{2}}\right]^{2}}{2\sqrt{\sin^{2}\beta_{1} + \left(1 - \cos\beta_{1}\right)^{2} - 2\frac{\Delta I}{r}\sin\beta_{1} + \left(\frac{\Delta I}{r}\right)^{2}}}$$
(9)

Na rys. 7 przedstawiono ogniwa Łuku AB (rys. 6) z uzewnętrznionymi wielkościemi wewnętrznymi. Dla tak przyjętego schematu warunki równowagi przyjmą postać opisaną zeleżnością (10), (11), (12)

$$M_{gr} + M_{1gr} - P_{gr} r \sin \beta_{1} + N_{gr}(y_{0} - r \cos \beta_{1}) = 0$$
 (10)

$$P_{gr} - N_{1gr} \sin(\beta_1 - \frac{\varphi}{2}) = 0$$
 (11)

$$N_{gr} - N_{1}_{gr} \cos(\beta_{1} - \frac{q_{2}}{2}) = 0$$
 (12)

Dle profilu obudowy równanie krzywych granicznych przyjęto również w postaci (5) i (6).



Rys. 6

Rys. 7

Wielkość odkaztałceń sprężystych opisano przybliżoną zeleżnością:

$$\Delta 1 = \frac{\pi_r N_{1gr}}{ES}$$

### gazie:

- E moduł Younga,
- S powierzchnia przekroju poprzecznego profilu.

N związku z trudnością bezpośredniego rozwiązenie układu równań przyjęto Δl jako znane i wyznaczono z równań (11) i (10) wartości P' i P",

 $P'_{gr} = \frac{\Delta 1 ES}{r \pi} \sin(p_1 - \frac{\psi}{2})$ (14)

$$P_{gr}^{n} = \frac{1}{r \sin \beta_{1}} \left\{ 2C_{1} - C_{2} \left(\frac{\Delta IES}{r\pi}\right)^{2} \left[ \cos^{2} \left( \beta_{1} - \frac{\Phi}{2} \right) + 1 \right] + \frac{4IES}{r} \cos \left( \beta_{1} - \frac{\Phi}{2} \right) \left( y_{0} - r \cos \beta_{1} \right) \right\}$$
(15)



Rys. 8

Dla różnych kątów 🎼 ze wzorów (14) i (15) otrzymano kolejno po dwie krzywe, pokazane przykładowo na rys. które posiedają punkty przecięcie, bedace punktami krzywej 2Pgr=2Pgr(). Łącząc te punkty otrzymamy wykres, którego maksimum stanowi rozwiązanie problemu (rys. 8),a więc określenie wartości obciążenia granicznego i kąta położenia przegubów plastycznych. Zgodnie z własną metodą rozwiązanie zadania polega na wyznaczeniu maksimum obciążenia granicznego obudowy 2Pgr i odpowiadającej mu wartości kąta rozwarcie cgniwe 🤌.

# Obliczenie obciążenia granicznego obudowy kołowej korytarzowej sztywnej obciążonej siłą skupioną

Obliczenia obciążenia granicznego  $2P_{gr}$  dla prefilu G-110 (materiał o  $R_e = 4150 \frac{deN}{cm^2}$ ) dokonano metodą podaną w punkcie 2.2 niniejszej pracy,wy-korzystując wzory (8), (9), (14), (15). Wyniki z rozwiązania 2.1 są wyź-sze od niżej obliczonych. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci funkcji  $P_{gr} = 2P_{gr}(\beta_1)$  ne rys. 9. Meksimum tej funkcji odpowiada obciążeniu granicznemu  $2P_{gr}$  (stanowi rozwiązanie problemu), ześ odpowiadający temu obciążeniu kat pokożenie przegubów plastycznych.



W tablicy 1 zestewiono wartości obciążenia granicznego 2 $P_{gr}$  oraz kąta rozwarcia ogniwa  $\beta_1$  dla różnych promieni obudowy kołowej.

1

Profil	Promień żuku r [cm]	Obciążenie graniczne 2P <sub>gr</sub> [deN]	Kąt rozwarcia ogniwa β [0]	
	125	47500	26,5	
G 110	175	38450	24,3	
real size	200 225	35250 32650	23,4 prw off 23,1 og ax:	

Tablica 1

# 4. <u>Określenie obciażenie granicznego 2</u>P<sub>grw</sub> żuku kożowego wolno stojacego

Dla porównania podporności kuku obudowy sstywnej z obudową kukową wolno stojącą przeprowadzono, podobne jak w punkcie 2, rozumowanie dla kuku wolno stojącego obciążonego siłą skupioną 2P (rys. 10). Dla tak przyjętego schematu równania równowagi przedstawiono w zależności (16), (17)

$$0 = P_{gr_{w}} - N_{1gr}$$
(16)

$$0 = M_{gr} + M_{1} - P_{gr} + r$$
(17)



Rys. 10

Dla profilu obudowy z równań krzywych granicznych (5), (6) otrzymuje się:

$$M_{gr} = M_{gr_{usx}} = C_1$$
(18)

 $\mathbf{M}_{1_{gr}} = C_1 - C_2 \, \mathbf{N}_{1_{gr}}^2 \tag{19}$ 

Rozwiązując powyższy układ równań, otrzymano wielkość obciążenie granicznego P<sub>gr\_</sub> w postaci (20)

$$P_{gr_{w}} = \frac{-r + \sqrt{r^{2} + 8C_{1}C_{2}}}{2C_{1}}$$
(20)

gdzie:

r - promień łuku,

C1, C2 - stałe dla danego profilu obudowy.

Korzystając ze wzoru (20), wyzneczono wartości obciążenie granicznego 2P żuku wolno stojącego z profilu G-110 (materiał o  $R_e = 4150 \frac{dsN}{cm^2}$ ), s wyniki przedstewiono w tablicy 2.

Profil	Promień r [cm]	Obciążenie greniczne 2P <sub>grw</sub> [deN]		
	125	15239,10		
	150	12707,42		
G-110	175	10896,44		
	200	9536,78		
	225	8478,78		

Tablica 2

#### 5. Podsumowanie

Anelizę teoretyczną obudowy kołowej sztywnej zabudowenej w nieodkaztałcelnym górotworze przeprowedzono przy wykorzystaniu metody równowegi ogniw [4, 5, 6, 8]. Jest więc to podejście kinemetyczne w oszecoweniu nośności granicznej stanowiące w rozpatrywanych przypedkach (punkty 2.1 i 2.2 niniejszej pracy) rozwiązenie kompletne (ścisłe), gdyż spełnie również warunki podejście statycznego (reakcje w podejściu statycznym są w tym przypedku siłami wewnętrznymi, punkt 3.2.2 [4]). Obciążenie graniczne omewianej obudowy uzyskane w punktech 2.1 i 2.2 będą się różniły, z tym że wartości uzyskane przy uwzględnieniu odkaztałceń sprężystych są niższe, a zarazem dokładniejsze. Uzyskane obciążenia graniczne dla górotworu nieodkształcelnego  $2P_{gr}$  jak w niniejszej pracy (a podobnie jak w pracy [1]) są górną wartością obciążeń dle górotworu odkaztałcelnego  $2P_{gr}$ .

2Pgr < 2Pgr

Drugą wertość greniczną 2P uzyskać można, traktując łuk jako wolno atojący. Można więc napisać zależność

$$2P_{gr_W} < 2P_{gr_O} < 2P_{gr}$$

Dla porównania wyników uzyskanych w punktach 2 i 4 niniejszej pracy zestawiono w tablicy 3 wartości 2Pgr dla obudowy współpracującej z nieodkształcelnym górotworem i wartości 2Pgr. uzyskane dla łuku wolno stoją-

cego oraz podanu ich wzajemny stosunek  $m_{gr} = \frac{P_{gr}}{gr_{w}}$ 

Tab	11	ca	- 3
-----	----	----	-----

Profil	Promień r [cm]	2P <sub>gr</sub> [daN] dla obudowy w sztywnym górotworze	2P <sub>grw</sub> [daN] dla łuku wolno sto- jącego	$m_{gr} = \frac{P_{gr}}{P_{gr_{W}}}$	
G-110	125	47500	15239,10	3,117	
	150	42300	12707,42	3,329	
	175	38450	10896,44	3,529	
	200	35250	9536,78	3,696	
	225	32650	8478,78	3,851	

Chcąc porównać wyniki z tablicy 3 z wartościami obciążeń dopuszczalnych 2P obliczonych metodą na dopuszczalne naprężenie w pracy [1], wartości z tablicy 3 należy podzielić przez współczynnik bezpieczeństwa odniesiony do granicy plastyczności n' = 1,5. Dla materiału o  $R_e = 4150 \frac{daN}{cm^2}$ , dla którego k = 2766  $\frac{daN}{cm^2}$ , otrzymamy wartości zestawione w tablicy 4.

Tablica 4

Promień r	Obciążenia dopuszczalne dla obudowy w [daN]					Stosunek obciążeń		
[c m]	w górotworze sztywnym			wolno stojącej			dopuszczalnych	
-	2P	2Pgr n'	Pgr n' P	2P <sub>1</sub>	2Pgrw	Pgrw n'	$m_p = \frac{P}{P_1}$	$m_{gr} = \frac{P_{gr}}{gr_{w}}$
125 150 175 200 225	*) 17983 15756 13766 12444 11990	x +>) 31664 28798 25633 23497 21765	1,760 1,827 1,861 1,888 1,960	7160 5964 5115 4476 3978	10159 8471 7262 6357 5652	1,418 1,420 1,419 1,420 1,420 1,420	2,514 2,640 2,691 2,780 2,789	3,117 3,329 3,529 3,696 3,851

<sup>x)</sup>Wyniki z metody projektowania na dopuszczalne naprężenie. <sup>xx)</sup>Wyniki z metody projektowania na dopuszczalny udźwig.

Jak wynika z tablicy 4, wartości obciążeń dopuszczalnych uzyskanych metodą projektowania na dopuszczalny udźwig są 1,760-1,960 razy większe od wartości uzyskanych z metody projektowania na dopuszczalne naprężenie.

### 6. Wnioski

1. W wyniku analizy współpracy obudowy kołowej sztywnej z górotworem nieodkształcalnym otrzymano włesną teorię obliczania obciążenia granicznego (metoda projektowania na dopuszczalny udźwig).

 Dle żuków kołcwych wykonanych z profilu G-110 wyznaczono wartości graniczne obciążenia 2P<sub>gr</sub>.

3. Obciążenia graniczne omawianej obudowy kołowej sztywnej z profilu G-110 w stosunku do łuku wolno stojącego są: 3,11698-3,85078 razy większe.

4. Wartości obciążeń granicznych 2P obudowy kołowej sztywnej współpracującej z podatnym górotworem będą zawarte w przedziale:

$$2P_{gr_w} < 2P_{gr_o} < 2P_{gr}$$

5. Obciążenia dopuszczalne uzyskane z własnej metody obliczeń odniesione do naprężenia dopuszczalnego ZP od 1,760 do 1,960 razy większe od wartości uzyskanych z metody projektowania na dopuszczalne naprężenie.

### LITERATURA

- [1] Szuścik W., Bąk J.: Określenie podporności metalowej obudowy żukowej z żuków sztywnych obciążonej siżemi skupionymi. ZN Pol. Śl.Górnictwo z. 71, Gliwice 1976.
- [2] Chudek M.: Obudowa wyrobisk Wyd. Slask, K-ce 1968.
- [3] Wypchol N.: Projektowanie łukowej obudowy korytarzowej z uwzględnieniem współpracy z górotworem. Materiały Konferencyjne. Budownictwo Górnicze 1973.
- [4] Janas M.: Nośność graniczna żuków i sklepień. Biblioteka Inżynierii i Budownictwa nr 14. Warszawa 1967.
- [5] Olszak W., Perzyna P., Sawczuk A.: Teoria plastyczności FWN, Warszawa 1965.
- [6] Stevens L.K.: Carrying Capacity Of. Mild-steel Arches. Proc. of the Institution of Civie Engineers. Vol. 6. March. 1957.
- [7] Telega J.: Wyznaczanie nośności łuku kołowego przy pomocy programowania liniowego. ZN Pol. Sl. Mechanika z. 44, Gliwice 1971.
- [8] Hodge P.G.: Plastic analysis of structures Mc. Graw-Hill, New York 1959.
- [9] Drzapanaridze Ł.A.: Rascziot metaliczeskoj krepi gornych wyrabotok. Nedra, Moskwa 1975.
- [10] Rułka K.: Parametry wytrzymałościowe łukowej obudowy sztywnej w świetle przeprowadzonych badań. Arch. Górn. 1975, t. 20, nr 1.
- [11] Chudek M., Rułka K.: Konstrukcje siatkobetonowe w górnictwie. Wyd. Sląsk. K-ce 1969.

[12]	Szuścik ZN Pol.	W.: Sl.	Krzywe graniczne Górnictwo z. 6.	e profilów łukowej Gliwice 1963.	obudowy	korytarzowej.
-						

- [13] Szuścik W.: Badanie wyidealizowanego modelu kuku kokowego obudowy korytarzowej w stanie granicznym. ZN Pol.Sl. Górnictwo z. 48, Gliwice 1971.
- [14] Szuścik W.: Obciążenie graniczne przy mimośrodowym rozciąganiu i ściskaniu belek. ZN Pol. Sl., Górnictwo z. 4, Gliwice 1962.
- [15] Szuścik W.: Obciażenie graniczne przy ogólnym nierównomiernym zgineniu i ściskaniu (rozciągeniu) belek. ZN Pol. Sl. Górnictwo z. 5, Gliwice 1962.
- [16] Szuścik W.: Stan graniczny profilów stalowej obudowy górniczej.Prace doktorske. Biblioteka Pol. Sl. Gliwice 1962.
- [17] Szuścik W.: Plestyczne zginenie płaskie belek z materiałów o niesymetrycznej wytrzymałości. ZN Pol. Sl. Górnictwo z. 2, Gliwice 1959.
- [18] Brandt A.M.: Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji. PWN, Warszawa 1977.
- [19] Bąk J.: Określenie podporności metalowej obudowy kołowej z łuków sztywnych obciążonej siłami skupionymi jako funkcji odkaztałcalności podłoża. ZN Pol. Sl. Górnictwo z. 85, Gliwice 1977.
- [20] Chudek M.: Niektóre problemy kształtowania i obliczania podetnej obudowy metalowej wyrobisk korytarzowych. Prz. Górn. 1964, nr 3.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТОДОМ НА ДОПУСТИМУЮ ПОДЪЁМНУЮ СИЛУ КРЕПИ КОЛЬЦЕВОЙ ШТРЕКОВОЙ ЖЁСТКОЙ В НЕДЕФОРМИРОВАННОМ ГОРНОМ МАССИВЕ НАГРУЖЕННОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛОЙ

### Резюме

В работе определено предельную сосредоточенную нагрузку кольцевой жесткой крепи. Решение вопроса произведено, применяя принцип равновесия звеньев, классический, а также собственный, учитывая упругие деформации. Приводятся величины предельных нагрузок для арок профилем С 110 радиусом г = 125, 150, 200 и 225 см. Произведено сравнение результатов со свободностоящей крепью, а также с результатами метода проектирования на допустимую нагрузку. Предопределенно предельные величины нагрузки для крепи в податливом горном массиве.

DESIGNING STIFF CIRCULAR GALLERY LININGS FOR MAXIMUM LOAD CAPACITY TO BE PLACED IN NON-DEFORMABLE OROGEN AND LOADED BY A CONSENTRATED FORCE

#### Summary

Maximum concentrated load for a stiff circular lining has been determined. The solution was found from the classical principle, that of links balance and also on the basis of authors own method considering elastic strains. Values for limit loads for arches of the G-110 profile and with a radius of 125, 150, 200 and 225 cm have been provided. The results have been compared with those for free standing linings and with the results of the method designing for maximum stress. Maximum load values have been determined for linings to be placed in deformable orogen conditions.