ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: GÓRNICTWO z. 242 Nr kol. 1428

Jarosław BRODNY, Ewa NAHORNIAK

WYZNACZANIE NOŚNOŚCI ODRZWI OBUDOWY CHODNIKOWEJ OTWARTEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie projektowania odrzwi obudowy chodnikowej wykorzystując do obliczeń numerycznych oprogramowanie MSC/NASTRAN oparte na metodzie MES. Istotą modelu obliczeniowego jest przyjęcie charakterystyk sprężysto-plastycznych stali, z jakich wykonano odrzwia i przeprowadzenie nieliniowej analizy wytrzymałościowej. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami badań stanowiskowych odrzwi obudowy chodnikowej otwartej stosowanej w górnictwie podziemnym złożonej z łuków stalowych wykonanych z kształtowników o profilu V. Omówiono aktualnie stosowaną metodę stanów granicznych analizy wytrzymałościowej oraz przeprowadzono symulację obliczeniową.

DETERMINATION OF LOAD CAPACITY OF OPEN TIMBERING DOORS

Summary. The paper presents problems involving the design of arch timbering doors, applied in underground mining, made of steel V-shaped arches (profiles).The currently applied method for strength analysis is the limit states method, however, a computer simulation was carried out on the modelled timbering using the finite elements method by the help of MSC/NASTRAN program for numerical calculations. The necessity of the calculating program is to have the elastic-plastic characteristic for steels from which timbering were used, and to carry out non-linear strength analysis. Obtained results were compared with test-stand studies.

1. Wstęp

Warunki górniczo-geologiczne oraz techniczno-ekonomiczne, w jakich pracuje polskie górnictwo węglowe, uległy na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat zasadniczym zmianom. W bardzo wyrazisty sposób widać to na przykładzie zmian zachodzących w zabezpieczaniu wyrobisk korytarzowych kopalń. Pogarszające się w sposób naturalny warunki górniczo-ge-

ologiczne na skutek prowadzenia eksploatacji na coraz większych głębokościach powodują występowanie wzmożonych ciśnień górotworu działających na obudowy. W warunkach kopalń węgla kamiennego stalowa obudowa chodnikowa stanowi podstawowy środek zabezpieczenia i utrzymania wyrobisk chodnikowych. Od jej wytrzymałości i jakości wykonania w dużym stopniu zależy stan tych wyrobisk oraz bezpieczeństwo ludzi tam pracujących. Dlatego też wymagania stawiane obudowie chodnikowej, mającej na celu zarówno ochronić ludzi, jak i zapewnić możliwości transportu, wentylacji, zasilania itp., ciągle wzrastają. Oprócz tych warunków technicznych, szczególnie w ostatnich latach dużą rolę zaczęły odgrywać warunki ekonomiczne eksploatacji, co jeszcze bardziej wzmogło oczekiwania dotyczące poprawnego doboru i stosowania obudów korytarzowych.

W warunkach kopalń węgla kamiennego wyrobiska chodnikowe są zabezpieczane i utrzymywane stalową obudową odrzwiową. Przez pojęcie odrzwiowej obudowy chodnikowej rozumie się całokształt środków służących do zabezpieczenia i utrzymania wyrobisk chodnikowych. Są to odrzwia obudowy stalowej (łuki), jak i akcesoria (rozpory, okładziny, stopy) oraz ręczna lub mechaniczna wykładka. Podstawowym elementem stalowej obudowy odrzwiowej jest kształtownik. Parametrami charakteryzującymi kształtownik są jego przekrój poprzeczny i materiał, z jakiego został wykonany (tabela 1). Stosowana powszechnie w latach powojennych obudowa tego typu była wykonywana z kształtowników typu TH, DS, i MD. Z uwagi na pogarszające się warunki górniczo-geologiczne, w latach 1979-84 zostały one zastąpione przez kształtowniki korytkowe typu V o wielkościach V21, V25, V29, V36 i V44.

Obecnie do produkcji elementów odrzwi obudowy chodnikowej stosowane są dwa podstawowe typy kształtowników o przekroju korytkowym - KS/KO i V (rys.1). Typoszereg kształtowników V obejmuje 5 wielkości V21, V25, V29, V36 i V44, gdzie liczby oznaczają masę jednostkową w kg/m. Znaczne zróżnicowanie przekroju kształtowników daje możliwość wykonania obudowy o różnej wytrzymałości i jej dostosowanie do warunków górniczo-geologicznych oraz techniczno-eksploatacyjnych.

Wymiary i parametry profili typu V przedstawione zostały w tabeli 2. Kształtowniki te wykonuje się głównie ze stali węglowej zwykłej jakości St55 i o podwyższonej zawartości manganu 31Mn4. Kształtowniki (łuki) mogą również zostać wykonane ze stali trudno rdzewiejącej o podwyższonej wytrzymałości 15HG2VCu. Zastosowanie tej stali powoduje wzrost wytrzymałości obudowy oraz odporności na korozję w wodzie kopalnianej o 50%. W tabeli 1 podano własności mechaniczne stali, z jakich obecnie wykonuje się kształtowniki.

Odrzwia obudowy otwartej przeznaczone są do zabezpieczania wyrobisk, w których obciążeniami głównymi są obciążenia stropowe.

Zgodnie z PN-9316-15000/03 i PN-9316-15000/02 rozróżniamy 19 typoszeregów odrzwi otwartych trójelementowych i czteroelementowych. Kształt odrzwi oraz rozmiar dobiera się w zależności od konkretnych warunków górniczo-geologicznych, technicznego wyposażenia i przeznaczenia wyrobiska.

Tabela 1

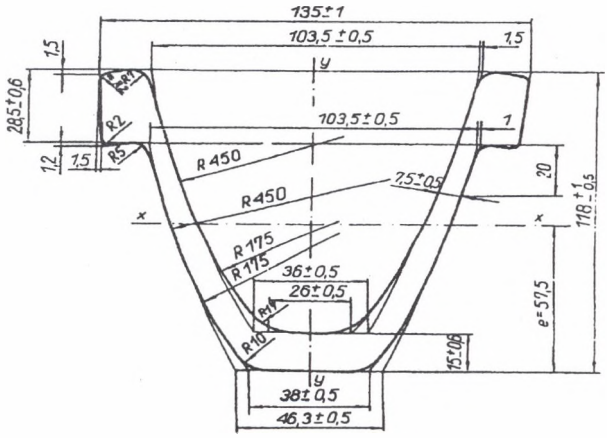
Własności mechaniczne stali stosowanych na profile

Gatunek stali	Granica plastyczności R_e [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]
St55	340	550
31Mn4	350	550
15HG2VCu	460	600 - 800

Tabela 2

Podstawowe parametry profili V

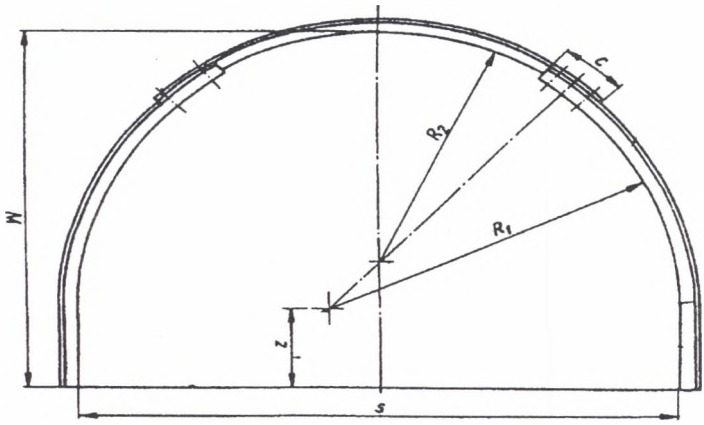
Wyszczególnienie	Kształtowniki			
	V21	V25	V29	V36
I_x [cm^4]	341	484	616	972
W_x [cm^3]	61,3	80	93,7	136,5
I_y [cm^4]	398	560	775	1264
W_y [cm^3]	64	83	103	148
F [cm^2]	27	31,84	37	45,7
m [kg/m]	21	25	29	35,9



Rys.1. Przekrój poprzeczny kształtownika V25
Fig.1. Cross section of the V-shaped profile V25

2. Wyznaczanie nośności odrzwi tzw. metodą stanów granicznych

Odrzwia obudowy łukowej poddane obciążeniu oraz podparciu osiągają nośność graniczną z chwilą przejścia elementów łuku w łańcuch sprężysto-plastyczny. Można więc założyć, że konstrukcja traci swą stateczność, jeżeli liczba przegubów plastycznych w konstrukcji pod wpływem obciążeń zewnętrznych jest większa o jeden od stopnia statycznej niewyznaczalności. W celu wyznaczenia nośności granicznej odrzwi obudowy chodnikowej przyjęto konstrukcję odrzwiową otwartą jednokrotnie statycznie niewyznaczalną. Do analizy przyjęto model odrzwi obudowy chodnikowej łukowej otwartej wykonanej z kształtownika V25, co przedstawia rys.2, a w tabeli 3 podano podstawowe kształty i wymiary najczęściej stosowanych odrzwi ŁP.



Rys.2. Odrzwia obudowy chodnikowej otwartej
Fig.2. Open system arch timbering doors

Tabela 3

Kształt i podstawowe wymiary najczęściej stosowanych odrzwi ŁP

Wielkość i znaczenie odrzwi	S [mm]	W [mm]	R_1 [mm]	R_2 [mm]	Z [mm]
ŁP8/V25	4700	3300	2625	2250	760
ŁP10/V25	5500	3800	3075	2650	830
ŁP8/V29	4700	3300	2625	2250	760
ŁP10/V29	5500	3800	3075	2700	870
ŁP8/V36	4700	3300	2700	2300	750
ŁP10/V36	5500	3800	3075	2725	870

Są dwie metody analitycznego wyznaczania nośności odrzwi obudowy chodnikowej, a mianowicie: metoda projektowania na dopuszczalne naprężenia i metoda projektowania na dopuszczalny udźwig (metoda nośności granicznej).

Obecnie najczęściej stosowana metoda wyznaczania nośności stalowych odrzwi obudowy ŁP (łuków podatnych) polega na wyznaczeniu wartości sił wewnętrznych, wyszukaniu przekroju o maksymalnym wytężeniu, a następnie porównaniu stanu naprężenia z warunkami wytrzymałości granicznej kształtownika [3]. Jest to tzw. metoda nośności granicznej (w rzeczywistości jest połączeniem metody projektowania na dopuszczalne naprężenia oraz metody nośności granicznej).

Wyznaczenie sił wewnętrznych wykonuje się dla różnych konfiguracji obciążenia odrzwi metodą na dopuszczalne naprężenia. Siły wewnętrzne i przemieszczenia łuków obudowy wyznaczono przy następujących założeniach [2]:

- odrzwia pracują w fazie sprężystej,
- układ odrzwi jest płaski i ma pionową oś symetrii,
- obciążenia działają w płaszczyźnie symetrii odrzwi,
- analizuje się działanie sił pionowych,
- pomija się wpływ tarcia odrzwi o podłoże.

Rozkład sił wewnętrznych uzależniony jest od następujących czynników:

- kształtu i wielkości odrzwi,
- parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego kształtownika,
- parametrów wytrzymałościowych materiału,
- rozkładu obciążeń czynnych,
- charakterystyki odporu górotworu,

Rozpatrywane były układy usztywnione bez uwzględniania zsuwów na złączach. W celu wyznaczenia nośności granicznej odrzwi wykorzystano tzw. metodę stanów granicznych. W tym celu przyjęto (jako dający najlepsze przybliżenie do rzeczywistości) model ciała sztywno-plastycznego.

Warunek granicznej wytrzymałości kształtowników korytkowych obudowy przyjęto w postaci [2]:

$$\frac{M_g}{W_x} + \frac{N_0\, m_w}{A_s} \le R_e\,(m+n) \tag{1}$$

gdzie:

A_s - powierzchnia przekroju kształtownika,

M_g - moment zginający w przekroju,

N_o - siła osiowa w przekroju,

W_x - wskaźnik wytrzymałości na zginanie,

R_e - granica plastyczności stali,

m_w - współczynnik wyboczenia wg PN-8018-03200,

m - współczynnik wzmocnienia przekroju przy zginaniu plastycznym (dla kształtownika korytkowego m =1,4),

W_{xp} - wskaźnik wytrzymałości kształtownika na zginanie plastyczne,

$$m = \frac{W_{xp}}{W_x}; \quad n = \frac{R_m - R_e}{R_m}$$

n - współczynnik wzmocnienia materiału przy zginaniu plastycznym,

R_m - wytrzymałość stali na rozciąganie.

Podstawiając do (1) uprzednio wyznaczone wartości M_g i N_o, wyznacza się tzw. graniczną wartość obciążenia ciągłego q_{gr} oraz wartość tzw. siły granicznej P_{gr}. Zgodnie z pracą [2], tak wyznaczone wartości granicznego obciążenia dla odrzwi o rozmiarze ŁP8 bez odporu górotworu wynoszą odpowiednio: q_{gr} = 51,5 [kN/m], $P_{gr.}$=102 [kN]. Obliczone w ten sposób tzw. obciążenie graniczne jest zaniżone w stosunku do rzeczywistej nośności granicznej odrzwi. Utrata nośności w przekroju krytycznym odrzwi obudowy otwartej, które są układem jednokrotnie statycznie niewyznaczalnym, nie jest równoznaczna z utratą nośności całego układu.

3. Symulacja komputerowa

W niniejszym artykule przedstawiono przykład użycia programu komputerowego MSC/NASTRAN wykorzystującego do obliczeń oprogramowanie oparte na metodzie elementów skończonych. Najważniejszym etapem analizy wytrzymałościowej z zastosowaniem tej metody jest poprawne przygotowanie modelu obliczeniowego. Jego poprawność i zgodność z rzeczywistymi warunkami pracy modelowanej konstrukcji determinuje jakość uzyskanych wyników.

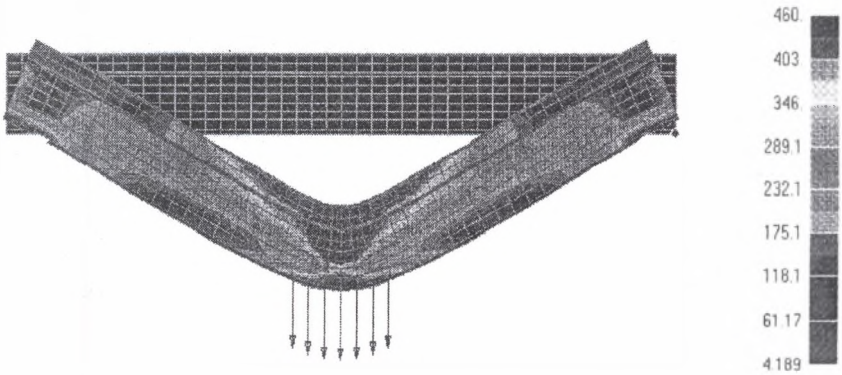
Tworzenie modelu obejmuje następujące etapy:

- budowę modelu geometrycznego odrzwi obudowy,
- opracowanie modelu dyskretnego,
- opis własności materiałowych,
- założenie wariantów obciążenia i podparcia,
- obliczenia wytrzymałościowe MES konstrukcji w zakresie nieliniowości.

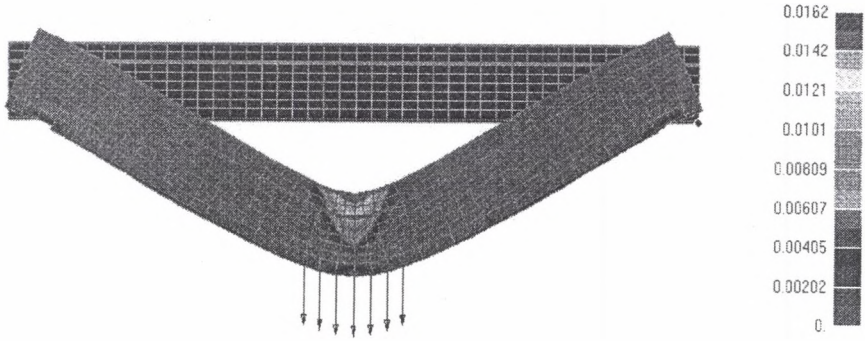
W pierwszym etapie analizie poddano prosty odcinek wykonany z kształtownika V25. Geometrię profilu V25 wykonano w systemie AUTOCAD, natomiast model obliczeniowy w systemie MSC/Nastran. Składa się 2745węzłów i 1848 elementów typu bryłowego. Wariant podparcia i obciążenia modelu przyjęto zgodnie z PN-86/G-1500/09. Wariantując w kolejnych krokach wielkość obciążenia, nieliniowa analiza wytrzymałościowa z wykorzystaniem MES pozwoliła przy obciążeniu 286 kN wyznaczyć nośność graniczną tego modelu wykonanego ze stali 15GH2VCu.

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład naprężeń i odkształcenie poszczególnych elementów modelu prostego odcinka belki wykonanego z kształtownika V25 i ze stali 15GH2VCu. Na rysunku 4 przedstawiono odkształcenia plastyczne dla modelu prostego odcinka belki wykonanego z kształtownika V25.

Następnym etapem była budowa modelu geometrycznego odrzwi wykonanych z kształtownika V25 w systemie MSC/Nastran. Utworzony w ten sposób model poddano dyskretyzacji elementami skończonymi. Składa się on z 7776 węzłów i 5396 elementów 8-węzłowych typu bryłowego.



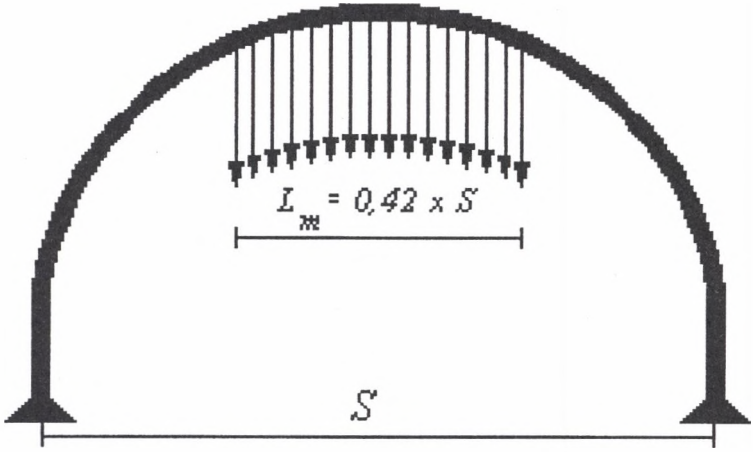
Rys.3. Rozkłady naprężeń i odkształceń prostego odcinka belki wykonanego z kształtownika o profilu V25
Fig.3. Stress and strain distribution of straight segment beam made from V-shaped profile V25



Rys.4. Rozkłady odkształceń plastycznych
Fig.4. Diagram of plastic strain distribution

W bazie materiałowej zdefiniowano własności (tabela 1) i charakterystyki sprężysto-plastyczne trzech rodzajów stali, z jakich obecnie wykonuje się odrzwia obudowy chodnikowej. Symulację przeprowadzono dla przypadku obciążenia odrzwi obudowy chodnikowej obciążeniem stropowym - obciążeniem ciągłym symetrycznym działającym na długości równej L_m (L_m = 0,42 S).

Dla tego przypadku zostaną wyznaczone graniczne wielkości tych sił (powodujące powstanie dwóch przegubów plastycznych). Uproszczony model obliczeniowy podparcia i obciążenia odrzwi bez odporu górotworu został przedstawiony na rys.5.



Rys.5. Schemat obciążenia i podparcia odrzwi obudowy chodnikowej otwartej
Fig.5. Load and support diagram for the open system arch timbering doors

4. Wyniki obliczeń

W tabeli 4 przedstawione zostały wartości obciążeń granicznych uzyskanych w wyniku symulacji komputerowej przy obciążeniu ciągłym stropowym odrzwi obudowy chodnikowej. Wyniki obliczeń metodą nośności granicznej mogą być wykorzystane do optymalizacji konstrukcji odrzwi obudowy chodnikowej. W kolumnie pierwszej przedstawiono wartości obciążeń obliczone dotychczas stosowaną metodą, a w następnych kolumnach wartości obciążeń granicznych uzyskane dla wcześniej zdefiniowanych stali w tabeli 1.

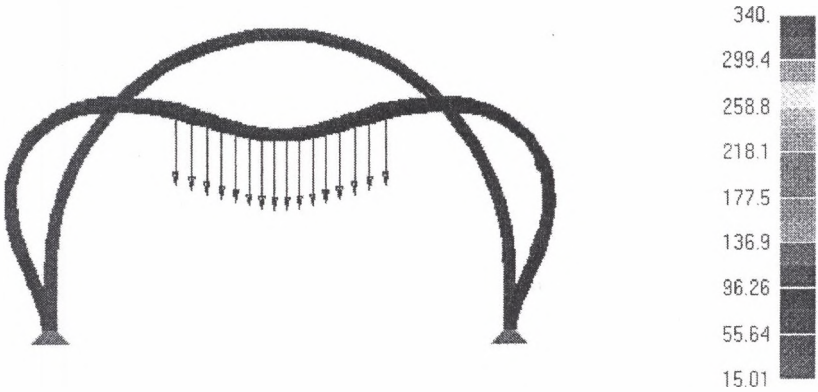
Tabela 4

Porównanie wyników

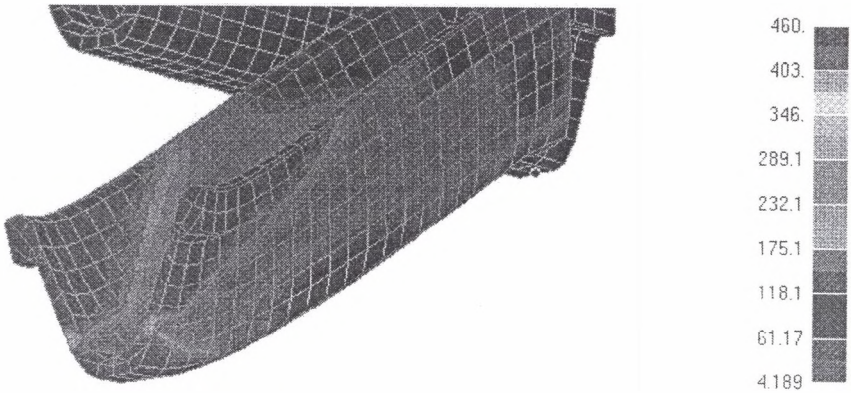
Nośność odrzwi [kN]			
Obliczeniowa	Otrzymana w wyniku symulacji 7		
Stal St55	Stal St55	31Mn4	15HG2VCu
102	122,5	128,5	153,5

Na rys.6 przedstawiono mapę naprężeń oraz odkształcenie poszczególnych elementów odrzwi.

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład naprężeń w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi obudowy chodnikowej.



Rys.6. Rozkłady naprężeń i odkształceń obudowy chodnikowej łukowej wykonanej z kształtownika V25
Fig.6. Diagram of stress and strain distribution of arch timbering doors made of V-shaped profile V25



Rys.7. Rozkłady naprężeń w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi
Fig.7. Diagram of stress distribution at the mostly loaded timbering section

5. Podsumowanie

Warunki górniczo-geologiczne (eksploatacja na coraz większych głębokościach) oraz warunki techniczno-ekonomiczne stawiają nowym konstrukcjom coraz wyższe wymagania. W celu sprostania tym wymaganiom konieczne jest użycie już w procesie konstruowania nowoczesnych metod i narzędzi umożliwiających znaczne skrócenie czasu potrzebnego do wytworzenia nowego produktu o wysokiej jakości. Taką możliwość obecnie dają nam nowoczesne programy komputerowe, za pomocą których możliwe jest wszechstronne sprawdzenie nowej koncepcji i to jeszcze przed wytworzeniem fizycznego prototypu. W przemyśle górniczym zarówno budowa stanowisk badawczych odpowiadających rzeczywistym warunkom, jak i badania dołowe są bardzo pracochłonne i kosztowne, dlatego też wspomaganie komputerowe powinno znaleźć szerokie zastosowanie w pracach inżynierskich, gdyż daje możliwość szerokiej weryfikacji czynników wpływających na postać konstrukcyjną maszyn i urządzeń oraz dopracowanie jej przed badaniami stanowiskowymi lub badaniami w warunkach rzeczywistych.

Podsumowując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że:

- uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają założenia, że dotychczasowe sposoby obliczenia nośności granicznej dają wyniki zaniżone w stosunku do rzeczywistej nośności odrzwi,

- zastosowanie stali 31Mn4 oraz 15HG2VCu powoduje wzrost nośności granicznej odpowiednio o 7% i 29%, co ma istotne znaczenie przy doborze obudowy do warunków górniczo-geologicznych (możliwość znacznego zmniejszenia ciężaru odrzwi przy tej samej lub większej nośności),
- otrzymane wyniki dają podstawę do przeprowadzenia analiz wytrzymałościowych odrzwi obudowy chodnikowej otwartej, jak i zamkniętej obejmujących również model odporu górotworu,
- wyniki obliczeń prowadzonych metodą nośności granicznej mogą być wykorzystane do opracowania wytycznych dotyczących badań atestacyjnych obudów chodnikowych.

LITERATURA

1. MSC/NASTRAN, Handbook for Nonlinear Analysis, Sang H. Lee, Editor 1992.
2. Małoszewski J., Mateja J., Rułka.: Podstawy teoretyczne projektowania i doboru obudów odrzwiowych dla wyrobisk komorowych i odgałęzień. Prace GIG, Komunikat 765, Katowice 1989.
3. Życzkowski M.: Obciążenia złożone w teorii plastyczności. PWN, Warszawa 1973.

Recenzent: Prof. Dr hab. Inż. Karol Reich

Abstract

The paper presents problems involving the design of arch timbering doors, applied in underground mining, made of steel V-shaped arches (profiles) - comprising the following five type dimensions: V21, V25, V29, V36 and V44 - in the open or closed system. The currently applied method of limit states has been discussed with respect to the strength analysis of the arch timbering doors covering the following criterion: limit load capacity.

The currently applied methods consist in determining the stress in the section subjected to the highest effort, determining the distribution of internal forces for an accepted load model and support model, and finally in defining the positioning of the section when subjected to the

critical effort and comparing it with the conditions of limit strength according to the following dependency:

$$\sigma \leq Ra$$

where: σ - stress in the critical section,

Ra - calculated strength for the critical section.

As indicated by the carried out investigation studies, the results obtained if effect of the applied method is lower as compared with the real limit load capacity, and the extent of such underrated value depends on the construction of the timbering doors, the applied loading system and support conditions. The loss of load capacity in the critical section of the doors means that the load capacity is lower for the whole load-carrying structure of the timbering.

The doors of arch timbering subjected to loading and circumferential support reach the limit loading capacity at the point when the elements of the arch turn into kinematic chain. It can be therefore assumed that the construction loses its stability when the number of plastic joints within the construction subject to external loading is higher by one than the value of statical indetermination. In order to determine the limit load capacity of the arch timbering doors, a once statically indeterminate open doors structure has been accepted. For the analysis, the accepted model of arch timbering doors was made of V25 profiles, with the inside diameter section of $13.7m^2$,. The doors (profiles) were made of material having the elastic-plastic characteristics.

The computer aided simulation is carried out using the calculation program MSC/NASTRAN based on the method of finite elements. The work involves the following stages:

- construction of the geometrical model of the timbering doors,
- elaboration of a discrete model,
- description of material properties,
- assumption of load option and support option,
- strength calculations using the MES method.

The analysis was carried out according to load assumptions as in the model, until the plastic strain of the doors section occurred. The values of loads determined in such a way were compared with the theoretically calculated and experimentally determined values obtained with straight fragments of the profiles subjected to bending. In the next phase, the whole door set of the rigid timbering was subjected to analysis. In this case, different types of loading

were simulated, both roof load, floor and side wall ones. For each case, the accepted support model of the doors was in compliance with PN (Polish Standards).

The obtained results of the computer aided simulation with the application of computer program MSC/NASTRAN were compared with the results of laboratory tests and test-stand studies involving the doors. The results of the carried out investigation studies and analysis have proved that the selection of the elastic-plastic model and support options was well grounded, which resulted in the increase of limit load capacity by about 20% as compared with values commonly accepted so far in engineering works. The obtained results will contribute to more effective designing works with respect to load-bearing structures for timbering doors.