

Izabela TYLEK\*  
Politechnika Krakowska

## KONCEPCJE ANALIZY NOŚNOŚCI STALOWYCH ŁUKOWYCH OBUDÓW GÓRNICZYCH\*\*

**Streszczenie.** Referat stanowi kontynuację pracy „Modele obliczeniowe stalowych łukowych obudów górniczych” autorstwa Z. Mendery i I. Tylek, zamieszczonej w materiałach konferencyjnych II Konferencji naukowej „Badania nośności granicznej konstrukcji metalowych”, Wrocław – Karpacz 2001 [9] z rozbudowanym przykładem obliczeniowym.

W niniejszym artykule przedstawiono propozycję algorytmu wymiarowania stalowych łukowych obudów górniczych opartą na procedurze wymiarowania elementów zginanych i ściskanych wg PN-90/B-03200.

Formuła wymiarowania opisuje nośność odrzwi jako nośność kształtownika z uwzględnieniem efektu wybożenia oraz współczynnika rezerwy plastycznej. Do określenia wartości współczynnika wybożeniowego przyjęto krzywą wybożeniową (b) wg PN-90/B-03200

Algorytm nie uwzględnia podatności obudowy wywołanego zsuwem złącz.

## IDEAS OF THE SUSCEPTIBLE STEEL LINING ANALYSIS

**Summary.** This paper is continuation of the paper “Design models of the susceptible steel lining” by Z. Mendera, I. Tylek [9] with enlarged example.

In this paper a proposal of design algorithm of steel susceptible lining based on design formula of bent and compressed elements according to PN-90/B-03200 was shown.

The formula describes capacity of lining as capacity of profile with taking into consideration buckling effect and plastic reserve factor. To determine buckling factor bucking curve (b) from PN-90/B-03200 was taken.

The algorithm doesn't take into account susceptibility of lining caused by sliding of joints.

### 1. Wstęp

Podstawowym środkiem zabezpieczenia wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego jest stalowa odrzwiowa obudowa podporowa wykonana z walcowanych kształtowników korytkowych. Stanowi ona około 95% całości zapotrzebowania kopalń na obudowę [1].

Głównym celem obudowy jest zapewnienie, w ustalonym czasie, stateczności wyrobiska, czyli zachowania wymaganych wymiarów poprzecznych wyrobiska oraz zabezpieczenia ludzi

---

\*Opiekun naukowy: Dr hab. Andrzej Machowski.

\*\*Referat jest kontynuacją pracy [9] z rozbudowanym przykładem obliczeniowym.

i sprzętu przed obrywającymi się z ociosów i stropu odłamkami skalnymi lub przed zawałami. Powstanie zawałów jest następstwem stopniowego deformowania się warstw górotworu wskutek zmiany pierwotnego stanu naprężenia w górotworze, spowodowanego wykonaniem wyrobiska [2].

Jeżeli w masywie górotworu jednorodnego wykona się wyrobisko chodnikowe, to w dowolnym przekroju prostokątnym do osi wyrobiska będziemy mieć do czynienia z tarczą, w środku której usytuowany jest otwór o kształcie odpowiadającym przekrojowi poprzecznemu chodnika. Tarcza obciążona jest na swych krawędziach składowymi ciśnieniami pierwotnego

górotworu: pionowym  $p_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i$  i poziomym  $p_x = p_y = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot p_z = \frac{p_z}{m-1}$ ,

gdzie:  $\nu = \frac{1}{m}$  - współczynnik Poissona,  $h_i$  - grubość warstwy,  $\gamma_i$  - ciężar objętościowy skał zalegających w danej warstwie.

Ze względu na długość chodnika, znacznie przekraczającą jego wymiary przekroju poprzecznego, mamy do czynienia z płaskim stanem odkształcenia ( $\epsilon_x = 0$ ).

Pomimo iż stan naprężenia, jaki wytworzy się w górotworze po wykonaniu wyrobiska, zależał będzie od kształtu poprzecznego chodników, sformułować można ogólne wnioski dotyczące wtórnego stanu równowagi górotworu: w stosunku do pierwotnego stanu naprężenia obserwuje się po wykonaniu wyrobiska koncentrację naprężeń: ściskających w ociosach, rozciągających w stropie i spągu oraz ścinających w narożach chodnika. To niekorzystne zjawisko można niwelować poprzez dobór odpowiedniego kształtu chodnika.

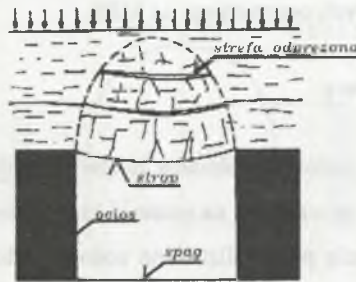
Wyniki rozwiązań analitycznych wskazują, że dopiero w odległościach nieskończenie dużych od wyrobiska wtórny stan naprężenia przechodzi w stan pierwotny, jednak z praktycznego punktu widzenia, w odległościach równych trzykrotnej wartości odpowiedniego wymiaru poprzecznego wyrobiska, naprężenie wtórne różni się od naprężeń pierwotnych nie więcej niż o 10% [3].

## 2. Obciążenia obudów górniczych

Po wykonaniu wyrobiska górniczego, wskutek koncentracji naprężeń w jego otoczeniu, może dojść do przekroczenia nośności skał otaczających wyrobisko i powstania strefy spękań. W strefie tej, będącej strefą częściowo odprężoną, obserwuje się spadek poszczególnych składowych wtórnego stanu naprężenia, zaś skały objęte tą strefą mają tendencję do oddzielania

się od masywu pierwotnie zwięzłego górotworu i przemieszczania się ku wybranej przestrzeni, dążąc do obwałów lub całkowitego zawału wyrobiska (rys.1).

Obudowa wyrobiska, zabezpieczając jego kontur przed obwałem lub zawałem, jest więc obciążona statycznie ciężarem skał otaczających, zwanym potocznie ciśnieniem statycznym górotworu na obudowę wyrobiska [1]. W przypadku obudów wyrobisk chodnikowych wyznaczenie ciśnienia statycznego sprowadza się do wyznaczenia ciężaru skał umiejscowionych w strefie spękań i rozłożenia tego ciężaru na odpowiednim obwodzie konturu wyrobiska według jednej z wielu teorii, np.: M.M. Protodiakonowa, P.M.Cymbarewicz czy zmodyfikowanej teorii sklepienia ciśnień wg Z. Kłeczka [3].



Rys. 1. Wyrobisko górnicze  
Fig. 1. Excavation

### 3. Modele obliczeniowe stalowych łukowych obudów górniczych

Przy projektowaniu obudowy wyrobisk górniczych podstawowe znaczenie ma poprawne określenie wartości i kierunku działania obciążeń. Wyróżnić można kilka metod, za pomocą których starano się przybliżyć rzeczywiste oddziaływanie górotworu na obudowę. Metody te różnią się złożonością przyjętego modelu oddziaływań (czynnego i biernego – odporu górotworu), działającego na odrzwia obudowy górniczej. W modelu najprostszym tak obciążenie czynne, jak i odpór górotworu modelowane jest za pomocą obciążenia bezpośrednio działającego na odrzwia, którego wartość wyznaczana jest na podstawie jednej z teorii np. M.M. Protodiakonowa. Model bardziej zaawansowany uwzględnia dodatkowo reakcje występujące na odcinkach odrzwi przemieszczających się pod wpływem działającego obciążenia w stronę górotworu (odpór górotworu), modelując go za pomocą wahaczy, czyli prętów przegubowo połączonych z konstrukcją odrzwi i przegubowo nieprzesuwnie zamocowanych w nieod-

kształcalnym podłożu [2, 3]; pręty te należy umieszczać tak, aby ich osie były prostopadłe do osi prętów obudowy. Charakterystyka wahaczy uzależniona jest od [2]:

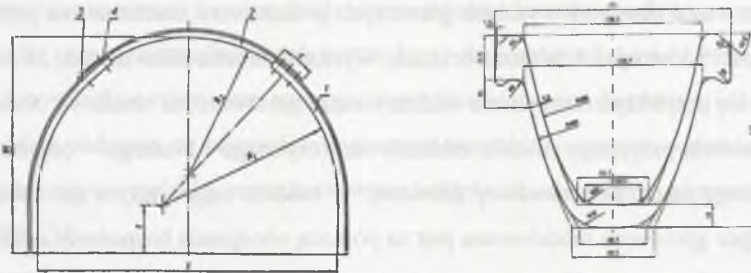
- stałych sprężystości  $E_w$ ,  $\nu_w$  wykładki (warstwy oddzielającej obudowę od górotworu),
- stałych sprężystości górotworu  $E_g$ ,  $\nu_g$  otaczającego wyrobisko,
- wymiarów wyrobiska oraz grubości wykładki.

Najdokładniejszy jest model, w którym uwzględniono interakcje obudowy górniczej z górotworem. W modelu tym uwzględnia się tworzenie strefy spękań, jej oddziaływanie na odrzwia, odkształcanie się odrzwi wraz z deformacją górotworu oraz więzi jednostronne modelujące odpór górotworu. Ze względu na swoją złożoność model ten stosowany jest głównie w programach komputerowych opartych np. na MES.

#### 4. Przykład obliczeniowy

Wymiarowanie odrzwi stalowych obudów łukowych polega na wyznaczeniu maksymalnego rozstawu tych odrzwi ze względu na nośność kształtownika oraz ze względu na nośność złącz. W niniejszym referacie przeanalizowano nośność odrzwi łukowej obudowy podatnej ŁP9/V25 [6, 7] ze względu na nośność kształtownika. Do obliczeń przyjęto odrzwia o rozpiętości  $s = 5,0$  m i wysokości  $w = 3,5$  m, pod obciążeniem  $q_1 = q_2 = 100$  kN/m<sup>2</sup> (schematy obciążenia wg rys.3 a, b, c).

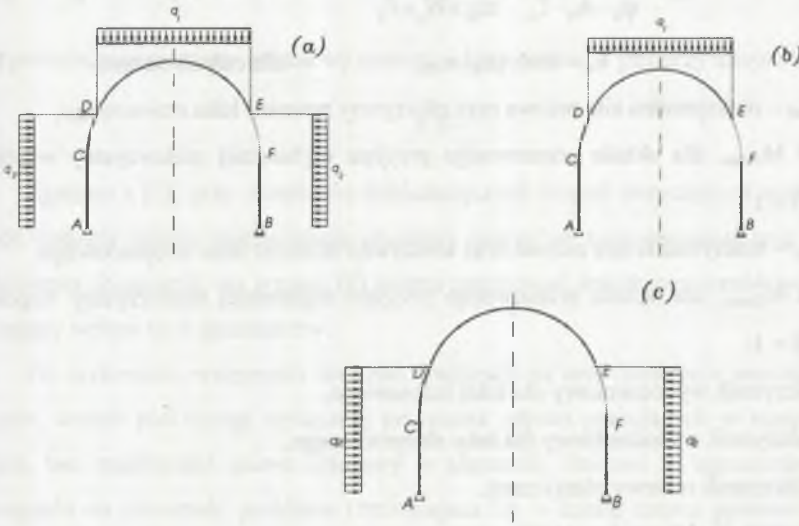
Geometrię odrzwi oraz kształtownika typu V przedstawiono poglądowo na rys.2.



Rys. 2. Łukowa stalowa obudowa górnicza; kształtownik typu V

Fig. 2. Susceptible steel lining; V profile

Przyjęto podstawowy model obliczeniowy (obciążenie czynne i odpór górotworu modelowane za pomocą bezpośrednio działającego obciążenia) oraz trzy warianty obciążenia wg rys. 3.



Rys. 3. Schematy obciążenia obudowy  
Fig. 3. Load cases of the lining

Obciążenie pionowe  $q_1$  modeluje czynne działanie górotworu, jego wartość przyjmować należy na podstawie sprawdzonych teorii lub badań doświadczalnych. Obciążenie poziome  $q_2$  zastępuje bierny odpór górotworu, ogólnie jego wartość przyjmować należy jako  $\lambda q_1$ , gdzie  $\lambda \in [0,1]$ . W przypadku najbardziej niekorzystnym  $\lambda = 0$  i na obudowę działa jedynie obciążenie pionowe.

Przy poprawnie (zgodnie z rzeczywistością) przyjętych wartościach obciążenia czynnego i biernego, algorytm wg [5] jest prostym sposobem wyznaczania sił wewnętrznych oraz wymiarowania łukowych stalowych obudów górniczych ze względu na nośność kształtownika. Algorytm ten jest oparty na algorytmie wymiarowania elementów zginanych i ściskanych wg PN-90/B-03200 [8].

Dla wybranych danych geometrycznych i wytrzymałościowych odrzwi oraz przyjętego obciążenia wyznaczyć należy rozkład sił wewnętrznych, a następnie zgodnie z przyjętym algorytmem – wskaźnik wyciężenia jednostkowego odrzwi  $n_\sigma$  [1/m], rozstawionych w odstępnie 1m

$$n_{\sigma 1} = \frac{|N_{1\max}|}{\varphi_1 \cdot A_k \cdot f_d} + \frac{|M_{1\text{ef}}|}{\alpha_{pl} \cdot W_x \cdot f_d} \quad \text{dla łuku ociosowego} \quad (1)$$

$$n_{\sigma 2} = \frac{|N_{2\max}|}{\varphi_2 \cdot A_k \cdot f_d} + \frac{|M_{2\text{ef}}|}{\alpha_{pl} \cdot W_x \cdot f_d} \quad \text{dla łuku stropnicowego} \quad (2)$$

$$n_{\sigma} = \max [n_{\sigma 1}, n_{\sigma 2}] \quad \text{dla całych odrzwi} \quad (3)$$

gdzie:  $N_{1\max}$ ,  $M_{1\text{ef}}$  – maksymalna siła osiowa oraz efektywny moment łuku ociosowego,

$M_{1\text{ef}} = \beta M_{1\max}$ , dla układu przesuwneego przyjęto najbardziej niekorzystny współczynnik  $\beta = 1$ ,

$N_{2\max}$ ,  $M_{2\text{ef}}$  – maksymalna siła osiowa oraz efektywny moment łuku stropnicowego,

$M_{2\text{ef}} = \beta M_{2\max}$ , dla układu przesuwneego przyjęto najbardziej niekorzystny współczynnik  $\beta = 1$ ,

$\varphi_1$  – współczynnik wyboczeniowy dla łuku ociosowego,

$\varphi_2$  – współczynnik wyboczeniowy dla łuku stropnicowego,

$\alpha_{pl}$  – współczynnik rezerwy plastycznej,

$f_d$  – wytrzymałość obliczeniowa stali,

$A_k$ ,  $W_x$  – pole przekroju i wskaźnik wytrzymałości kształtownika odrzwi.

Zgodnie z [8], smukłość pręta wyznaczać należy ze wzoru:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (4)$$

gdzie:  $l_e$  – długość wyboczeniowa pręta,

$i$  – promień bezwładności przekroju.

W rozpatrywanym algorytmie przyjęto długość wyboczeniową łuku stropnicowego jak dla pręta dwustronnie zamocowanego z możliwością przesuwu ( $l_e = L$ ,  $L$  – długość łuku stropnicowego), zaś dla łuku ociosowego przyjęto  $l_e = 2z$  (pręt jednym końcem zamocowany z możliwością przesuwu, na drugim końcu przegubowo podparty); gdzie:  $z$  – długość odcinka prostego obudowy.

Dla kształtowników typu V krzywą wyboczeniową, służącą do wyznaczenia współczynników wyboczeniowych, przyjęto jak dla elementów o przekroju otwartym (krzywa c charakteryzowana przez uogólniony parametr imperfekcji  $n=1,2$ ). Dla przekrojów dwuteowych i szynowych, a także dla przekrojów otwartych typu V, lecz usztywnionych poprzez rozpory, obejmujące kontur kształtownika i zapewniające niezmiennność konturu, można przyjmować  $n=1,6$  (krzywa b), dla przekrojów rurowych  $n=2,0$  (krzywa a).

Zgodnie z PN-90/B-03200 współczynnik rezerwy plastycznej  $\alpha_{pl}$  przyjęto równy 1,5.

Stan graniczny nośności odrzwi rozstawionych w odstępzie  $d$  [m] pod wpływem działających obciążeń należy wyznaczać z warunku:

$$n_{\sigma} \cdot d \leq l \quad (5)$$

Z powyższego warunku można wyznaczyć odstęp odrzwi  $d$  [m] przy danym obciążeniu:

$$d \leq \frac{l}{n_{\sigma}} \quad (6)$$

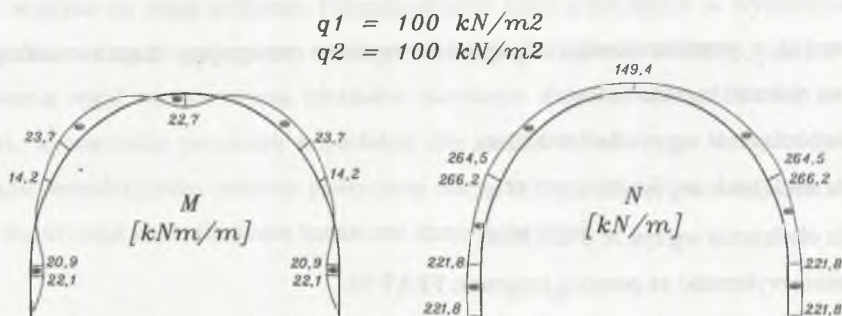
Zgodnie z [5], przy określeniu dokładniejszych danych dotyczących zastosowanych podpór, rodzaju opinki, zastosowania obudowy nowej lub regenerowanej oraz równomierności działania obciążenia, we wzorze (6) można zastosować dodatkowo współczynnik  $K$  uwzględniający wpływ tych parametrów.

Do wykonania wstępnych obliczeń, mających na celu określenie wartości sił wewnętrznych, wzięto pod uwagę wyłącznie przypadek odrzwi pracujących w stanie usztywnionym (tzn. bez możliwości zsuwu obudowy w złączach). Stanowi to uproszczenie, jednakże ze względu na złożoność problemu (zmieniająca się w czasie zsuwu geometria odrzwi) może być ona podstawą do dalszych rozważań. Przyjęto również, że stan naprężeń i odkształceń w odrzwiach podlega uogólnionemu prawu Hooke'a [4].

Obciążenie działające i schemat statyczny odrzwi przedstawiono na rys.3.

Dla tak przyjętych danych otrzymano następujące wyniki wykresy sił wewnętrznych:

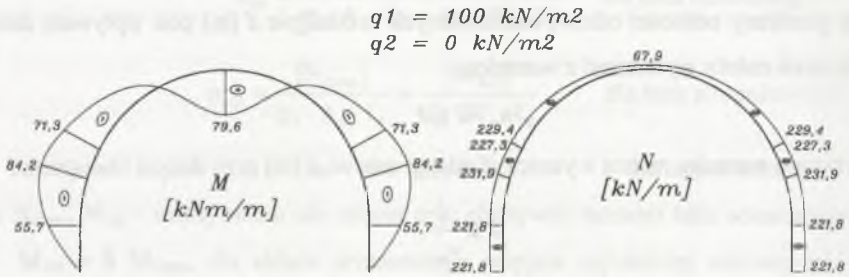
a) obciążenie według rys.3a



Rys. 4. Wykres sił wewnętrznych dla obciążenia jak na rys. 3a

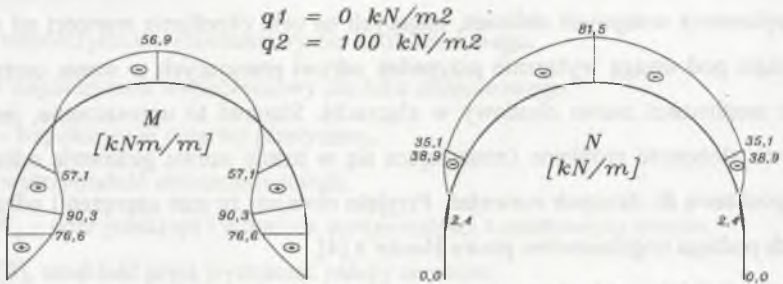
Fig. 4. Internal forces diagram for load case from fig. 3a

b) obciążenie według rys.3b



Rys. 5. Wykres sił wewnętrznych dla obciążenia jak na rys. 3b  
Fig. 5. Internal forces diagram for load case from fig. 3b

c) obciążenie według rys.3c



Rys. 6. Wykres sił wewnętrznych dla obciążenia jak na rys. 3c  
Fig. 6. Internal forces diagram for load case from fig. 3c

Korzystając z przedstawionego algorytmu otrzymano następujący rozstaw odrzwi ze względu na nośność kształtownika:

- dla obciążenia wg rys.3a  $d \leq 0,82 \text{ m}$ ,
- dla obciążenia wg rys.3b  $d \leq 0,37 \text{ m}$ ,
- dla obciążenia wg rys.3c  $d \leq 0,39 \text{ m}$ .

Obliczenia wykonano za pomocą programu FEAT 98.

Uzyskane wyniki są miarodajne dla obciążenia  $q_1=100 \text{ kN/m}^2$  i  $q_2=100 \text{ kN/m}^2$  oraz schematów jw. Po wyznaczeniu rzeczywistych wartości  $q_1$  i  $q_2$  obciążenia działającego na obudowę, korzystając z właściwości zastosowanego modelu liniowego (zakres sprężysty) oraz zasady superpozycji, na podstawie przedstawionego przykładu wyznaczyć można rzeczywisty rozstaw odrzwi.



Schematy (b) i (c) obciążenia można traktować jako schematy podstawowe (składowe schematu (a)), wykorzystywane w zasadzie superpozycji.

Realizacja poszczególnych schematów w rzeczywistości zależy m.in. od rodzaju i stanu wykładki obudowy, i tak, dla wykładki dobrej, np. kamiennej, schematem rzeczywistym obciążenia będzie schemat (a), natomiast brakowi wykładki lub wykładce niestarannej odpowiada schemat (b). W warunkach rzeczywistych schemat (c) obciążenia jest mało prawdopodobny, traktować go należy jako schemat pomocniczy.

## 5. Uwagi końcowe i wnioski

W niniejszym referacie autorka nie zajmowała się oceną poprawności metod służących do określenia wartości oraz schematu działania obciążenia na obudowę górnictwą oraz sposobu uwzględniania odporu górotworu. Poprawne przyjęcie schematu oraz wartości obciążenia działającego na obudowę a także uwzględnienie interakcji obudowy z górotworem jest zadaniem skomplikowanym, dlatego w analizowanym przykładzie przyjęto proste schematy oraz wartości obciążenia, mające na celu przedstawienie jedynie metody wymiarowania, z pominięciem sposobu określenia oddziaływania górotworu.

W ogólnym przypadku wyznaczenie sił wewnętrznych dla prostych schematów (rys. 3a i 3b) pozwala w sposób nieskomplikowany na wyznaczenie sił wewnętrznych dla dowolnych wartości i proporcji działających obciążeń.

Ze względu na wagę problemu (bezpieczeństwo ludzi pracujących w wyrobiskach) oraz brak jednoznacznych wytycznych zarówno w kwestii określania obciążeń, jak i w kwestii stosowania reguł wymiarowania (dokładne określenie długości wyboczeniowej elementów odrzwi, wyznaczenie parametru imperfekcji dla kształtowników typu V oraz odpowiednie przyjęcie współczynnika rezerwy plastycznej dla tych kształtowników) konieczne są dalsze prace teoretyczne zweryfikowane badaniami stanowiskowymi.

## LITERATURA

1. Piechota S.: Podstawy górnictwa kopalni stałych, Wydawnictwa AGH, Kraków 1996.
2. Chudek M.: Obudowa wyrobisk górniczych. Część I. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1986.

3. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
4. Rułka K., Skrzyński K.: Analiza sił wewnętrznych w odrzwiach podatnej łukowej obudowy stalowej ŁP, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1993.
5. Praca zbiorowa: Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny, Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
6. PN-93/G-15000/02, Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Odrzwia łukowe podatne ŁP, z kształtowników typu V, typoszereg A. Wymiary.
7. PN 93/G-15000/03, Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształtowników korytkowych. Odrzwia łukowe podatne ŁP, z kształtowników typu V, typoszereg A. Łuki.
8. PN-90/B-03200, Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
9. Mendera Z., Tylek I.: Modele obliczeniowe stalowych łukowych obudów górnicznych, II Konferencja Naukowa „Badania nośności granicznej konstrukcji metalowych”, Wrocław – Karpacz, 2001 (praca w druku).
10. FEAT 98, Users Manual.

Recenzent: Prof. dr inż. Roman Jankowiak

## Abstract

This paper is continuation of the paper “Design models of the susceptible steel lining” by Z.Mendera, I.Tylek [9] with enlarged example.

Because of complexity of load definition, only simple load schemes were taken into account.

In presented example one of design algorithms was explained.

For the reason of danger to life and health of people working in coal mines, the design of susceptible steel lining is a very important problem, but there are no unambiguous guidelines for loads and design, and that's why further research is needed.