ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: GÓRNICTWO z. 254 Nr kol. 1563

Stanisław OLEKSY
Politechnika Śląska, Gliwice

STATECZNOŚĆ SZYBU NIERÓWNOMIERNIE OBCIĄŻONEGO

Streszczenie. Nierównomierne obciążenie jest przyczyną powstawania w obudowie momentów gnących. Na podstawie rozważań teoretycznych określono graniczną wartość współczynnika zmienności obciążenia, przy którym w obudowie nie pojawią się naprężenia rozciągające. Wartość współczynnika zależy od grubości obudowy i wielkości przekroju poprzecznego szybu.

STABILITY OF SHAFT LOADING NON – UNIFORM

Summary. Non uniform loading is the cause of forming bending moment in lining. On the base of theoretical analyses there are defined limits index of non-uniform loading, Under that non-appears tensile stresses in shaft lining. Value of this index depends on thickness of shaft lining and shaft diameter.

1. Wprowadzenie

W obudowie szybu o kształcie kołowym obciążonej równomiernym ciśnieniem zewnętrznym występują tylko naprężenia ściskające.

Przyjmuje się, że w trudnych warunkach hydrogeologicznych w skałach plastycznych luźnych, zawodnionych, a przede wszystkim przy dużym nachyleniu warstw skalnych, może wystąpić nierównomierne obciążenie obudowy szybu ze strony górotworu. Nierównomierne obciążenie powoduje powstanie w obudowie szybu dodatkowych sił wewnętrznych. Szczególnie niebezpieczne są momenty gnące, które przy przekroczeniu pewnych wielkości powodują pojawienie się w murowej obudowie szybu naprężeń rozciągających, do przenoszenia których jest ona nieprzystosowana. Wskazują na to występujące ukośnie pęknięcia obudów murowych szybów istniejących.

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu nierównomiernego obciążenia szybu na przebieg sił wewnętrznych w jego obudowie.

2. Analiza statyczno–wytrzymałościowa

Stan naprężenia w obudowie szybu wynika z konfiguracji jego obciążenia zewnętrznego. W przypadku nierównomiernego obciążenia szybu o tarczy kołowej, zagadnienie wyznaczenia stanu naprężenia w jego obudowie staje się zagadnieniem złożonym.

Opierając się na analizie rozwiązań dla osiowej symetrii obciążenia przyjęto dla szybu na danej głębokości model płaskiego kołowego pierścienia o prostokątnym przekroju poprzecznym, znajdującego się pod działaniem zrównoważonego obciążenia zewnętrznego. Obciążenie to jest ciągłe, przebiega symetrycznie wg założonego schematu uwidocznionego na rysunku 1. Przebieg obciążenia wyodrębnionego pierścienia z obudowy szybu opisuje funkcja:

$$p(\varphi) = p_0 + q_0 \cos 2\varphi \tag{1}$$

gdzie:

p_0 – składowa obciążenia stałego,

q_0 – składowa obciążenia zmiennego.

Mamy tutaj (rys. 1) do czynienia z symetrią układu i obciążenia względem dwóch osi pierścienia. W tym przypadku pierścień jest układem jednokrotnie statycznie niewyznaczalnym [1]. Siły poprzeczne w przekrojach pokrywających się z osiami symetrii są równe zeru, a siły podłużne w tych przekrojach oblicza się z równań rzutów na oś symetrii sił działających na połowę pierścienia.

Rozpatrując układ zastępczy pokazany na rys. 2 jedyną niewiadomą, którą jest moment zginający, wyznaczamy z następującego równania metody sił wyrażającego warunek ciągłości przemieszczeń [2]:

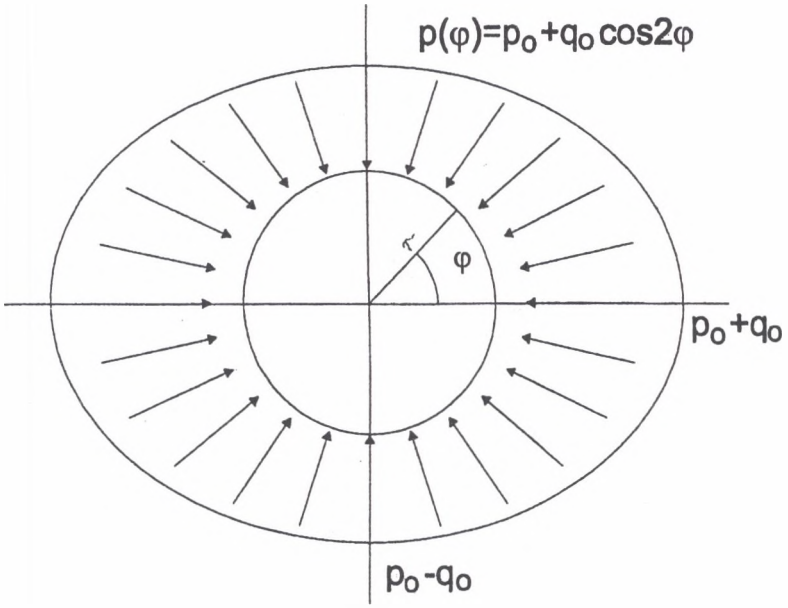
$$\delta_{33} X_3 + \Delta_{3p} = 0 \tag{2}$$

gdzie:

X_3 – niewiadomy moment zginający,

δ_{33} – przemieszczenie (obrót) od obciążenia (momentu) jednostkowego,

Δ_{3p} – przemieszczenie obrót od obciążeń (momentów) zewnętrznych.



Rys. 1. Konfiguracja obciążenia obudowy szybu
Fig. 1. Configuration of loading in shaft lining

Z równania rzutów sił działających na połowę pierścienia (rys. 2) obliczamy siłę podłużną:

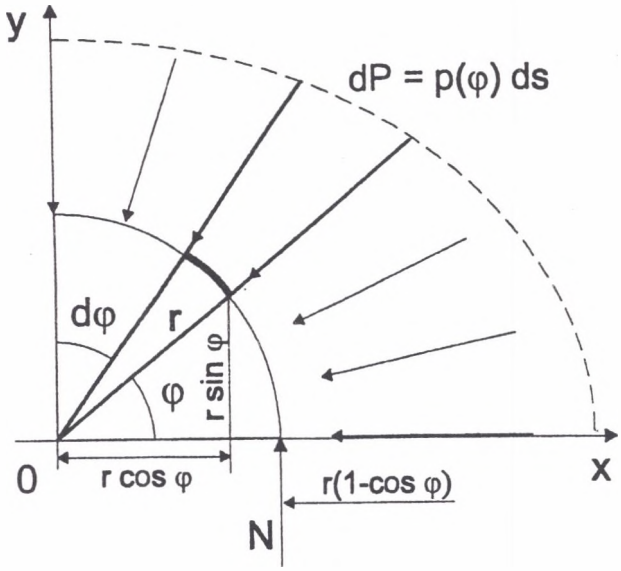
$$N=\frac{1}{2}\int_0^{\pi} p(\varphi)\cdot\cos\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)ds=\int_0^{\frac{\pi}{2}}(p_0+q_0\cos 2\varphi)\sin\varphi r\,d\varphi$$

$$N=p_0\,r-\frac{1}{3}q_0\,r=\left(p_0-\frac{1}{3}q_0\right)r \tag{3}$$

Przechodzimy obecnie do określenia momentu gnącego w dowolnym przekroju poprzecznym określonym kątem φ (rys. 2) od zadanego obciążenia p(φ). Tak jak elementarna siła działająca na łuk ds jest równa dP = p(α) ds = p(α)r dα, to elementarny moment nią wywołany w przekroju określonym kątem φ wynosi:

$$dM=d\,\mathrm{Pr}\sin(\varphi-\alpha)=p(\alpha)\,ds\,r\sin(\varphi-\alpha)=(p_0+q_0\cos 2\alpha)r^2\sin(\varphi-\alpha)d\alpha \tag{4}$$

Całkowity moment gnący w tym przekroju od wszystkich sił działających na łuku o kącie środkowym φ otrzymamy z zsumowania wszystkich momentów elementarnych:



Rys. 2. Przyjęty układ zastępczy
Fig. 2. Equivalent circuit

$$M_{p(\varphi)} = \int_0^{\varphi} (p_0 + q_0 \cos 2\alpha) r^2 \sin(\varphi - \alpha) d\alpha \tag{5}$$

Po rozwiązaniu powyższej zależności, wzór na moment w dowolnym przekroju pierścienia przybiera postać:

$$M_{p(\varphi)} = -p_0 r^2 (1 - \cos\varphi) - \frac{1}{3} q_0 r^2 (\cos\varphi - \cos 2\varphi) \tag{6}$$

Otrzymaną wielkość powiększamy o wartość momentu jaki powoduje znana siła N w przekroju określonym kątem φ:

$$M_N = N \cdot r (1 - \cos\varphi) = \left(p_0 - \frac{1}{3} q_0 \right) r^2 (1 - \cos\varphi) \tag{7}$$

czyli:

$$M_p = M_N + M_{p(\varphi)}$$

$$M_p = \left(p_0 - \frac{1}{3} q_0 \right) r^2 (1 - \cos\varphi) - p_0 r^2 (1 - \cos\varphi) - \frac{1}{3} q_0 r^2 (\cos\varphi - \cos 2\varphi) \tag{8}$$

Mając określoną wartość M_p obliczamy współczynniki równania harmonicznego (2) korzystając z zależności Maxwella – Mohra:

$$EI\Delta_{3p} = \int_s M_3 M_p ds == \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_3 M_p \, r \, d\varphi = = \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_p r \, d\varphi =$$
$$= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\left(p_0 - \frac{1}{3} q_0 \right) r^2 (1 - \cos\varphi) - p_0 r^2 (1 - \cos\varphi) - \frac{1}{3} q_0 r^2 (\cos\varphi - \cos 2\varphi) r d\varphi \right] \tag{9}$$

$$EI\Delta_{3p} = -\frac{1}{6} \pi q r^3 \tag{10}$$

$$EI\delta_{33} = \int M_3^2 \, ds = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 \cdot r \cdot d\varphi = \frac{1}{2} \pi r \tag{11}$$

Znając współczynniki Δ_{3p} i δ_{33} określamy z równania (2) nieznaną wielkość nadliczbową X_3:

$$X_3 = -\frac{\Delta_{3p}}{\delta_{33}} = -\frac{-\frac{1}{6} \pi q_0 r^3}{\frac{1}{2} \pi r} = \frac{1}{3} q \cdot r^2 \tag{12}$$

Ostateczny przebieg momentów M(φ) w rozpatrywanym pierścieniu obudowy otrzymujemy na zasadzie superpozycji:

$$M(\varphi) = M_3 X_3 + M_p$$

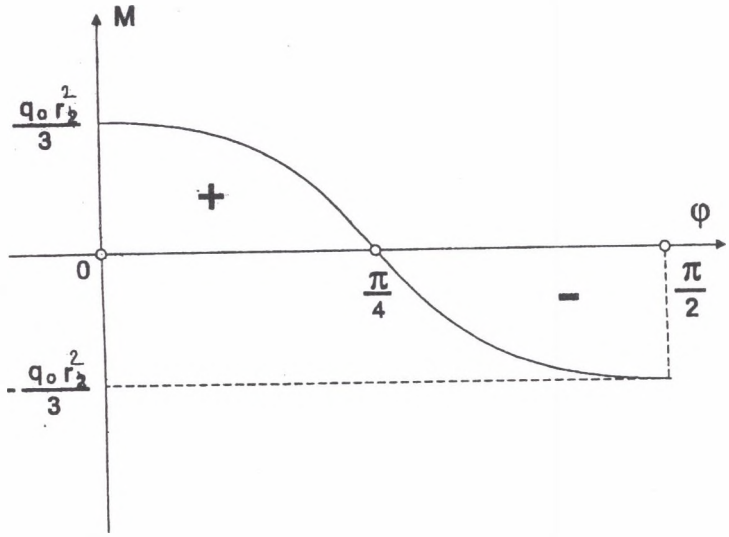
$$M(\varphi) = \frac{1}{3} q_0 r^2 + \left(p_0 - \frac{1}{3} q_0 \right) r^2 (1 - \cos\varphi) - p_0 r^2 (1 - \cos\varphi) - \frac{1}{3} q_0 r^2 (\cos\varphi - \cos 2\varphi) \tag{13}$$

Po wykonaniu zaznaczonych działań i redukcji wyrazów podobnych otrzymujemy:

$$M(\varphi) = \frac{q_0 r^2 \cos 2\varphi}{3} \tag{14}$$

W oparciu o powyższą zależność sporządzono wykres przebiegu momentów (rys. 3).

W celu ułatwienia wyciągnięcia wniosków praktycznych z otrzymanego rozwiązania przyjęto, że składowe obciążenia obudowy p_0 i q_0 są sobie równe. Przy tym założeniu, przeprowadzone rozważania obejmują tylko dodatkowe obciążenie nierównomierne, które zmienia się od $2q_0$ dla $\varphi = 0$ do 0 dla $\varphi = \frac{\pi}{2}$ i analogicznie symetrycznie w pozostałych ćwiartkach pierścienia obudowy.



Rys. 3. Przebieg momentów gnących szybu
Fig. 3. Course of shafts bending moments

Całkowite obciążenie obudowy szybu p_c jest równe sumie stałego obciążenia radialnego p i dodatkowego zmiennego q_0, co opisuje zależność:

$$p_c = p + q(1 + \cos 2\varphi) \tag{15}$$

Przy takiej konfiguracji obciążenia, skrajne wartości naprężeń normalnych w przekroju pierścienia dla φ = 0 traktowanego jako pręt słabo zakrzywiony określa zależność:

$$\sigma_{\varphi=0} = \frac{N_p + N_q}{A} \mp \frac{M}{W} \tag{16}$$

gdzie:

A = d - pole przekroju pierścienia, prostokąt o jednostkowej wysokości i podstawie, d – grubość obudowy,

$N_p = p \cdot r$ - siła podłużna od obciążenia stałego,

$N_q = \frac{2}{3} q_0 \cdot r$ - siła podłużna od obciążenia zmiennego (wg wzoru 3),

$M = \frac{q_0 \cdot r^2}{3}$ - moment wywołany dodatkowym nierównomiernym obciążeniem q_0 (wg wzoru 14)

$W = \frac{d^2}{6}$ - wskaźnik przekroju pierścienia na zginanie.

Wstawiając powyższe dane do zależności (16) otrzymujemy:

$$\sigma_{\varphi=0} = \frac{p \cdot r + \frac{2}{3} q_0 r}{d} \mp \frac{q_0 r^2}{3} \cdot \frac{6}{d^2} \tag{17}$$

W obudowie nie występują naprężenia rozciągające, gdy zależność (17) spełnia warunek:

$$\left(p + \frac{2}{3} q_0\right) \frac{r}{d} - 2 q_0 \left(\frac{r}{d}\right)^2 \geq 0$$

Po przekształceniach przyjmuje on postać:

$$\frac{2 q_0}{p} \leq \frac{3d}{3r - d} \tag{18}$$

Stosunek maksymalnego obciążenia zmiennego do obciążenia równomiernego stałego nazwano współczynnikiem zmienności obciążenia [3] . Współczynnik ten jest równy:

$$W = \frac{q_0}{p} = \frac{2 q_0}{p} \tag{19}$$

Z analizy prawej strony wyrażenia (18) wynika, że dla szybów o średnicach od 5 do 10 m i grubości obudowy 0,5 m przyjmuje ona wartość od 0,21 do 0,10. Oznacza to, że jeżeli współczynnik zmienności obciążenia przekroczy podane wartości w kołowej obudowie szybu, wystąpią naprężenia rozciągające.

3. Podsumowanie

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że graniczna wartość współczynnika zmienności obciążenia, przy której w kołowej obudowie szybu nie wystąpią naprężenia rozciągające, wynosi:

$$\omega = \frac{3d}{3r - d} \tag{20}$$

Wielkość graniczna współczynnika ω zależy od grubości obudowy d i wielkości przekroju poprzecznego szybu. Dla szybów o średnicach od 5 do 10 m i grubości 0,5 m przyjmuje on wartości w granicach 0,21 ÷ 0,11 (tj. 23 ÷ 11%). Jeżeli wartość współczynnika przekroczy podane wartości, w murowej obudowie szybu pojawią się naprężenia

rozciągające, do przenoszenia których jest ona nieprzystosowana. Wskazują na to występujące ukośnie pęknięcia obudów szybów istniejących.

LITERATURA

1. Dyląg Z., Filip F., Krzemińska–Niemiec E.: Mechanika budowli, t. 1 i 2, PWN, Warszawa 1980.
2. Walewski J.: Zasady projektowania kopalń. Część V. Projektowanie szybów i szybików. Wydawnictwo „Śląsk", Katowice 1965.
3. Rakowski G, Solecki R.: Pręty zakrzywione – obliczenia statyczne. Arkady, Warszawa 1965.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka

Abstract

In hard hydrogeological conditions in plastics, slacks, aquatic rocks and first of all with great slope rocks measures it could appear non-uniform loading on shafts lining from the side of rocks mass. Non-uniform loading on shafts lining could appear by the reason of mining exploitation. This loading gives occasion to erase in shafts lining additional internal forces. The most dangerous are the bending moments and bounded with them tensile stresses, which shafts brick lining aren't adapted for carrying it out. In this paper, on the base of theoretical considerations established relationships for determined boundary value variability loaded factor. The value of this factor connected with thickness of lining and with dimensions of transverse section of shaft.