

DANUTA DOMAŃSKA*

**METODA SZACOWANIA NOŚNOŚCI ODRZWI OBUDOWY STALOWEJ ŁUKOWEJ
W OPARCIU O TEORIĘ NOŚNOŚCI GRANICZNEJ**

**METHOD OF ESTIMATING LOAD CAPACITY OF ARCH SUPPORT STEEL SETS BASED
ON THE LIMIT LOAD CAPACITY THEORY**

W artykule zaprezentowano nową, uproszczoną metodę szacowania nośności odrzwi obudowy ŁP opartą na teorii nośności granicznej, wiążącą nośność wymienionej konstrukcji ze względu na wytrzymałość kształtownika i wymaganą nośność złącz z wybranymi czynnikami technicznymi, takimi jak: jakość podłoża, rodzaj kształtownika, wielkość odrzwi, zmienność granicy plastyczności stali i sposób przekazywania obciążenia. W ramach rozpatrywanego artykułu przedstawiono:

- podstawowe wzory i definicje teorii nośności granicznej (wzory 1–8), sprawdzenie możliwości jej zastosowania przy wyznaczaniu nośności odrzwi stalowych wykonanych z kształtownika typu V (wzory 9–13), założenia przyjęte do obliczeń (rozdz. 2);
- dane wejściowe niezbędne do analizy nośności odrzwi w oparciu o metodę nośności granicznej (równanie krzywej granicznej dla kształtowników typu V (wzór 16), charakter rozkładu prawdopodobieństwa i współczynnik zmienności granicy plastyczności stali stosowanej do produkcji łuków obudowy ŁP (rozdz. 3.1));
- sposób określenia zależności teoretycznych na wartość momentu zginającego i siły podłużnej w odrzwiach w stanie równowagi granicznej, przyjęty tok postępowania przy szacowaniu nośności konstrukcji w oparciu o teorię nośności granicznej oraz weryfikację przyjętej metody obliczeń na podstawie wyników badań stanowiskowych (rozdz. 3.2);
- czynniki wpływające na wartości sił wewnętrznych powstających w odrzwiach — rozdz. 3.3.2 (tzn. moduł ściśliwości podłoża, pole przekroju poprzecznego kształtownika, szerokość odrzwi w świetle kształtownika, zmienność wartości oczekiwanej granicy plastyczności stali, długość obciążonego odcinka odrzwi odniesioną do rozpiętości odrzwi);
- plan niezbędnych do realizacji eksperymentów obliczeniowych (tabl. 2), warianty i przypadki obliczeń różniące się sposobem podejścia do zjawisk wyboczenia łuku i zwichrzenia profilu kształtownika oraz uwzględnieniem zmienności granicy plastyczności stali (rozdz. 3.3.2);
- model obliczeniowy zastosowany przy konstruowaniu formuł wiążących nośność odrzwi i powstającą w nich siłę podłużną z wybranymi czynnikami technicznymi, sposób i wyniki wyznaczania współczynników funkcji regresji liniowej (rozdz. 3.3.3);

* OBR BG „BUDOKOP”, UL. POWSTAŃCÓW 19A, 41-400 MYSŁOWICE, POLAND

- wybór zależności zalecanych do wykorzystania praktycznego, pozwalających na wyznaczenie nośności i sprowadzonej nośności odrzwi ze względu na wytrzymałość kształownika oraz wymaganej nośności złącz i określenie bezpiecznego zakresu ich stosowania (rozdz. 3.3.4).

Wyznaczenie współczynników regresji funkcji opisujących podstawowe parametry wytrzymałościowe odrzwi obudowy łukowej odbyło się po ich zamodelowaniu w stanie usztywnionym (tzn. bez zsuwu złącz), w warunkach działania obciążenia pionowego równomiernie rozłożonego na założonej szerokości: $0,2 s_w$, $0,6 s_w$ i s_w (s_w — szerokość odrzwi w świetle kształownika). Ponieważ rozważając rzeczywiste warunki pracy odrzwi charakteryzujące się możliwością zsuwu łuków względem siebie należałoby je traktować jako konstrukcję podatną, nośność odrzwi rozważono nie tylko pod kątem zdolności do przejścia obciążeń zewnętrznych przez kształownik, lecz również w aspekcie wymaganej nośności złącz. Ostatni z wymienionych parametrów oszacowano podając wartość charakterystyczną siły podłużnej powstającej na długości złącza w chwili osiągnięcia przez przekrój kształownika stanu równowagi granicznej (wzór 32), wychodząc z warunku równości nośności złącz i profilu decydującym o pełnym wykorzystaniu podporności odrzwi podatnych.

Wartości otrzymane przy zastosowaniu rozpatrywanej metody są większe od uzyskanych na podstawie cytowanych w artykule normatywnych zasad projektowania. Prowadzi to do wniosku. że uwzględnienie przy projektowaniu konstrukcji własności plastycznych materiału pozwala na jego oszczędność.

Pozostałymi cechami opracowanej metody są:

- możliwość szybkiego i łatwego oszacowania nośności odrzwi obudowy ŁP w zakresie najczęściej występującej w praktyce zmienności czynników na nią wpływających,
- łatwość jej adaptowania w odniesieniu do odrzwi o innej geometrii, wykonanych z innego profilu lub pracujących w innych warunkach.

Słowa kluczowe: nośność graniczna, stalowa obudowa łukowa

A new simplified method for estimating load capacity of steel arch support based on the limit load capacity theory was presented in the article. In particular, the article contains:

- main formulas and definitions of the limit load capacity theory (form. 1–8), verifying the possibility of using this theory for determining load capacity of steel arches made of section V (form. 9–13) and assumptions for calculations (ch. 2),
- input data for the analysis of the load capacity of steel arches with regard to the limit load capacity method (limiting curve equation for sections V; kind of the probability distribution and value of variation coefficient of yield point of steel using for arches' LP production) (p. 3.1),
- determination of the theoretical dependences of bending moment on longitudinal force in steel arches in the state of limit equilibrium, procedure of estimating the load capacity construction being accepted with regard to the limit load capacity theory and verification of the calculation method on the basis of stand tests results (p. 3.2),
- factors influencing the values of the internal forces appearing in steel arches (p. 3.3.2): modulus of ground compressibility; cross-sectional area of section V; the width of steel arches clear section, the variability of the mean value of the yield point of steel, the length of the loaded steel arch segment referred to the arch span,
- the calculation experiments' design (Table 2), variants and calculations cases varying in approach to arch buckling effects and section's plane surface stability in bending with regard to the variability of the yield point of steel (p. 3.3.2),
- the calculation model used to create the formulas binding the load capacity of a steel arch and the longitudinal force arising in it with the selected technical factors; method and results of estimating linear regression coefficients (p. 3.3.3),
- the selection of dependences for practical usage for estimating the load capacity and the reduced load capacity of steel arch with regard to the strength of the section and the required load capacity of joints and determining a safe range of their application (p. 3.3.4).

Determination of the regression coefficients of the functions describing the basic strength parameters of the steel sets of the arch support was done by their modelling in the stiffened state (i.e. without the slide down of joints), in the action conditions of vertical load uniformly distributed on the width being assumed: $0.2 s_w$; $0.6 s_w$ and s_w (s_w — width of the steel arch clear section).

When taking into consideration the real working conditions of the steel arch, which are characterized by the possibility of the slide down of the arches to each other, the steel arch should be treated as a flexible structure. Therefore, the load capacity of steel arch was considered not only as the ability to carry the external loads by a section, but also as the required load capacity of joints. The load capacity of joints was determined by the characteristic value of the longitudinal force arising on the joint length at the moment of reaching the state of limit equilibrium by the section (form. 32).

The values obtained with the use of the considered method are higher than the ones based upon the standard design principles cited in the article. Thus, when designing the steel arch support, taking into account the plastic properties of material makes the use of material more economical.

Other features of the carried out method are:

- the possibility of quick and easy estimating the load capacity of steel arch support LP in the range of the most common variability of the factors influenced it,
- adaptation facility with respect to the steel arch sets with another geometry, made of another section and working under different conditions.

Key words: limit load capacity, steel arch support

1. Wprowadzenie

Pierwsza konstrukcja obudowy stalowej łukowej typu Toussaint-Heintzman powstała w roku 1932 (Spruth 1959) i od tej pory zaczęła być ona wykorzystywana powszechnie w wyrobiskach korytarzowych w kopalniach oraz, w określonych warunkach, stała się obudową wstępną w tunelach. Obecnie obudowa stalowa łukowa uważana jest za najbardziej odpowiedni typ konstrukcji (por. Rułka i in. 1983) służącej do zabezpieczania długotrwałych wyrobisk górniczych w przypadku ich lokalizacji w skałach zwięzłych, o średnio zaawansowanej tektonice i charakteryzujących się odpornością na działanie atmosfery kopalnianej. W warunkach występowania wpływów eksploatacyjnych zaleca się stosowanie obudowy podatnej, w przeciwnym przypadku — sztywnej.

Ważnym elementem przy projektowaniu obudowy stalowej łukowej jest znajomość jej nośności, czyli maksymalnego obciążenia, które może ona przenieść. Pierwsze próby opracowania metody jej obliczania pojawiły się w latach sześćdziesiątych (Chudek 1964, 1968). Przy wyznaczaniu nośności konstrukcji przyjmowano konfigurację obciążenia pionowego i poziomego, bez uwzględnienia oporu sprężystego wykładki lub górotworu, a warunek nośności konstruowano przy użyciu metody naprężeń dopuszczalnych. Wpływ sztywności wykładki na nośność obudowy łukowej określono po raz pierwszy w pracy (Mateja i in. 1979), zaś jej odpór sprężysty wprowadzono do obliczeń w pracy (Mateja 1982). Nośność zsuwną łuku zaczęto rozpatrywać w pracy (Mateja 1982). Duże znaczenie miało zastosowanie przy określaniu nośności obudowy stalowej łukowej metod teorii nośności granicznej. Pierwszą pracą w tym kierunku była rozprawa doktorska W. Szuścika (1962), w której rozważono stan graniczny profilu obudowy obciążonego równocześnie siłą podłużną, siłą poprzeczną, momentem zginającym i skręcającym.

Powszechność stosowania obudowy łukowej w budownictwie podziemnym spowodowała intensywny rozwój sposobów jej obliczania (por. m.in.: Baklašov i in. 1979; Bieniawski 1984; Brady i in. 1994; Bulyčev 1989; Dżaparidze 1975; Geleskul i in. 1982; Hoek i in. 1995; Jacobi 1981; Karetnikov i in. 1984, 1989; Košelev i in. 1990; Singh i in. 1999; Whittaker i in. 1990; Zaslavskij i in. 1979).

Pomimo że do chwili obecnej opracowano szereg metod pozwalających na jej dobór, m.in. tzw. normatywne zasady określania nośności obudowy (Chudek i in. 2000; Drzęzła i in. 1999; Rułka i in. 2001), w dalszym ciągu kontynuowane są prace nad wyznaczeniem nośności rozpatrywanej obudowy oraz jej głównego elementu konstrukcyjnego, jakim są odrzwia stalowe.

Można tu wymienić m.in. opracowaną metodę szacowania nośności odrzwi obudowy stalowej łukowej opartą na teorii nośności granicznej (Domańska 2001), uwzględniającą wpływ na nośność wymienionej konstrukcji najistotniejszych czynników związanych z konstrukcją odrzwi, warunkami pracy oraz zmiennością granicy plastyczności stali stosowanej do produkcji łuków.

2. Podstawowe założenia teorii nośności granicznej

Rozpatrywanie pracy konstrukcji jedynie w fazie sprężystej niejednokrotnie nie oddaje jej możliwości do przejścia obciążeń zewnętrznych, dlatego coraz częściej zwracamy się w stronę teorii odwzorowujących zjawiska jej uplastycznienia. Ponieważ w celu określenia nośności konstrukcji z uwzględnieniem uplastycznienia materiału można rozważać stan powstających w niej naprężeń pod wpływem wzrostu obciążenia aż do momentu osiągnięcia krytycznego wyteżenia, co jednak jest skomplikowane pod względem praktycznym, coraz szersze zastosowanie znajduje teoria nośności granicznej (por. Mendera 1969, 1984; Biegus 1999) zajmująca się analizą tylko samego etapu zniszczenia (z pominięciem pośrednich stanów równowagi sprężysto-plastycznej). Opiera się ona na sztywno-plastycznym modelu materiału, którego mechanicznym odzwierciedleniem jest układ z suchym tarcieniem (por. Sawczuk 1964). Zgodnie z rozważaną teorią nośność konstrukcji zostanie wyczerpana, gdy w dostatecznej liczbie punktów (tzw. przegubach plastycznych) wystąpi uplastycznienie materiału, a tym samym konstrukcja przekształci się w układ geometrycznie zmienny (tzw. łańcuch kinematyczny). Opracowana metoda zakłada, że zjawisko to może zaistnieć z chwilą pojawienia się w odrzwiach co najmniej $n + 1$ przegubów plastycznych (n — stopień statycznej niewyznaczalności).

Przy rozpatrywaniu nośności konstrukcji prętowych, płytowych lub powłokowych w oparciu o teorię nośności granicznej, wprowadza się uogólnione siły wewnętrzne Q oraz uogólnione prędkości przemieszczeń v . Wówczas komplet równań omawianej teorii stanowią (por. Sawczuk 1982):

- równania równowagi:

$$L_{ij} \cdot Q_j = P_i \quad (1)$$

gdzie:

L_{ij} — odpowiedni liniowy operator różniczkowy,

Q_j — uogólnione siły wewnętrzne,

P_i — obciążenie konstrukcji,

- związki kinematyczne:

$$q_i = R_{ij} \cdot v_j \quad (2)$$

gdzie:

q_i, v_j — uogólnione prędkości odkształceń i przemieszczeń,

R_{ij} — odpowiedni liniowy operator różniczkowy,

- warunek plastyczności (równanie krzywej granicznej):

$$\Phi(Q_i) = 0 \quad (3)$$

- stowarzyszone prawo płynięcia

$$q_i = \lambda_{pr} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} \quad \lambda_{pr} > 0 \quad (4)$$

gdzie:

λ_{pr} — współczynnik proporcjonalności.

Teoria nośności granicznej może być wykorzystywana, gdy obciążenie konstrukcji wzrasta powoli i jest proporcjonalne do jednego parametru zwanego intensywnością obciążenia:

$$P(x, t) = \mu(t) \cdot p(x) \quad (5)$$

gdzie:

$p(x)$ — rozkład obciążenia na płaszczyźnie (lub w przestrzeni) (tzw. konfiguracja obciążenia),

$\mu(t)$ — mnożnik (intensywność) obciążenia w chwili t .

Przy rozwiązywaniu zagadnień teorii nośności granicznej wprowadza się również pojęcia statycznie dopuszczalnego pola naprężeń i kinematycznie dopuszczalnego pola prędkości przemieszczeń. Statycznie dopuszczalne pole naprężeń spełnia warunki równowagi wewnętrznej, warunki brzegowe dla sił powierzchniowych i nie przekracza warunku plastyczności. Pole to występuje przy mnożniku (intensywności) obciążenia μ_s . Kinematycznie dopuszczalne pole prędkości spełnia kinematyczne warunki brzegowe, nałożone więzy wewnętrzne ciągłości pola prędkości przemieszczeń, stowarzyszone prawo płynięcia oraz dostarcza dodatniej wartości mocy obciążeń zewnętrznych (wyznaczone dla kinematycznie dopuszczalnego pola prędkości naprężenia nie muszą natomiast spełniać równań równowagi wewnętrznej). Pole to występuje przy mnożniku (intensywności) obciążenia μ_k .

Podstawowe twierdzenie teorii nośności granicznej można opisać nierównością (por. Sawczuk 1982):

$$\mu_s \leq \mu_G \leq \mu_k \quad (6)$$

gdzie:

μ_G — intensywność obciążenia, przy którym występuje stan graniczny nośności konstrukcji,

μ_k — kinematycznie dopuszczalny mnożnik obciążenia,

μ_s — statycznie dopuszczalny mnożnik obciążenia.

Jeżeli uzyska się takie rozwiązanie, że:

$$\mu_s = \mu_G = \mu_k \quad (7)$$

to nazywa się je rozwiązaniem zupełnym. Ponieważ uzyskanie rozwiązania zupełnego jest trudne, wyznaczanie nośności granicznej oparte jest często na metodach przybliżonych, uwzględniających tylko podejście statyczne bądź kinematyczne. W sytuacji tej na ogół zadowalamy się dolnym oszacowaniem mnożnika obciążenia μ_G , podając możliwie największą wartością mnożnika μ_s spełniającego nierówność:

$$\mu_s \leq \mu_G \quad (8)$$

co też uczyniono w trakcie opracowywania omawianej nowej metody wyznaczania nośności odrzwi.

Teoria nośności granicznej może być stosowana jedynie w przypadku konstrukcji wykonanych z materiałów spełniających odpowiednie wymagania jakościowe oraz odpowiednio obciążonych. W związku z tym w pierwszej kolejności należało sprawdzić możliwość wykorzystania tej teorii w odniesieniu do odrzwi obudowy stalowej łukowej ŁP. Analizy dokonano w oparciu o istniejące doświadczenia związane z wymiarowaniem konstrukcji stalowych z uwzględnieniem rezerwy plastycznej, objęte normą (PN-B-03200: 1990).

Na wstępie sprawdzono warunki dla materiału łuku odnośnie do wydłużalności i współczynnika wzmocnienia:

$$A_5 > 15\% \quad (9)$$

$$\frac{R_m}{R_e} > 1,2 \quad (10)$$

gdzie:

A_5 — wydłużalność próbki pięciokrotnej [%],

R_m — specyfikowana przez producenta wytrzymałość na rozciąganie [kPa],

R_e — specyfikowana przez producenta (normowa) granica plastyczności [kPa].

Istotnie, zgodnie z (PN H 93441-1: 1994), dla stali stosowanej do produkcji kształtowników typu V minimalne wartości rozpatrywanych parametrów mechanicznych wynoszą:

- $A_5 = 17\%$,
- $R_m = 550\ 000\ \text{kPa}$, $R_e = 340\ 000\ \text{kPa}$, $\frac{R_m}{R_e} = 1,62$.

W dalszej kolejności sprawdzono, czy przekrój V jest przekrojem klasy 1 (PN-B-03200 1990), tzn. czy w odniesieniu do niego spełniony jest warunek:

$$\left(\frac{b}{t}\right) \leq 33\varepsilon \quad (11)$$

gdzie:

- b — długość ramienia bocznego kształtownika [m],
- t — grubość ramienia bocznego kształtownika [m],

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{215}{f_d}} = 0,853 \quad (12)$$

gdzie:

- f_d — wytrzymałość obliczeniowa stali [MPa],

$$f_d = \frac{R_{e\min}}{\gamma_s} = 295,65\ \text{MPa} \quad (13)$$

Na podstawie normy (PN-H-93441-1: 1994) $R_{e\min} = 340\ \text{MPa}$, zaś według normy (PN-B-03200: 1990) $\gamma_s = 1,15$. Ponieważ zależność między długością i grubością ścianek bocznych dla kształtowników V16,5–V44 wynosi: 12,6–14,4 (co jest wartością mniejszą od $33\varepsilon = 28,15$), można je zakwalifikować do przekrojów klasy 1.

Następnie sformułowano założenia do obliczeń:

- zakłada się, że obciążenie działa w płaszczyźnie łuku, wzrasta powoli i posiada stałą konfigurację; obciążenie jest równomiernie rozłożone na odcinku l ($l \leq s_w$, s_w — rozpiętość łuku), symetrycznie względem pionowej osi łuku;
- przy wyznaczaniu równowagi przekroju obowiązują ogólnie znane zależności ważne dla konstrukcji prętowych, a postać krzywej granicznej wyprowadza się przy założeniu zasady płaskich przekrojów oraz prostokątnego rozkładu naprężeń w stanie granicznym;
- w krzywej granicznej uwzględnia się wpływ na nośność przekroju wyboczenia przy ściskaniu oraz zwichrzenia profilu przy jego zginaniu;
- zakłada się, że granica plastyczności stali w przegubie plastycznym jest zmienną losową o rozkładzie normalnym, pominięto natomiast wpływ losowych wahań granicy plastyczności stali na lokalizację przegubów plastycznych.

3. Badania nad opracowaniem metody szacowania nośności odrzwi obudowy stalowej łukowej

3.1. Funkcja graniczna i rozkład prawdopodobieństwa granicy plastyczności stali

W celu uwzględnienia rezerwy plastycznej materiału, przy określaniu nośności konstrukcji niezbędne jest wyznaczenie równania krzywej granicznej, czyli funkcji sił wewnętrznych opisującej warunek uplastycznienia jej przekroju. Zależność tę można zapisać w formie ogólnej (por. Janas 1967):

$$\Phi(M, N, T) = 0 \quad (14)$$

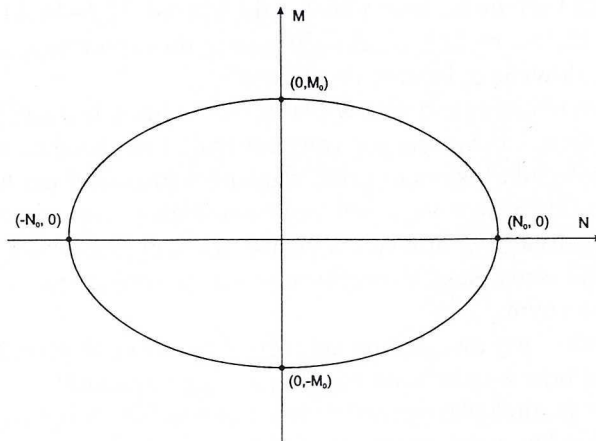
gdzie:

M, N, T — moment zginający, siła podłużna, siła poprzeczna w przekroju

zaś po uwzględnieniu specyfiki pracy łuku umożliwiającej pominięcie sił poprzecznych, w postaci:

$$\Phi(M, N) = 0 \quad (15)$$

Równanie krzywej granicznej wyprowadzono w formie uproszczonej, opierając się na ogólnych warunkach uplastycznienia dla czystego ściskania i zginania oraz po przekształceniu profili V na równoważne im przekroje złożone z elementów prostokątnych. Uproszczoną postać krzywej granicznej, poprowadzoną przez punkty odpowiadające czystemu ściskaniu i zginaniu rozpatrywanego przekroju (bez uwzględnienia jego wybożenia i zwichrzenia), przedstawiono na rysunku 1. Przyjęto, że dodatnie są



Rys. 1. Krzywa graniczna dla kształtownika typu V
(bez uwzględnienia wybożenia i zwichrzenia przekroju)

Fig. 1. Limiting curve for section V
(without taking into consideration arch buckling and section's plane surface stability)

siły podłużne rozciągające oraz momenty zginające powodujące rozciąganie włókien obudowy od strony wyrobiska.

Funkcję $M = f(N)$ odpowiadającą stanowi granicznemu przekroju można zapisać w formie równania (por. Janas 1967):

$$|M| = -M_0 \left(\frac{N^2}{N_0^2} - 1 \right) \quad (16)$$

gdzie:

M_0 — ekstremalny moment zginający kształtownik [kN · m]:

$$M_0 = \frac{1}{2} m_R \cdot A \cdot a \quad (17)$$

m_R — wartość oczekiwana granicy plastyczności stali [kPa],

A — pole powierzchni przekroju poprzecznego kształtownika (PN-H-93441-3: 1994) [m²],

a — odległość między środkami ciężkości dwóch części kształtownika oddzielonych osią obojętną [m],

N_0 — ekstremalna siła ściskająca kształtownik [kN]:

$$N_0 = -m_R \cdot A \quad (18)$$

zaś zależność $\Phi(M, N)$ w postaci wzoru:

$$\Phi(M, N) = |M| + M_0 \left(\frac{N^2}{N_0^2} - 1 \right) \leq 0 \quad (19)$$

Odległości a między środkami ciężkości dwóch części kształtowników oddzielonych osią obojętną (pozwalające na wyznaczenie ich wskaźników oporu plastycznego przy zginaniu) zostały oszacowane metodą wykreślną, wykreślno-analityczną i analityczną, przy czym do dalszych obliczeń przyjęto określone ostatnim z wymienionych sposobów.

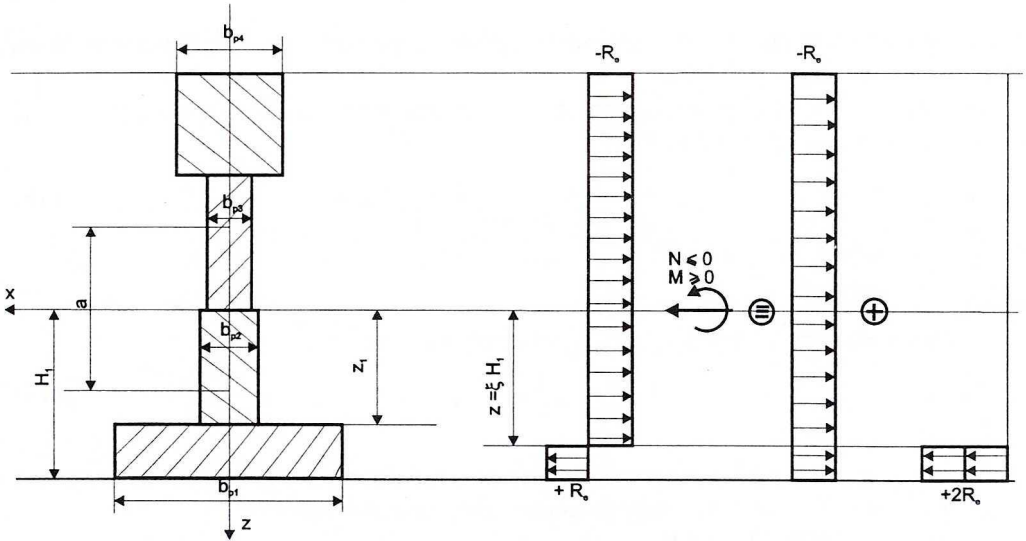
Z kolei formuły rozwinięte krzywej granicznej zostały wyprowadzone dla całego zakresu ściskania kształtownika, co przykładowo przedstawia rysunek 2 i odpowiadający mu wzór (20):

$$M = \frac{(N - N_0)^2}{4 \cdot m_R \cdot b_{p4}} - (N - N_0) \cdot H_2 \quad (20)$$

gdzie:

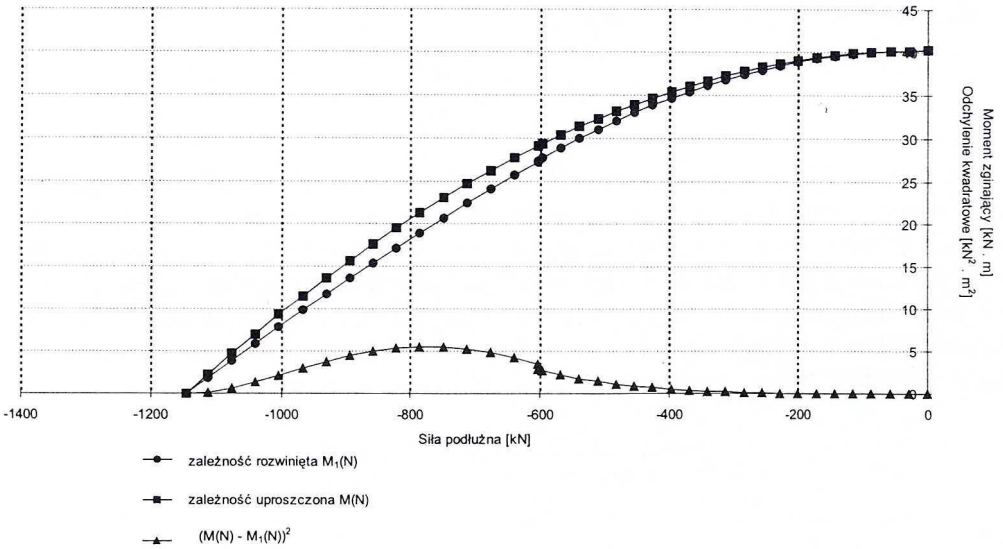
b_{p4}, H_2 — parametry geometryczne przekroju [m] (rys. 2),
pozostałe oznaczenia jak we wzorach (16)–(18).

Po przeanalizowaniu różnic w opisie stanu granicznego przekroju kształtownika za pomocą zależności uproszczonej (16) i rozwiniętych, co obrazuje m.in. przedstawiona na rysunku 3 krzywa kwadratu różnicy momentów zginających określonych dwoma



Rys. 2. Przykład ściskania mimośrodowego równoważnego profilowi V przekroju złożonego z elementów prostokątnych

Fig. 2. Example of eccentric compression of an equivalent to the section V section composed with rectangular elements

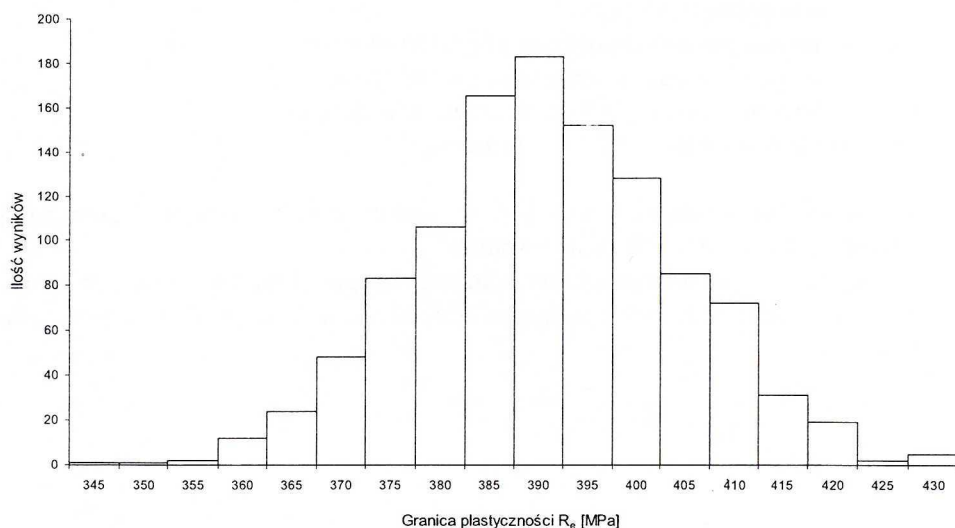


Rys. 3. Porównanie krzywych granicznych dla kształtownika V otrzymanych w oparciu o zależność uproszczoną i formuły rozwinięte

Fig. 3. Comparison of limiting curves for section V obtained with regard to the simplified dependence and expanding formulas

metodami stwierdzono, że do dalszych rozważań można wykorzystać równanie uproszczone (wzory 16 i 19).

Ponieważ w opisywanej metodzie wyznaczania nośności odrzwi stalowych obudowy ŁP postanowiono uwzględnić zagadnienie wpływu występującej w procesie produkcyjnym zmienności granicy plastyczności stali, należało wyznaczyć charakter jej rozkładu i współczynnik zmienności. Oszacowania tego dokonano na podstawie wyników badań laboratoryjnych różnych gatunków stali udostępnionych przez Hutę Łabędy i Hutę Katowice. W obliczeniach przyjęto założenie, że granica plastyczności stali posiada rozkład normalny (por. histogram granicy plastyczności stali 34 GJ stosowanej do produkcji kształtowników typu V w Hucie Katowice — rys. 4).



Rys. 4. Histogram granicy plastyczności stali 34 GJ

Fig. 4. Frequency diagram of the yield point of the 34 GJ steel

Hipoteza ta została zweryfikowana, w zależności od liczebności próbek w danym eksperymencie, za pośrednictwem statystyki Kołmogorowa lub χ^2 przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że do rozważań praktycznych można przyjąć współczynnik zmienności granicy plastyczności stali $v = 0,034$.

3.2. Opracowanie i weryfikacja modelu obliczeniowego

Prace nad nową metodą szacowania nośności odrzwi obudowy ŁP rozpoczęto od wyznaczenia teoretycznych zależności dla momentu zginającego i siły podłużnej powstających w przekroju kształtownika w stanie równowagi granicznej, uwzględniających wartości sił wewnętrznych otrzymanych dla modelu sprężystego (wzory 21 i 22). Założono działanie na odrzwia obciążenia równomiernie rozłożonego na określonym

odcinku (rys. 5), traktując jako nadliczbową reakcję H , a reakcję V jako statycznie wyznaczalną.

Zależności te mają postać:

$$M = \mu \cdot (M_{100} + H_{100} \cdot y) - \mu \cdot V_{100} \cdot \operatorname{tg} \chi \cdot y \quad (21)$$

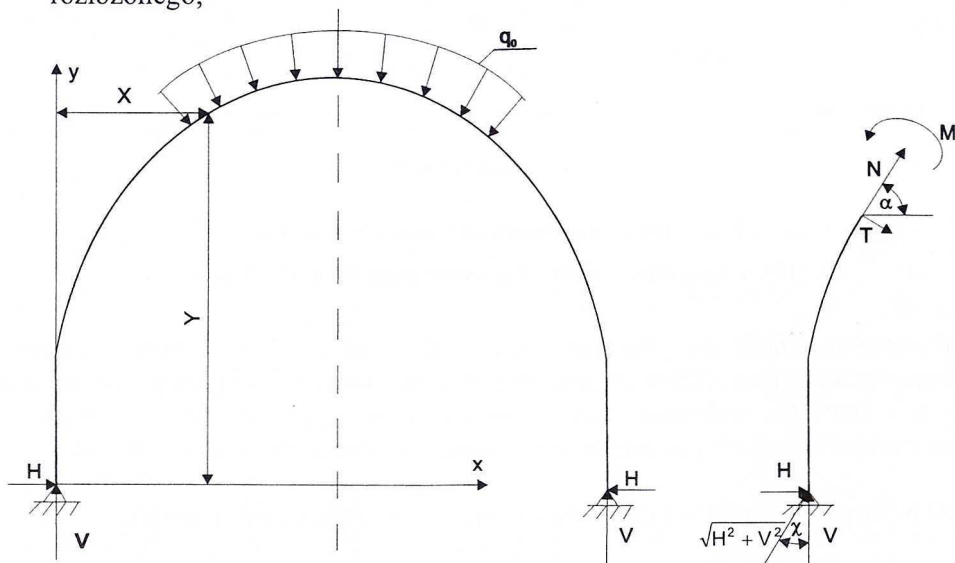
$$N = \mu \cdot (M_{100} + H_{100} \cdot \cos \alpha) - \mu \cdot V_{100} \cdot \operatorname{tg} \chi \cdot \cos \alpha \quad (22)$$

gdzie:

- μ — mnożnik obciążenia,
- y — współrzędna w układzie prostokątnym,
- M_{100} — moment zginający powstający przy obciążeniu $q = 100$ kN/m w przekroju o współrzędnych (x, y) ,
- V_{100} — reakcja pionowa dla obciążenia $q = 100$ kN/m,
- H_{100} — reakcja pozioma dla obciążenia $q = 100$ kN/m,
- $\operatorname{tg} \chi$ — tangens kąta nachylenia wypadkowej reakcji do osi y ,
- α — kąt nachylenia siły N do osi poziomej.

W celu określenia nośności konstrukcji w oparciu o teorię nośności granicznej przyjęto następujący, ogólny tok postępowania:

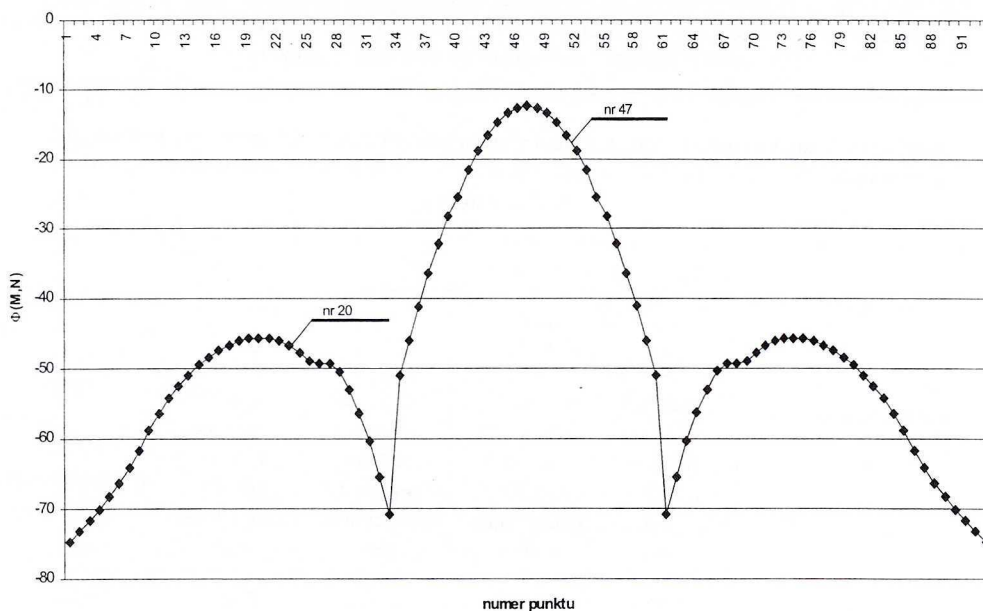
- wyznaczenie za pomocą programu komputerowego sił wewnętrznych w zamodelowanym łuku obudowy, poddanym oddziaływaniu obciążenia równomiernie rozłożonego,



Rys. 5. Schemat do określenia zależności ogólnej na wartość momentu zginającego i siły podłużnej w obudowie poddanej działaniu obciążenia równomiernie rozłożonego na określonym odcinku

Fig. 5. Chart to determine the general relationship for the value of bending moment and longitudinal force in steel arch subjected to the load uniformly distributed on the given arch segment

- wytypowanie miejsc powstania przegubów plastycznych; założono, że pierwszy przegub plastyczny wytworzy się w punkcie pierwszego, a drugi kolejnego maksimum funkcji $\Phi(M,N)$ określonej na długości łuku obudowy i wyrażonej wzorem (19) (rys. 6: punkty nr 47 i 20),
- obliczenie wartości mnożnika obciążenia odpowiadającego powstaniu w łuku obudowy pierwszego, a następnie drugiego przegubu plastycznego.



Rys. 6. Przykładowy przebieg funkcji $\Phi(M,N)$ na długości odrzwi obudowy ŁP8; mnożnik obciążenia $\mu = 1$

Fig. 6. Example of the course of the function $\Phi(M,N)$ on the length of steel set ŁP8, load multiplier $\mu = 1$

Weryfikacji przedstawionej metody obliczeń dokonano porównując uzyskaną za jej pośrednictwem nośność przykładowo wybranego łuku obudowy ŁP8 z kształtownika V25 z analogiczną wartością ustaloną na drodze doświadczalnej (Pacześniowski 1996), po zamodelowaniu odrzwi (o geometrii zgodnej z normą PN-G-15000/02: 1993) w sposób odzwierciedlający warunki prowadzenia próby wytrzymałościowej na stanowisku badawczym GIG (PN-G-15000/05: 1992; Pacześniowski 1996).

Obliczenia zostały zrealizowane w dwóch przypadkach różniących się wartością przyjętych parametrów wytrzymałościowych stali (przypadek 1 wprowadzał minimalną granicę plastyczności stali zgodną z normą (PN-H-93441-1: 1994) $R_{e \min} = 340$ MPa, przypadek 2 — określoną dla odrzwi poddanych badaniom doświadczalnym (Pacześniowski 1996) $R_{e \min} = 378$ MPa, w ramach każdego z nich w dwóch wariantach: po uwzględnieniu wyboczenia łuku odrzwi lub wyboczenia łuku i zwiczerzenia profilu

kształtownika, zaś dodatkowo dla każdego wariantu — w dwóch podwariantach uwzględniających brak lub występowanie korelacji między zmiennymi losowymi granicy plastyczności stali w punktach wytypowanych jako przeguby plastyczne (tabl. 1).

TABLICA 1

Zestawienie wyników określenia nośności odrzwi ŁP8 na stanowisku badawczym GIG i na podstawie nowej metody opartej na teorii nośności granicznej

TABLE 1

Setting the results of determining the steel arch ŁP8 load capacity on the research stand GIG (Main Institute of Mining) against one calculated on the basis of the new method using limit load capacity theory

Parametr szacowany		Wyniki uzyskane w oparciu o teorię nośności granicznej				Wyniki badań stanowiskowych odrzwi ze stali St55 $R_{e\min} = 378 \text{ MPa}$ według (Pacześniowski 1996)	
		$m_R = 364,81 \text{ MPa}$ ($R_{e\min} = 340 \text{ MPa}$)		$m_R = 405,58 \text{ MPa}$ ($R_{e\min} = 378 \text{ MPa}$)			
		nieskorel. zmienne losowe granicy plastyczności stali	skorel. zmienne losowe granicy plastyczności stali	nieskorel. zmienne losowe granicy plastyczności stali	skorel. zmienne losowe granicy plastyczności stali		
Nośność odrzwi MN/m	wartość średnia	0,259	0,260	0,288	0,288	0,289	
	przedział ufności	od	0,258	0,258	0,287	0,286	0,260
		do	0,260	0,261	0,289	0,290	0,319

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (tabl. 1) i porównania ich z rezultatami prób doświadczalnych wyciągnięto następujące, zasadnicze wnioski:

- nośność odrzwi wyznaczona przy założeniu skorelowanych i nieskorelowanych zmiennych losowych parametrów wytrzymałościowych stali, określających jej cechy mechaniczne w miejscu powstania pierwszego i drugiego przegubu plastycznego, jest praktycznie taka sama. Można więc stwierdzić, że zmienność wartości granicy plastyczności stali na długości łuku, w przedziale określonym przez współczynnik zmienności, praktycznie nie wpływa na nośność łuku,
- nośności odrzwi oszacowana w oparciu o teorię nośności granicznej mieści się w przedziale ufności określonym dla rozpatrywanego parametru na podstawie badań stanowiskowych (Pacześniowski 1996) i dlatego przyjęty schemat wyznaczania nośności na drodze teoretycznej uznano za nadający się do wykorzystania praktycznego.

3.3. Opracowanie metody szacowania nośności odrzwi

3.3.1. Uwagi ogólne

Po zweryfikowaniu sposobu wyznaczania nośności odrzwi opartego na teorii nośności granicznej na podstawie wyników badań stanowiskowych, można było przystąpić do zasadniczej fazy pracy nad konstruowaniem prostej metody szacowanego wymienionego parametru rozpatrywanej konstrukcji, tzn.:

- wytypować czynniki mające największy wpływ na nośność odrzwi,
- opracować plan niezbędnych do realizacji eksperymentów obliczeniowych,
- przeprowadzić obliczenia nośności odrzwi uwzględniające różnicowanie ich konstrukcji, materiału i warunków pracy,
- wyznaczyć proste związki funkcyjne pomiędzy nośnością odrzwi a czynnikami na nią wpływającymi,
- dokonać analizy wyników obliczeń nośności uzyskanych za pośrednictwem wzorów uproszczonych, wybrać zależności zalecane do zastosowania praktycznego i określić bezpieczny zakres ich stosowania.

3.3.2. Plan eksperymentów obliczeniowych

W oparciu o wyniki analizy dotychczasowego stanu badań nad nośnością stalowej obudowy łukowej, za podstawowe parametry decydujące o wartości sił wewnętrznych powstających w odrzwiach obudowy uznano:

- jakość podłoża wynikającą z własności wykładki (łącznie z opinką) i górotworu (por. Mateja 1982) — moduł (współczynnik) ściśliwości podłoża E_z (zmienna niezależna x_1),
- rodzaj kształtownika — pole przekroju poprzecznego A (zmienna niezależna x_2),
- wielkość odrzwi — szerokość odrzwi w świetle kształtownika s_w (zmienna niezależna x_3),
- zmienność parametrów wytrzymałościowych stali — wartość oczekiwana granicy plastyczności stali m_R (zmienna niezależna x_4),
- sposób przekazywania obciążenia równomiernie rozłożonego na odrzwia — długość obciążonego odcinka odrzwi l (nazwana w skrócie: długością obciążenia) odniesiona do rozpiętości odrzwi s_w , tzn. l/s_w (zmienna niezależna x_5).

W celu ustalenia zależności między wymienionymi czynnikami a nośnością odrzwi i powstającą w nich siłą podłużną w pierwszej kolejności określono plan niezbędnych do realizacji eksperymentów obliczeniowych. Posłużono się w tym celu stosowaną w doświadczalnictwie metodą planowania dwupoziomowego (por. Mańczak 1976), która pozwala na dobór parametrów wejściowych gwarantujący uzyskanie wynikowej zależności korelacyjnej o minimalnym odchyleniu standardowym przy minimalnej liczbie eksperymentów.

Wartości poszczególnych zmiennych niezależnych x_1 – x_4 wprowadzono do obliczeń na poziomach: górnym (+) i dolnym (–) (zmienną x_5 również na poziomie podsta-

wowym 0), przyjętych dla ustalonych ich wartości podstawowych, według zależności ogólnych:

$$x_{i \min} = x_i^0 - \Delta x_i \quad (23)$$

$$x_{i \max} = x_i^0 + \Delta x_i \quad (24)$$

gdzie:

- $x_{i \min}$ — poziom dolny parametru x_i ,
- $x_{i \max}$ — poziom górny parametru x_i ,
- x_i^0 — poziom podstawowy parametru x_i ,
- Δx_i — krok roboczy parametru x_i .

Biorąc pod uwagę możliwość nieliniowego wpływu długości obciążenia na nośność łuku (por. Mateja 1982), obliczenia postanowiono wykonać dla trzech wartości tego parametru, tj. $l = 0,2 s_w$, $l = 0,6 s_w$ i $l = s_w$, stąd ostatecznie wybrano trzykrotne powtórzenie planu eksperymentu całkowitego 2^4 , przyjmując plan złożony z 48 eksperymentów obliczeniowych (tabl. 2).

Dla każdego z nich ustalono wartości sił wewnętrznych powstających w odrzwiach, wytypowano miejsca wytworzenia się w konstrukcji pierwszego i drugiego przegubu plastycznego oraz określono parametry charakteryzujące pojawienie się w odrzwiach drugiego przegubu plastycznego. Wartości sił wewnętrznych w odrzwiach zostały określone indywidualnie dla każdego eksperymentu obliczeniowego, zgodnie z przyjętym do realizacji planem eksperymentu, tzn. po zamodelowaniu pracy łuku obudowy o określonych wymiarach, wykonanego z kształtownika V25 lub V36, obciążonego w sposób ciągły równomierny ($q_0 = 100 \text{ kN/m}$) na długości 0,2 i, 0,6 s_w lub całej szerokości odrzwi s_w , przy założeniu podłoża o parametrach sprężystych odpowiadających niestarannej i szczelnej wykładce.

Wszystkie wymienione wyżej wielkości wyznaczono w trzech wariantach:

- wariant 1: bez uwzględnienia wybożenia łuku i zwichrzenia profilu kształtownika,
- wariant 2: po uwzględnieniu zjawiska wybożenia łuku,
- wariant 3: po uwzględnieniu równoczesnego wybożenia łuku i zwichrzenia profilu kształtownika.

Dla każdego z wymienionych wariantów obliczenia wykonano przy założeniu:

- przypadek 1: zdeterminowana granica plastyczności stali,
- przypadek 2: nieskorelowane zmienne losowe granice plastyczności stali w punktach wytypowanych jako przeguby plastyczne,
- przypadek 3: skorelowane zmienne losowe granice plastyczności stali w punktach wytypowanych jako przeguby plastyczne.

W celu uwzględnienia wpływu na nośność odrzwi zmienności granicy plastyczności stali stosowanej do produkcji kształtowników typu V, dla każdej próby obliczeniowej realizowanej w ramach przypadku 1 lub 2 losowano parę nieskorelowanych lub skorelowanych liczb losowych, korygując za ich pośrednictwem wartość oczekiwaną granicy plastyczności stali wprowadzaną do równania krzywej granicznej w punktach

TABLICA 2

Plan eksperymentu całkowitego dla zmiennych niezależnych x_1-x_5

TABLE 2

Complete experiment's design for the independent variables x_1-x_5

Numer eksperymentu	Poziom zmiennej niezależnej					
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+	-	+	+	+	-
2	+	-	+	+	-	-
3	+	-	+	-	+	-
4	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-
6	+	-	-	+	-	-
7	+	-	-	-	+	-
8	+	-	-	-	-	-
9	+	+	+	+	+	-
10	+	+	+	+	-	-
11	+	+	+	-	+	-
12	+	+	+	-	-	-
13	+	+	-	+	+	-
14	+	+	-	+	-	-
15	+	+	-	-	+	-
16	+	+	-	-	-	-
17	+	-	+	+	+	0
18	+	-	+	+	-	0
19	+	-	+	-	+	0
20	+	-	+	-	-	0
21	+	-	-	+	+	0
22	+	-	-	+	-	0
23	+	-	-	-	+	0
24	+	-	-	-	-	0
25	+	+	+	+	+	0
26	+	+	+	+	-	0
27	+	+	+	-	+	0
28	+	+	+	-	-	0
29	+	+	-	+	+	0
30	+	+	-	+	-	0
31	+	+	-	-	+	0
32	+	+	-	-	-	0
33	+	-	+	+	+	+
34	+	-	+	+	-	+
35	+	-	+	-	+	+
36	+	-	+	-	-	+
37	+	-	-	+	+	+
38	+	-	-	+	-	+
39	+	-	-	-	+	+
40	+	-	-	-	-	+
41	+	+	+	+	+	+
42	+	+	+	+	-	+
43	+	+	+	-	+	+
44	+	+	+	-	-	+
45	+	+	-	+	+	+
46	+	+	-	+	-	+
47	+	+	-	-	+	+
48	+	+	-	-	-	+

- (-) — poziom dolny zmiennej niezależnej,
 (0) — poziom podstawowy zmiennej niezależnej,
 (+) — poziom górny zmiennej niezależnej.

powstania pierwszego i drugiego przegubu plastycznego. Założono, że w obrębie rozpatrywanego wariantu i przypadku współczynniki losowe charakteryzują się:

- zerową wartością oczekiwaną, co zostało sprawdzone na podstawie testu opartego na rozkładzie t Studenta przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (por. Zieliński 1972),
- odchyleniem standardowym:

$$\sigma = v \cdot m_R \quad (25)$$

gdzie:

- v — współczynnik zmienności granicy plastyczności stali,
- m_R — wartość oczekiwana granicy plastyczności stali,

co zweryfikowano za pomocą statystyki χ^2 przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

W oparciu o obliczone wartości mnożnika obciążenia i tg kąta nachylenia wypadkowej reakcji podporowej w momencie pojawienia się w konstrukcji drugiego przegubu plastycznego (warunek zerowania się funkcji $\Phi(M,N)$ równocześnie w dwóch punktach wytypowanych jako przeguby plastyczne), dla wszystkich wariantów i przypadków obliczeń określono ponadto:

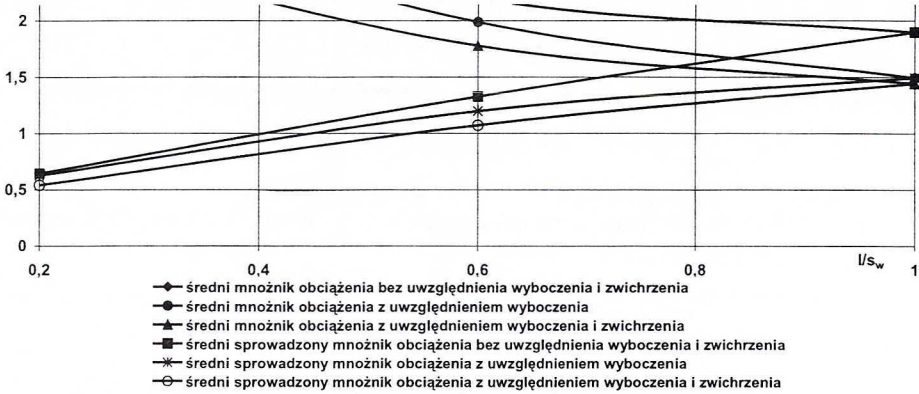
- minimalną siłę podłużną na długości złącza (miejsce występowania złącz ustalano indywidualnie w zależności od geometrii łuku i liczby elementów składowych obudowy),
- maksymalną i minimalną siłę podłużną na długości łuku (wyznaczenie tych sił miało głównie charakter porównawczy — zobrazowanie proporcji między ekstremalnymi siłami na długości całego łuku i złącza),
- sprowadzony mnożnik obciążenia:

$$\mu^* = \frac{\mu \cdot l}{s_w} \quad (26)$$

gdzie:

- μ^* — sprowadzony mnożnik obciążenia odniesiony do szerokości odrzwi,
- μ — mnożnik obciążenia,
- l — długość obciążonego odcinka odrzwi [m],
- s_w — szerokość odrzwi w świetle kształtownika [m].

Zastosowanie pojęcia sprowadzonego mnożnika obciążenia zostało podyktowane faktem, że w wielu przypadkach bardziej dogodnie jest posługiwanie się wskaźnikiem obciążenia odniesionym do szerokości wyrobiska. Jak widać z wykresów zamieszczonych na rysunku 7 sporządzonych dla uśrednionych wartości uzyskanych dla wcześniej wymienionych trzech przypadków zmienności parametrów wytrzymałościowych stali (tzn. bez uwzględnienia wpływu wyboczenia i zwichrzenia, z uwzględnieniem wpływu wyboczenia oraz równoczesnego oddziaływania wyboczenia i zwichrzenia), mnożnik obciążenia maleje w miarę zwiększania długości obciążenia i osiąga minimum dla $l = s_w$. Odmienna zależność występuje w odniesieniu do sprowadzonego mnoż-



Rys. 7. Zależność między średnim mnożnikiem μ i średnim sprowadzonym mnożnikiem μ^* a długością obciążenia

Fig. 7. Dependence the mean multiplier μ and the mean reduced multiplier μ^* on the load length

nika obciążenia, który jest największy dla obciążenia działającego na całej szerokości odrzwi.

3.3.3. Model regresji liniowej

Przy konstruowaniu prostych formuł obliczeniowych pozwalających na oszacowanie poszukiwanego parametru odrzwi (jak np. mnożnik obciążenia, siła podłużna), posłużono się modelem regresji liniowej (por. Mańczak 1976) zakładając, że między opisywanym obiektem a podstawowymi parametrami technicznymi istnieje zależność:

$$y = X \cdot B + e \quad (27)$$

gdzie:

- y — wielkość wyjściowa (np. nośność), będąca wektorem zmiennych losowych o rozkładzie normalnym,
- X — macierz wejść, stanowiąca tablicę wartości wejść x_1, x_2, \dots, x_s w chwilach 1, 2, ..., n dla eksperymentów obliczeniowych,
- B — wektor współczynników,
- e — zakłócenie stanowiące wektor zmiennych losowych niezależnych o rozkładzie normalnym $N(0, \sigma^2)$; przyjęto, że jest on związany przede wszystkim z losowym rozrzutem granicy plastyczności stali.

Zgodnie z przyjętym planem eksperymentu, zależności ogólne postanowiono wyznaczyć traktując jako zmienne niezależne (wejścia):

- x_1-x_4 (formuły obliczeniowe odnoszące się do długości obciążenia $l = 0,2 s_w$; $l = 0,6 s_w$ i $l = s_w$):
- macierz wejścia:

$$X = \begin{bmatrix} 1, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14} \\ 1, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24} \\ \dots \\ 1, x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, x_{n4} \end{bmatrix} \quad (28)$$

- wektor współczynników $B^T = [B_0, B_1, B_2, B_3, B_4]$.
- x_1-x_5 (formuły obliczeniowe odnoszące się do wszystkich rozpatrywanych zakresów obciążenia l/s_w):
- macierz wejścia:

$$X = \begin{bmatrix} 1, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15} \\ 1, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25} \\ \dots \\ 1, x_{n1}, x_{n2}, x_{n3}, x_{n4}, x_{n5} \end{bmatrix} \quad (29)$$

- wektor współczynników $B^T = [B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]$.

Zgodnie z założeniami metody regresji liniowej zależność (27) można przybliżyć wzorem:

$$\hat{y} = Xb \quad (30)$$

gdzie:

- b — wektor parametrów funkcji regresji liniowej (ocena wektora B), otrzymany metodą najmniejszych kwadratów ze wzoru:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (31)$$

- dla zmiennych niezależnych x_1-x_4 : $b^T = [b_0, b_1, b_2, b_3, b_4]$,
- dla zmiennych niezależnych x_1-x_5 : $b^T = [b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]$.

Wartości wektorów parametrów funkcji regresji liniowej zostały obliczone dla wariantu uwzględniającego występowanie wybożenia łuku odrzwi i zwichrzenia profilu kształtownika.

W pierwszej kolejności przygotowano dane wejściowe grupując je w 15 zestawów (po pięć dla każdego z trzech wyodrębnionych wcześniej przypadków), a w ramach każdego z nich wyodrębniono 4 podzestawy dla eksperymentów: 1–16 ($l = 0,2 s_w$), 17–32 ($l = 0,6 s_w$), 33–48 ($l = s_w$) i 1 48 (wszystkie warianty obciążenia).

Po podstawieniu poszczególnych zestawów danych obliczono współczynniki funkcji regresji, a następnie określono zmienną zależną \hat{y} z równania regresji, różnicę między zmienną zależną z równania regresji a zmienną zależną wprowadzoną do

obliczeń $(\hat{y} - y)$, stosunek $\frac{\hat{y} - y}{y}$ i inne wybrane parametry statystyczne, m.in. wartości

zmiennych Studenta t_k (por. Mańczak 1976), które po porównaniu z odczytanymi z tablic t_{kr}^* na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ przy liczbie stopni swobody $N-K-1$ (N — liczba eksperymentów, K — liczba zmiennych niezależnych) pozwoliły na sprawdzenie istotności uzyskanych współczynników regresji b_k . W przypadku gdy $|t_k| > t_{kr}^*$ odrzucano hipotezę o nieistotności danego współczynnika. Gdy powyższy warunek nie był spełniony, obliczenia dla danego zestawu danych wykonywano ponownie, pomijając współczynnik nieistotny. Przykładowe wyniki obliczeń współczynników wielowymiarowej liniowej funkcji regresji zestawiono w tablicy 3.

Aby stwierdzić, który z wyznaczonych opisów (za pośrednictwem wszystkich współczynników, czy po pominięciu nieistotnych) dokładniej odwzorowuje przebieg poszukiwanej funkcji, porównano ze sobą współczynniki korelacji wielowymiarowej. Prawie we wszystkich przypadkach stwierdzono lepsze odwzorowanie opisu poszukiwanych funkcji po przyjęciu odrębnych formuł obliczeniowych dla poszczególnych długości obciążenia i po uwzględnieniu wszystkich współczynników regresji.

Ponieważ omawiana metoda odnosi się do pracy odrzwi obudowy podatnej, o nośności których nie decyduje wyłącznie nośność kształtownika, lecz również zdolność do przejmowania obciążeń przez złącza (por. m.in.: Mateja 1982; Drzęźła i in. 1999; Chudek i in. 2000; Rułka i in. 2001), zajęto się również analizą wymienionego zagadnienia. Dążąc do pełnego wykorzystania nośności odrzwi postanowiono wyznaczyć taką wartość siły podłużnej, którą powinny przejść złącza, aby zapewnić nieprzesuwność elementów łuku. Biorąc pod uwagę zasady wymiarowania konstrukcji metodą stanów granicznych (por. PN-B-03001: 1976), przyjęto jako miarodajną w tym przypadku wartość charakterystyczną siły podłużnej wyznaczoną dla prawdopodobieństwa nieprzekroczenia równego 0,95:

$$N_N = \hat{y}^0 + t_{kr}^* \cdot \hat{\sigma}_{y-\hat{y}} \sqrt{1 + (\mathbf{X}^0)^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^0} \quad (32)$$

gdzie:

- \hat{y}^0 — wartość wyjścia wyznaczona z równania regresji dla wektora wejść \mathbf{X}^0 ,
- t_{kr}^* — wartość odczytana z tablic rozkładu Studenta dla $N-K-1$ stopni swobody (N — liczba eksperymentów, K — liczba zmiennych niezależnych), dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,10$,
- $\hat{\sigma}_{y-\hat{y}}$ — odchylenie standardowe resztowe zmiennej losowej (stanowiące ocenę odchylenia standardowego zakłócenia),
- \mathbf{X}^0 — wektor wejść dla danego eksperymentu obliczeniowego.

Podobnie jak dla mnożników obciążenia, wartości charakterystyczne siły podłużnej dla poszczególnych wektorów wejść \mathbf{X}^0 (tzn. dla każdego eksperymentu obliczeniowego), opisano zależnościami funkcyjnymi, wyznaczając współczynniki b_k wielowymiarowej liniowej funkcji regresji, co przykładowo prezentuje tablica 4.

TABLICA 3

Współczynniki wielowymiarowej liniowej funkcji regresji opisującej mnożnik obciążenia przy założeniu nieskorelowanych zmiennych losowych granicy plastyczności stali

TABLE 3

Linear multidimensional regression coefficients describing the load multiplier with assumption uncorrelated random variables of the yield point of steel

Współczynnik funkcji regresji		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	Współczynnik korelacji wielowymiarowej
Wszystkie współczynniki	eksp. obl. 1–16	-0,938874	0,125649	740,36897	-0,471394	0,007576	—	0,981561
	eksp. obl. 17–32	-1,073669	0,132115	358,83903	-0,179389	0,005203	—	0,979126
	eksp. obl. 33–48	-0,716779	0,071755	307,88453	-0,172592	0,004411	—	0,943711
	eksp. obl. 1–48	-0,003294	0,109840	469,03085	-0,274458	0,005730	-1,510801	0,942113
Po odrzuceniu współczynników nieistotnych	eksp. obl. 1–16	—	0,122634	697,32545	-0,530524	0,006369	—	0,977325
	eksp. obl. 33–48	—	0,069453	275,02314	-0,217734	0,003490	—	0,933031
	eksp. obl. 1–48	—	0,109830	468,88270	-0,274662	0,005726	-1,510905	0,942113

TABLICA 4

Współczynniki wielowymiarowej liniowej funkcji regresji opisującej wymaganą nośność złącza odrzwi obudowy ŁP przy założeniu skorelowanych zmiennych losowych granicy plastyczności stali

TABLE 4

Linear multidimensional regression coefficients describing the required load capacity of joints of steel arch sets ŁP with assumption correlated random variables of the yield point of steel

Współczynnik funkcji regresji		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	Współczynnik korelacji wielowymiarowej
Wszystkie współczynniki	eksp. obl. 1–16	-254,9015	19,555800	48417,313	2,187100	0,673700	—	1,000000
	eksp. obl. 17–32	-811,1040	38,714876	84516,45	72,233263	1,222024	—	1,000000
	eksp. obl. 33–48	-803,7861	30,344730	112697,46	64,272626	1,264462	—	1,000000
	eksp. obl. 1–48	-745,0751	29,538464	81877,08	46,230997	1,053384	286,60906	0,999986

3.3.4. Analiza wyników obliczeń

Dla rozpatrywanych w pracy typów odrzwi, podłoża, kształtownika i parametrów wytrzymałościowych stali wyznaczono wartości obliczeniowe mnożnika obciążenia, nośności odrzwi oraz wymaganej nośności złącz. Nośność obliczeniową i sprowadzoną nośność obliczeniową odrzwi określono według wzorów:

$$\hat{q} = \hat{\mu} \cdot q_0 \quad (33)$$

$$\hat{q}^* = \hat{\mu}^* \cdot q_0 \quad (34)$$

gdzie:

- \hat{q} — obliczeniowa nośność odrzwi wyznaczona w oparciu o równanie regresji [MN/m],
- \hat{q}^* — obliczeniowa sprowadzona nośność odrzwi wyznaczona w oparciu o równanie regresji [MN/m],
- $\hat{\mu}$ — obliczeniowy mnożnik obciążenia wyznaczony na podstawie równania regresji,
- $\hat{\mu}^*$ — obliczeniowy sprowadzony mnożnik obciążenia wyznaczony na podstawie równania regresji,
- q_0 — obciążenie, przy którym wyznaczono wartości sił wewnętrznych w odrzwiach, [MN/m]; $q_0 = 0,1$ MN/m.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników wybrano opis nośności dokonany za pomocą współczynników regresji b_0 – b_4 określonych dla wytypowanych długości obciążenia $l = 0,2 s_w$, $l = 0,6 s_w$ i $l = s_w$, przy założeniu zdeterminowanej granicy plastyczności stali. Należy zwrócić uwagę na zalecany zakres stosowania wzorów, który powinien odwzorowywać przedział zmienności wartości zmiennych niezależnych na etapie opracowywania metody, tzn.:

- moduł ściśliwości podłoża: $E_z = 1,5$ – 7 MPa,
- pole przekroju kształtownika: $A = 0,003184$ – $0,00457$ m² (kształtowniki V25–V36),
- szerokość odrzwi w świetle kształtownika $s_w = 4,7$ – $6,1$ m (odrzwia ŁP8–ŁP12),
- wartość oczekiwana granicy plastyczności stali $m_R = 320$ – 400 MPa.

Wartości parametrów, wyznaczone po przyjęciu danych wejściowych spoza wymienionych przedziałów, mogą mieć jedynie charakter szacunkowy. Przy wyznaczaniu wartości obliczeniowych nośności odrzwi i wymaganej nośności złącz do wzorów należy wprowadzać wytrzymałość obliczeniową stali: $f_d = 260$ – 310 MPa (zalecane $f_d = 295$ MPa zgodnie z normą PN-H-93441-1: 1994).

Nośność odrzwi obudowy ŁP ze względu na wytrzymałość kształtownika obliczona za pośrednictwem metody uproszczonej została porównana z analogiczną wielkością wyznaczoną na podstawie normatywnych zasad projektowania i doboru obudowy (Chudek i in. 2000; Drzęźła i in. 1999), co przykładowo prezentuje tablica 5. Ponieważ rozpatrywany parametr oszacowany w oparciu o teorię nośności granicznej osiąga generalnie większe wartości w stosunku do określonego na podstawie wymienionych opracowań, można wysnuć wniosek, że przyjęcie założenia o wyczerpaniu nośności przekroju z chwilą wytworzenia się w nim drugiego przegubu plastycznego pozwala na

TABLICA 5

Porównanie nośności odrzwi obudowy ŁP ze względu na wytrzymałość kształtownika określonej przez zespół prof. M Chudka (Chudek i in. 2000) i zespół prof. B. Drzęźła (Drzęźła i in. 1999) oraz uzyskanej metodą uproszczoną (nośności granicznej); moduł ściśliwości podłoża $E_z = 7 \text{ MPa}$

TABLE 5

Comparison of the load capacity of steel arch sets ŁP with regard to the strength of section determined by team of Prof. M. Chudek (Chudek et al. 2000) and team of Prof. B. Drzęźła (Drzęźła et al. 1999) with one obtained with the use of the simplified method (limit load capacity); modulus of ground compressibility $E_z = 7 \text{ MPa}$

Oznaczenie odrzwi	Kształtownik									
	V25					V29				
	wartość średnia z obliczeń metodą uproszczoną q_1	zespół prof. M. Chudka q_2	zespół prof. B. Drzęźła q_3	q_1/q_2	q_1/q_3	wartość średnia z obliczeń metodą uproszczoną q_1	zespół prof. M. Chudka q_2	zespół prof. B. Drzęźła q_3	q_1/q_2	q_1/q_3
	MN/m					MN/m				
ŁP8	0,131	0,129	0,119	1,01	1,09	0,146	0,139	0,141	1,05	1,03
ŁP9	0,126	0,124	0,107	1,01	1,18	0,141	0,132	0,127	1,07	1,12
ŁP10	0,117	0,110	0,089	1,06	1,32	0,133	0,119	0,104	1,12	1,28
ŁP11	0,112	0,105	0,081	1,07	1,38	0,128	0,113	0,095	1,13	1,34
ŁP12	0,107	0,098	0,074	1,09	1,45	0,123	0,105	0,087	1,17	1,41

lepsze wykorzystanie w projektowaniu konstrukcji posiadanych przez stal własności wytrzymałościowych.

Z kolei analiza wymaganej obliczeniowej nośności złącz określonej metodą regresji liniowej pozwoliła na wyciągnięcie wniosku, że uwzględnienie w obliczeniach własności plastycznych stali uzasadnia konieczność wprowadzenia złącz o dużej nośności. Szczególnie odnosi się to do profili ciężkich V29 i V36.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono opracowaną nową, uproszczoną metodę szacowania nośności odrzwi obudowy ŁP opartą na teorii nośności granicznej (Domańska 2001), wiążącą nośność wymienionej konstrukcji ze względu na wytrzymałość kształtownika

i wymaganą nośność złącz z wybranymi czynnikami technicznymi, takimi jak: jakość podłoża, rodzaj kształtownika, wielkość odrzwi, zmienność granicy plastyczności stali i sposób przekazywania obciążenia.

Wyznaczenie współczynników regresji funkcji opisujących podstawowe parametry wytrzymałościowe odrzwi obudowy łukowej odbyło się po ich zamodelowaniu w stanie usztywnionym (tzn. bez zsuwu złącz), w warunkach działania obciążenia pionowego równomiernie rozłożonego na założonej szerokości. Ponieważ rozważając rzeczywiste warunki pracy odrzwi charakteryzujące się możliwością zsuwu łuków względem siebie należałoby je traktować jako konstrukcję podatną, nośność odrzwi rozważono nie tylko pod kątem zdolności do przejścia obciążeń zewnętrznych przez kształtownik, lecz również w aspekcie wymaganej nośności złącz. Ostatni z wymienionych parametrów oszacowano podając wartość charakterystyczną siły podłużnej powstającej na długości złącza w chwili osiągnięcia przez przekrój kształtownika stanu równowagi granicznej, wychodząc z warunku równości nośności złącz i profilu, decydującym o pełnym wykorzystaniu podporności odrzwi obudowy podatnej.

Wartości otrzymane przy zastosowaniu rozpatrywanej metody są większe w stosunku do określonych w oparciu o normatywne zasady projektowania (Chudek i in. 2000; Drzęzła i in. 1999). Prowadzi to do wniosku, że uwzględnienie przy projektowaniu konstrukcji własności plastycznych materiału pozwala na jego oszczędność.

Pozostałymi cechami opracowanej metody są:

- możliwość szybkiego i łatwego oszacowania nośności odrzwi obudowy ŁP w zakresie najczęściej występującej w praktyce zmienności czynników na nią wpływających,
- łatwość jej adaptowania w odniesieniu do odrzwi o innej geometrii, wykonanych z innego profilu lub pracujących w innych warunkach.

LITERATURA

- Baklašov I.V., Timofeev O.V. 1979: Konstrukcii i rasčet krepkej i obdelok. Nedra, Moskva.
- Biegus A. 1999: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. PWN. Warszawa-Wrocław.
- Bieniawski Z.T., 1984: Rock mechanics design in mining and tunneling. A.A. Balkema, Rotterdam-Boston.
- Brady B.H.G., Brown E.T., 1994: Rock mechanics for underground mining. Chapman & Hall, London-Glasgow-Weinheim-New York-Tokyo-Melbourne-Madras.
- Bulyčev N.S., 1989: Mechanika podziemnych sooruzenij v primerach i zadačach. Nedra, Moskva.
- Chudek M., 1964: Niektóre problemy kształtowania i obliczania podatnej obudowy metalowej wyrobisk korytarzowych. Przegląd Górniczy nr 3.
- Chudek M., 1968: Obudowa wyrobisk, cz. 2. Obudowa kamienna, metalowa i mieszana. Wyd. Śląsk, Katowice.
- Chudek M., Duży S., Kleta H., i in., 2000: Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska w Gliwicach, Gliwice-Kraków-Katowice.
- Domąńska D., 2001: Wyznaczenie nośności stalowej obudowy łukowej z kształtownika V w oparciu o teorię nośności granicznej, z uwzględnieniem losowej zmienności parametrów wytrzymałościowych stali. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górniczy, Kraków.

- Drzęźła B., Mendera Z., i in., 1999: Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Politechnika Śląska, Instytut Eksploatacji Złóż, Gliwice.
- Dżaparidze L.A., 1975: Rasčet metalličeskoj krepki gornych vyrabotok. Nedra, Moskva.
- Geleskul M.N., Karetnikov V.N., 1982: Spravočnik po krepniju kapital'nych i podgotovitel'nych gornych vyrabotok. Nedra, Moskva.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1995: Support of underground excavations in hard rock. A.A. Balkema, Rotterdam-Brookfield.
- Jacobi O., 1981: Praxis der Gebirgsbeherrschung. Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- Janas M., 1967: Nośność graniczna łuków i sklepień. Biblioteka Inżynierii i Budownictwa, Warszawa.
- Karetnikov V.N., Klejmenov V.B., Brednev V.A., 1984: Avtomatizirovannyj rasčet i konstruirovanie metalličeskich krepki podgotovitel'nych vyrabotok. Nedra, Moskva.
- Karetnikov V.N., Klejmenov V.B., Nuždichin A.G., 1989: Kreplenie kapital'nych i podgotovitel'nych gornych vyrabotok. Spravočnik. Nedra, Moskva.
- Košelev K.V., Petrenko Ju.A., Novikov A.O., 1990: Ochrana i remont gornych vyrabotok. Nedra, Moskva.
- Mańczak K., 1976: Technika planowania eksperymentu. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Mateja J., 1982: Studium nad ustaleniem nośności odrzwi stalowych obudowy łukowej w wyrobiskach udostępniających nie narażonych na bezpośredni wpływ ciśnień eksploatacyjnych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG Budokop, Mysłowice.
- Mateja J., Wypchol N., 1979: Rola wykładki w obudowie łukowej. [W:] Sympozjum Naukowe nt.: Metody zabezpieczenia korytarzowych wyrobisk górniczych. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Mendera Z., 1969: Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej nr 7, Kraków.
- Mendera Z., 1984: Współczynnik jednorodności stali a metoda stanów granicznych. [W:] XIV Konferencja Naukowo-Techniczna: Konstrukcje metalowe, Gdańsk.
- Paczeński K., 1996: Wpływ wybranych czynników mechanicznych i geometrycznych na nośność odrzwi obudowy łukowej. Praca doktorska, GIG, Katowice.
- PN-B-03001 1976: Konstrukcje i podłoża budowli — Ogólne zasady obliczeń.
- PN-B-03200 1990: Konstrukcje stalowe — Obliczenia statyczne i projektowanie
- PN-G-15000/02 1993: Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształowników korytkowych — Odrzwia łukowe podatne LP z kształowników typu V, typoszereg A — Wymiary.
- PN-G-15000/05 1992: Obudowa chodników odrzwiami podatnymi z kształowników korytkowych — Odrzwia łukowe otwarte — Badania stanowiskowe.
- PN-H-93441-1 1994: Kształowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa — Ogólne wymagania i badania.
- Rułka K., Mateja J., i in., 2001: Uprozczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Rułka K., Wypchol N., Mateja J., Gruszka R., 1983: Zasady projektowania, obliczania i doboru obudów dla długotrwałych wyrobisk korytarzowych i komorowych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG Budokop, Mysłowice.
- Sawczuk A., 1964: Nośność graniczna ram płaskich. Biblioteka Inżynierii i Budownictwa, Warszawa.
- Sawczuk A., 1982: Wprowadzenie do mechaniki konstrukcji plastycznych. PWN, Warszawa.
- Singh B., Goel R.K., 1999: Rock mass classification. A practical approach in civil engineering. Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo.
- Spruth F., 1959: Streckenansbau in Stahl. Ein Handbuch für die Praxis. Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- Szuścik W., 1962: Stan graniczny profilów stalowej obudowy górnicznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska w Gliwicach, Wyd. Mechaniczny, 16.IV.1962 (praca niepubl.).
- Whittaker B.N., Frith R.C., 1990: Tunnelling. Design, stability and construction. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Zaslavskij Ju.Z., Mostkov V.M., 1979: Kreplenie podzemnych vyrabotok. Nedra, Moskva.
- Zieliński R., 1972: Tablice statystyczne. PWN, Warszawa.

REVIEW BY: PROF. DR HAB. INŻ. ANDRZEJ WICHUR, KRAKÓW

Received: 17 July 2002