ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: GÓRNICTWO z.220 Nr kol. 1242

Stanisław OLEKSY
Instytut Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego
i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, Gliwice

# WYTRZYMAŁOŚĆ CYLINDRYCZNEJ OSŁONY STALOWEJ CHRONIĄCEJ SZYB NA ODCINKU WARSTW ZAWODNIONYCH

**Streszczenie**. W pracy określono obciążenie krytyczne, jakie jest w stanie przejąć cylindryczna osłona stalowa zapewniająca ciągłość obudowy szybu na odcinku warstw zawodnionych. Założono, że z punktu widzenia statyki osłona stanowi rurę cienkościenną. Opierając się na przeprowadzonym rozważaniu analitycznym wykazano, że wytrzymałość na równomierne obciążenie zewnętrzne cylindrycznej osłony stalowej stosowanej w praktyce do ochrony obudowy szybów na odcinku warstw zawodnionych jest niewielka. W praktyce o wytrzymałość osłony decydują elementy ją usztywniające, takie jak: przykotwienie do obudowy, przespawanie do zbrojenia, a najczęściej wzmocnienie pierścieniami wykonanymi z profili korytkowych.

Do obliczania nośności pierścieni wzmacniających wykorzystano teorię powłok.

# STRENGTH OF THE STEEL CYLINDRICAL CASING PROTECTING THE SHAFT IN THE DEBACLE LAYER

**Summary**. The paper presents cristal loading for cylindrical steel casing, capable of taking over the loading and ensuring uninterrupted reconstruction process of the shaft in the debacle layer. From the viewpoint of statics, the casing has been assumed to be constructed as light-wall tube. The analytical reasoning applied to the problem has showm that uniform external loading strength of the steel cylindrical casing, practically applied to protect the shaft casing in the debacle layer, is small. In practice, the loading strength is determined by elements striffening the casing, such as: anchoring (bracing) to the casing, welding on the reinforcement, r most frequently, strengthening

with rings made up of rolled sections. To calculate the loadnig capacity of strengthening ring, coat theory (shell theory) has been applied.

# ПРОЧНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, ПРЕДОХРАНЯЮЩЕЙ СТВОЛ НА УЧАСТКЕ ОБВОДНЕННЫХ СЛОЕВ

**Резюме**. В работе установлена критическая нагрузка, которую может воспринять стальная защита, обеспечивающая непрерывность крепления шахтного ствола на участке обводненных слоев. Принимается, что с точки зрения статики, защита представлает собой тонкостенную трубу. На основе проведенных аналитических рассуждений было доказано, что прочность на равномерную внешнюю нагрузку цилиндрической стальной защитл, применяемой на практике для крепления шахтных стволов на участке обводненных слошев, небольшая. На практике, решительное значение для прочность защиты зависит от элементов, обеспегивающих ее жесткость, таки как: анкерное крепление, приварка к армировке, а чаще всего укрепление кольцами из лотковых профилей.

Для расчета предельной нагрузки укреплющих колец была использована теория оболочек.

## 1. WPROWADZENIE

Dla ochrony szybów przed wplywem eksploatacji pozostawia się odpowiednio wyznaczone partie nie wybranego złoża w postaci tzw. filarów ochronnych. W związku z koniecznością sięgania po coraz to głębiej zalegające zasoby pozostawione filary szybowe zaczynają przybierać bardzo duże rozmiary [3].

W miarę rozwoju osiągnięć nauki i praktyki górniczej w dziedzinie mechaniki górotworu doprowadzono do poglądu, że należy eksploatować szybowe filary ochronne. Planową eksploatację filarów szybowych w Polsce prowadzi się od 1962 r.

Podjęcie eksploatacji węgla w filarach ochronnych spowodowało zmianę pojęcia filaru szybowego. Z dotychczasowych osiągnięć naukowych i doświadczeń uzyskanych z prowadzenia eksploatacji filarów ochronnych wynika, że w zasadzie każdy filar ochronny może być eksploatowany, jeżeli zastosuje się odpowiedni system eksploatacji i odpowiednie zabezpieczenie obiektu chronionego.

Skala trudności podjęcia eksploatacji w poszczególnych filarach może być jednak skrajnie różna. Zależy to głównie od budowy geologicznej, występowania zagrożenia wodnego, stanu dotychczasowej eksploatacji złóż, konstrukcji i wyposażenia szybu.

Do podstawowych zagadnień związanych z eksploatacją pokładów w filarze ochronnym należy zaliczyć:
- określenie przewidywanych deformacji górotworu wokół szybu wywołanych eksploatacją górniczą,
- określenie odporności obudowy szybu na wpływ eksploatacji górniczej [6],
- określenie potrzebnych zabezpieczeń obudowy szybu i jego wyposażenia dla przeniesienia prognozowanych wskaźników deformacji.

Obudowa szybowa przylegając całą swoją powierzchnią zewnętrzną do górotworu przejmuje wszystkie składowe stanu odkształcenia, a w szczególności nieistotne dla budowli powierzchniowych odkształcenia pionowe. Można w zasadzie przyjąć, że właśnie odkształcenia pionowe górotworu są decydującym parametrem dla zachowania stateczności obudowy szybu.

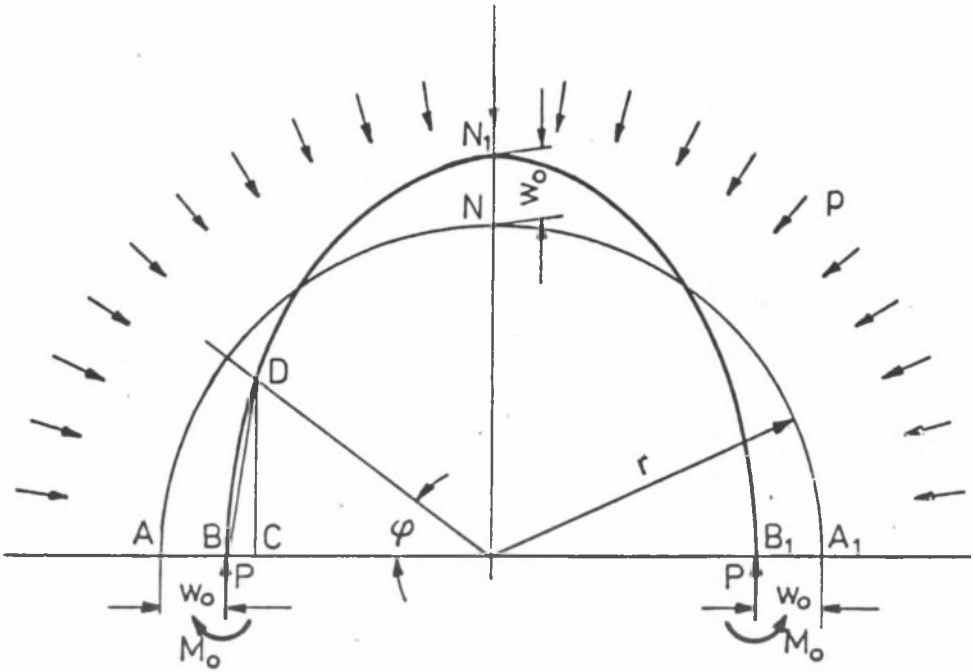
Przekroczenie dopuszczalnych odkształceń materiału obudowy prowadzi do przerwania jej ciągłości, co jest szczególnie niebezpieczne na odcinku warstw zawodnionych. Wypływająca woda wynosząc części stale doprowadza do powstawania pustek za obudową szybu, które zagrażają jej stateczności. Pustki tworzące się na małej głębokości mogą doprowadzić do powstawania zapadlisk na powierzchni. Stwarzają one niebezpieczeństwo dla istnienia wieży szybowej i budynków nadszybia - czyli istnienia szybu.

Obecnie w praktyce do zabezpieczenia szybu przed wyciekami wody wykonuje się na odcinku warstw zawodnionych tzw. płaszcz stalowy. Jest to wodoszczelny ekran wykonany z arkuszy blachy stalowej o grubości kilkunastu milimetrów, mocowany do obudowy szybu. Przestrzeń między płaszczem a obudową wypełnia się betonem.

Po tym wprowadzeniu przechodzimy do opracowania metodyki wymiarowania takiej osłony. Ustalenie metodyki rozpoczniemy od określenia obciążenia krytycznego płaszcza stalowego. Zakładamy, że wskutek spękania obudowy, spowodowanego eksploatacją osłona zostanie obciążona na całym swym obwodzie ciśnieniem hydrostatycznym.

## 2. OKREŚLENIE OBCIĄŻENIA (CIŚNIENIA) KRYTYCZNEGO CYLINDRYCZNEJ OSŁONY STALOWEJ

W obliczeniach wytrzymałościowych osłonę będziemy traktować jako rurę cienkościenną. Obciążenie krytyczne, jakie jest w stanie przejąć ta osłona, określimy z warunku stateczności. Zakładamy, że ciśnienie zewnętrzne osiągnęło wartość krytyczną i kształt rury odbiegał trochę od kołowego (rys.1).




Rys. 1. Schemat sil do obliczania obciążenia krytycznego płaszcza stalowego
Fig. 1. Diagram of forces needed to calculate the critical loading of steel sleeve

Z rury wyodrębniamy półpierścień $ANA_1$, który przy zewnętrznym obciążeniu, równym krytycznemu, przyjmuje kształt półowalny $BN_1B_1$. Oddziaływanie odrzuconego półpierścienia na rozpatrywany zastępujemy siłami P i $M_0$, przyłożonymi w przekrojach $BB_1$. Różniczkowe równanie wygiętej osi pręta z pierwotną osi opisaną łukiem koła ma postać [7]:

$$\frac{d^2w}{d\varnothing^2} + w = -\frac{Mr^2}{EJ}, \tag{1}$$

gdzie:
w - radialne przemieszczenie punktów osi,
r - promień linii osi,
∅ - kąt środkowy,
E - sztywność pręta na zginanie,
M - moment gnący.
Moment gnący w dowolnym przekroju D, uwzględniając siły i momenty leżące po jego lewej stronie, wyniesie:

$$M = M_0 + P*BC - \frac{p*BD^2}{2} \tag{2}$$

Wielkość siły P będzie równa p * OB. Łuk BD zastępujemy cięciwą BD. Podstawiając do zależności (2) za wielkość P wielkość p * OB otrzymujemy:

$$M = M_0 + \frac{1}{2}p(2OB*BC + BD^2) \tag{3}$$

Przekształcamy wyrażenie (3). Z trójkąta OBD otrzymamy:

$$OD^2 = OB^2 + BD^2 - 2OB*BC,$$

stąd:

$$2OB*BC - BD^2 = OB^2 - OD^2,$$

ale:

$$OB = r - w_0 \quad \text{a} \quad OD = r - w$$

Pomijając jako bardzo małe wielkości $w^2$ i $w_0^2$ otrzymujemy:

$$2OB*BC - BD^2 = -2rw_0 + 2rw \tag{4}$$

Podstawiając powyższe do zależności (3) otrzymamy:

$$M = M_o + prw_o + prw, \tag{5}$$

Otrzymane wyrażenie (5) podstawiamy do równania (1), które przybiera postać:

$$\frac{d^2w}{d\varnothing^2} + (1 + \frac{pr^3}{EJ})w + \frac{-M_o r^2 + prw_o}{EJ}. \tag{6}$$

Jest to równanie różniczkowe liniowe niejednorodne rzędu drugiego o stałych współczynnikach, którego całka ogólna ma postać:

$$w = A\cos\lambda\varnothing + B\sin\lambda\varnothing + \frac{-M_o r^2 + pr^3 w_o}{EJ + pr^3}, \tag{7}$$

gdzie:

$$\lambda^2 = 1 + \frac{pr^3}{EJ}. \tag{8}$$

Nieznane stałe (a, $\lambda$, B, $M_0$) w otrzymanym rozwiązaniu określimy z warunków brzegowych.

Z rys.1 wynika, że przy $\varnothing = 0$ i dla $\varnothing = \pi/2$ radialne przemieszczenia w osiągają wartości ekstremalne, tj. max lub min. więc pochodne $dw/d\varnothing$ dla tych wartości $\varnothing$ powinny wynosić zero. W takim razie dla określenia stałych (A, $\lambda$, B) i momentu $M_0$ w otrzymanym rozwiązaniu (7) mamy następujące warunki brzegowe:

dla $\varnothing = 0$

$$1.\ w = w_o \qquad 2.\ \frac{dw}{d\varnothing} = 0 \tag{9}$$

dla $\varnothing = \pi/2$

$$3.\ w = -w_o \qquad 4.\ \frac{dw}{d\varnothing} = 0 \tag{9}$$

Rozwiązując powyższy układ równań otrzymujemy:

$$A = w_0; \qquad B = 0; \qquad M_0 = prw_0$$

$$\sin \pi\lambda / 2 = 0; \qquad \cos \pi\lambda / 2 = 0 \tag{10}$$

Wykorzystując wartości sin $\pi\lambda/2$ i cos $\pi\lambda/2$ znajdujemy:

$$\frac{\pi\lambda}{2} = \pi n \qquad (n = 1, 3, 5, ...)$$

Najmniejszą wartość na $p_{kr}$ otrzymamy dla n = 1, tj.:

$$\frac{\pi\lambda}{2} = \pi \quad \text{stąd } \lambda = 2$$

Podstawiając w miejsce $\lambda$ jej znaczenie określone zależnością (8) otrzymujemy:

$$4 = 1 + \frac{pr^3}{EJ} \tag{11}$$

Wprowadzając za osiowy moment bezwładności J prostokąta jego wartość, tj. $\delta^3/12$ - gdzie $\delta$ grubość ścianki płaszcza rury i rozwiązując równanie (11) otrzymujemy następującą zależność:

$$p_{kr} = 2 * E * k^3, \tag{12}$$

gdzie:

k - stosunek grubości płaszcza osłony do jego średnicy, czyli $\delta/2r$.

Zależność ta została wyprowadzona dla pierścienia. Przy przechodzeniu do rury (do cylindra) należy w miejsce zwykłej sztywności E wprowadzić sztywność cylindryczną $E/1 - \nu^2$.

Ostatecznie zależność na ciśnienie krytyczne, jakie jest w stanie przejąć płaszcz stalowy z warunku stateczności, przyjmie postać:

$$p_{kr} = 2\frac{E}{1-\nu^2}k^3 \tag{13}$$

Opierając się na powyższej zależności, określimy obciążenie krytyczne dla osłony stalowej (stal St4Sx) mając następujące dane:
E = 21000 MPa, $\nu$ = 0,3, $\delta$ = 8 mm, r = 2350 mm. Ciśnienie krytyczne osłony o podanych parametrach wg zależności (13) wynosi:
$p_{kr}$ = 0,0023 MPa

Z przedstawionych rozważań wynika, że wytrzymałość na obciążenie zewnętrzne cylindrycznej osłony stalowej stosowanej w praktyce do ochrony obudowy szybów na odcinku warstw zawodnionych jest niewielka. Należy zaznaczyć, że podana zależność (11) na obciążenie krytyczne osłony zaniża jej wielkość, gdyż nie uwzględnia odkształcenia osłony w warunkach jej skrępowania. W praktyce o wytrzymałości osłony decydują elementy ją usztywniające, takie jak: przykotwienie jej do obudowy, przyspawanie do zbrojenia., usztywnienie pierścieniami.

## 3. METODYKA WYMIAROWANIA KOŁOWYCH PIERŚCIENI WZMACNIAJĄCYCH WYTRZYMAŁOŚĆ PŁASZCZA STALOWEGO

W praktyce najczęściej płaszcz stalowy wzmacnia się pierścieniami wykonanymi z profili korytkowych. Do obliczenia nośności takiego pierścienia wykorzystamy teorię powłok, która została zapoczątkowana w matematyce jako ogólna teoria powierzchni, a następnie rozwinięta w zakresie konstrukcji budowlanych i maszynowych. Dostosowanie ogólnej teorii powłok na potrzeby podziemnego budownictwa górniczego zostało przedstawione w pracy [1].

Stateczność pierścienia wzmacniającego płaszcz stalowy określona zostanie przy powolnym narastaniu sił zewnętrznych. Jest to tak zwana stateczność statyczna w odróżnieniu od stateczności dynamicznej, gdy obciążenie jest zmienne w czasie i może narastać w sposób nagły. Obciążenie krytyczne pierścienia oblicza się z zależności podanej w pracy [4].

$$p_{kr} = 3\frac{EI}{r^2} \tag{14}$$

Z zależności tej wynika, że osiowy moment bezwładności pierścienia, a więc kształt przekroju poprzecznego i jego wymiary geometryczne odgrywają decydującą rolę w przenoszeniu sił zewnętrznych. Zależność (14) określa dla rozpatrywanego pierścienia tzw. górne obciążenie krytyczne. Jest to największe obciążenie, jakie pierścień może przenieść, gdy ma kształt idealnie odpowiadający geometrii schematu obliczeniowego - a więc pierścienia kołowego.

W przypadku wystąpienia niedokładności wykonawczych pierścienia zachowuje się on tak pod wpływem sił, jakby jego postać była nieliniowa zależna od obciążenia. Obciążenia krytyczne wyznaczone w założeniu nieliniowości geometrycznej, czyli inaczej mówiąc z uwzględnieniem niedokładności wykonawczych, dają tzw. dolne obciążenie krytyczne, czyli najmniejsze wartości obciążeń zewnętrznych, mogące doprowadzić do wyboczenia ścianki pierścienia.

W praktycznych obliczeniach należy się zawsze posługiwać dolnym obciążeniem krytycznym, gdyż zawsze występują pewne odchyłki wykonawcze od założonego. kształtu geometrycznego. Poza tym mogą wystąpić deformacje spowodowane nierównomiernością obciążeń zewnętrznych, które ustrój wyjściowo sprężyście liniowy zamieniają na ustrój nieliniowy.

Dla obciążeń bocznych pierścienia i proporcji jego wymiarów poprzecznych do promienia szybu (płaszcza) można przyjąć w wyniku badań modelowych i analizy teoretycznej [2], [5], że

$$p_{krd} = 0,75 p_{krg} \tag{15}$$

Uwzględniając zależność (15), wzór (14) na obciążenie krytyczne pierścienia sprężystego przyjmie postać:

$$p_{krd} = 2,15 \frac{EI}{r^2} \tag{16}$$

## 4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że wytrzymałość z punktu widzenia stateczności tzw. płaszcza stalowego stosowanego w praktyce do konstrukcyjnego zabezpieczenia wodoszczelności obudowy szybu na odcinku warstw zawodnionych jest niewielka. Grubość płaszcza (blach stalowych) powinna wynikać przede wszystkim z odstępu elementów nośnych oraz czasu jego użytkowania i warunków pracy (agresywność środowiska). Elementami nośnymi są kołowe pierścienie, które przejmują pełne prognozowane obciążenie zewnętrzne. Metodyka ich wymiarowania została zaproponowana w prezentowanej pracy.

LITERATURA

[1] Borecki M., Chudek M., Ledwoń J.: Stateczność ścianki cylindrycznej obudowy szybowej. Przegląd Górniczy nr 1/1975.
[2] Briger I.A., Panowsko Ja.G.: Procznost ustoicziwost koliebanija - Sprawocznik. Izdatielstwo Maszinostrojenje, Moskwa 1958.
[3] Oleksy S.: Wpływ modelu kopalni i zasobności złoża na ilość zasobów uwięzionych w filarach szybowych. Praca doktorska. AGH, Kraków 1974.
[4] Timoshenko S.: Theory of elastic stability. N. Jork-Londyn 1936.
[5] Wolmir A.S.: Ustoicziwost deformirujemych sistiem. Izdatielstwo Nauka, Moskwa 1967.
[6] Oleksy S., Kwaśniewski M.: Bezpieczna głębokość eksploatacji pokładu w szybowym filarze ochronnym. Prace GIG. Komunikat nr 653. Katowice 1975.

Recenzent: Dr hab.inż. Andrzej **Żorychta** prof. AGH

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1994 r.

**Abstract**

To protect the shaft subjected to the effects of mining, against water, debacle (inrush), the present practical approach favours the construction of so-called steel sleeve (jacket, casing) in the debacle layer. It is a waterproof casing made of steel sheet, a dozen or so millimeters thick.

The paper presents the dimensioning methodology of such a casing. It has been assumed that from the viewpoint of statics, the casing is constructed as light-wall tube. Fig.1 presents the diagram of forces needed to calculate the critical loading of the casing, from the stability condition. On the basis of analytical reasoning applied to the problem, it has been shown that uniform external loading strength of steel cylindrical casing, used to ensure continuity of shaft reconstruction in the debacle layer, is small, which results from dependence No 13. In practice, the casing strength is determined by the strengthening elements such as: anchoring (barcing) to the casing, welding on the reinforcement, or, most, often, ings made up of rolled sections. To calculate the strength of such strengthening rings, coat theory (shell theory) has been applied. Stability of the ring has been determined with the assumption of a slow inctease of external forces. It can be referred to as so called tatic stability, as opposed to the

dynamic one, in cases when loading undergoes changes in time, and may unexpectedly increase. Critical loading of the ring is presented in the equation No 16.

The dependence shows that axial moment of inertia of the ring i.e. the shape of cross section and its geometrical dimensions, play the crucial role in the transfer of external forces.