

*Stanisław Duży**

ELEMENTY TEORII NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA KONSTRUKCJI W PROJEKTOWANIU BUDOWLI PODZIEMNYCH

1. Wprowadzenie

Projektowanie i dobór obudowy wyrobisk górniczych oparte są z reguły na bilansowaniu obciążenia obudowy ze strony górotworu i jej nośności. Podstawowym zatem zadaniem projektanta jest jak najdokładniejsze określenie tych dwóch parametrów.

Dobór obudowy wykonywany jest w przy wykorzystaniu szeregu danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem bez uwzględniania np. zmienności budowy i własności wytrzymałościowych i odkształceniowych górotworu w obrębie określonej bryły górotworu. Do wykonania obudowy stosuje się elementy wykonane z określoną dokładnością, a jakość wykonania obudowy również jest niejednorodna. Stan ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe. W tym celu należy określić losowe charakterystyki nośności elementów lub systemu konstrukcyjnego oraz rozkłady losowych obciążeń, które pozwolą wyznaczyć losowe siły wewnętrzne w obudowie. Oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk górniczych możliwe jest jedynie przy wykorzystaniu teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji.

2. Podstawowe elementy teorii niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji

W najczęściej stosowanych w projektowaniu modelach wyróżnia się trzy podstawowe pojęcia [11]:

- 1) jakość — prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) lub jej elementy (podsystemy) w chwili odbioru nie ma wad;

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni, Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice

- 2) niezawodność — prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie awarii w przyjętym czasie jej eksploatacji (przy założeniu, że w chwili odbioru nie ma wad);
- 3) bezpieczeństwo — prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie zniszczeniu w okresie jej realizacji i eksploatacji.

Niezawodność konstrukcji związana jest z pojęciem awarii. Awaria jest pojęciem związanym z przekroczeniem przez zmienne określające zachowanie się konstrukcji pewnej *a priori* zadanej granicy. Może to być niepożądane ze względu na stan samej konstrukcji oraz z uwagi na szkodliwe oddziaływanie na ludzi czy też związane z rozpatrywaną konstrukcją inne urządzenia [11]. W odniesieniu do wyrobisk górniczych przez awarię rozumie się stan wystąpienia nadmiernego zaciskania wyrobiska prowadzącego m.in. do trudności w zachowaniu wymaganych parametrów wentylacyjnych, wymaganych przepisami odległości ruchowych itp.

Bezpieczne użytkowanie wyrobiska zależy również od jakości jego wykonania, z tym że jakość wykonania ocenia się w chwili oddania odcinka wyrobiska do użytku. Tak więc pojęcia jakość, bezpieczeństwo i niezawodność, mimo że dotyczą różnych okresów istnienia budowli, są ze sobą ściśle związane i powinny być rozpatrywane wspólnie.

3. Analiza jakości konstrukcji budowli

Istotnym parametrem wpływającym na warunki współpracy obudowy z górotworem jest jakość wykonania wyrobiska. W celu oszacowania jakości wykonania wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego przeprowadzono badania, którymi objęto 10 przodków drażonych wyrobisk korytarzowych o gabarytach odpowiadających przekrojom obudowy ŁP-9 i ŁP-10. Przodki te zlokalizowane były w pokładach węgla, a skały urabiano za pomocą kombajnu chodnikowego. Przeprowadzono pomiary gabarytów wyłomu wyrobiska, gabarytów wyrobiska w świetle obudowy, długości zakładki łuków w zamkach, momentu dokręcenia śrub w strzemionach oraz przeprowadzono ocenę poprawności zabudowy odrzwi, rozpór i okładzin z siatki stalowej.

Na podstawie uogólnienia wyników badań uzyskano następujące wartości statystyczne gabarytów wyłomu wyrobiska:

— dla obudowy ŁP-9:

- $S_W^{\text{sr}} = 5,466 \text{ m}$;
- $s_{S_W} = 0,207 \text{ m}$;
- $W_W^{\text{sr}} = 3,719 \text{ m}$;
- $s_{W_W} = 0,177 \text{ m}$;

— dla obudowy ŁP-10:

- $S_W^{\text{sr}} = 5,708 \text{ m}$;
- $s_{S_W} = 0,102 \text{ m}$;

- $W_W^{sr} = 3,854$ m;
- $s_{W_W} = 0,204$ m.

W tabeli 1 zestawiono uogólnione wyniki pomiarów niektórych parametrów geometrycznych obudowy w analizowanych przodkach drążonych wyrobisk korytarzowych.

TABELA 1

Zestawienie wartości średnich i odchyłeń standardowych wyników pomiarów niektórych parametrów geometrycznych obudowy

Rozmiar odrzwi	Szerokość [m]		Wysokość [m]		Długość zakładki [m]	
	$S_{W^{sr}}$	$s_{S_{W}}$	W_W^{sr}	$s_{S_{W}}$	z_{sr}	s_z
ŁP-9	4,966	0,122	3,450	0,131	0,639	0,123
ŁP-10	5,328	0,097	3,680	0,121	0,634	0,021

Jak wynika z przedstawionych powyżej danych, wartości rzeczywiste — stwierdzone w przodkach drążonych wyrobisk — niewiele odbiegają od wielkości katalogowych. Dotyczy to głównie gabarytów wyrobiska. Znacznie większe różnice wykazują pomiary momentu dokręcenia śrub w strzemionach zamków obudowy oraz jakość zabudowy akcesoriów obudowy.

Ze względu na znaczne różnice w projektach dotyczących momentu dokręcenia śrub w strzemionach jako miernik jakości przyjęto współczynnik zmienności, który dla badanej populacji wyniósł 0,32, przy czym zauważyć trzeba, że w większości przypadków stwierdzone momenty dokręcenia śrub w strzemionach były niższe od projektowanych.

Pomiary odległości i liniowości zabudowy rozpór wykazały, że tylko sporadycznie obserwowano braki pojedynczych rozpór, a ich położenie na obwodzie wyrobiska również w 90% było prawidłowe. W odniesieniu do zabudowy siatek stwierdza się, że tylko w 50% siatki były założone poprawnie. Głównym błędem w zabudowie siatek było odgięcie zaczepów i brak powiązania z odrzwiami. W 100% odrzwia obudowy posadowione były na stopach.

4. Niezawodność konstrukcji budowli podziemnych

Miarą bezpieczeństwa konstrukcji w rozwiązaniach deterministycznych jest współczynnik bezpieczeństwa wyrażany w postaci [1]

$$n = \frac{P_0}{q_0} > 1,0 \quad (1)$$

gdzie:

- P_0 — nośność obudowy,
- q_0 — obciążenie obudowy.

W metodzie probabilistycznej poziomu 2 niezawodność konstrukcji, opierająca się na idei „najsłabszego ogniwa”, pozwala przyjąć za wartości progowe kwantyle nośności P_0 i obciążenia q_0 w postaci:

$$\begin{aligned} P_0 &= \bar{P}_0 - t_p \cdot s_{P_0} \\ q_0 &= \bar{q}_0 + t_q \cdot s_{q_0} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- \bar{q}_0 — średnia wartość obciążenia obudowy analizowanego wyrobiska,
- \bar{P}_0 — średnia wartość nośności obudowy,
- s_{q_0} — odchylenie standardowe obciążenia obudowy,
- s_{P_0} — odchylenie standardowe nośności obudowy,
- t_q, t_p — współczynniki zależne od wymaganego poziomu prawdopodobieństwa obciążenia i nośności obudowy.

Jako miarę bezpieczeństwa przyjmuje się współczynnik niezawodności Cornella t

$$t = \frac{\bar{P}_0 - \bar{q}_0}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}} \quad (3)$$

Wartość dystrybuanty współczynnika niezawodności $p(t)$ oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość $[1 - p(t)]$ oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji [1, 11].

W praktyce projektowej w ramach tego poziomu można posługiwać się tzw. konwencjonalnym współczynnikiem bezpieczeństwa pozwalającym na określenie wymaganej nośności konstrukcji budowli w stosunku do jej obciążenia z akceptowanym poziomem prawdopodobieństwa przy jednoczesnym uwzględnieniu losowego charakteru danych wejściowych przyjętych do projektowania. Współczynnik ten wyraża się wzorem [11]

$$n_K = \frac{\bar{P}_0 - t_p \cdot s_{P_0}}{\bar{q}_0 + t_q \cdot s_{q_0}} \quad (4)$$

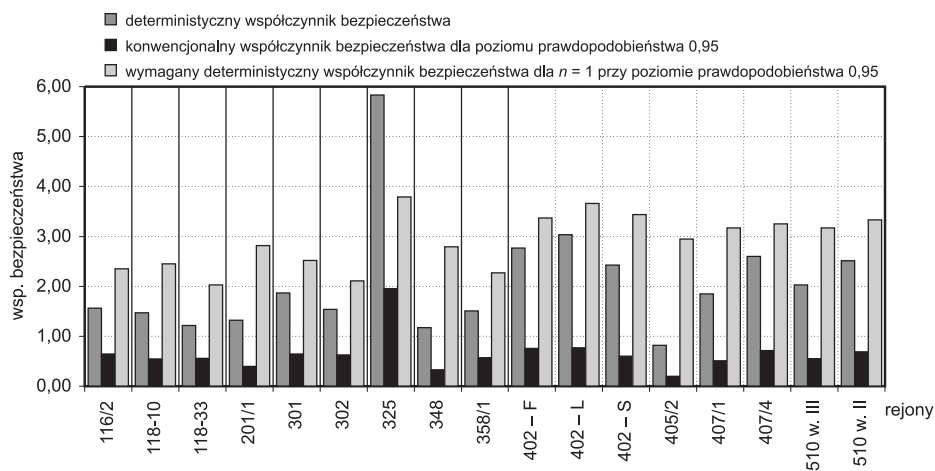
Badania stopnia bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych przeprowadzono dla 178 wyrobisk zlokalizowanych w przyjętych do analizy 17 rejonach kopalń węgla kamiennego GZW. Badane wyrobiska zlokalizowane były na głębokościach 120÷950 m i wykonane były w obudowie stalowej odrzwiowej podatnej o rozmiarach od ŁP-7 do ŁP-10. Górotwór w rejonie analizowanych odcinków wyrobisk nie był zaburzony tektonicznie, nie występowały wpływy eksploatacji górniczej, a średnia wytrzymałość na ściskanie skał wynosiła 12÷40 MPa.

Stopień bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych określono za pomocą następujących metod:

- metodą deterministyczną — określono współczynnik bezpieczeństwa dla średnich wartości obciążenia i nośności obudowy,
- metodą probabilistyczną poziomu 2 — określono prawdopodobieństwo spełnienia warunku nośności granicznej (współczynnik bezpieczeństwa $n > 1$) oraz określono konwencjonalny współczynnik bezpieczeństwa dla poziomu prawdopodobieństwa wynoszącego 0,95,
- metodą probabilistyczną poziomu 2 — określono wymaganą wartość współczynnika bezpieczeństwa obliczanego w oparciu o wartości średnie obciążenia i nośności obudowy przy przyjęciu poziomu prawdopodobieństwa wynoszącego 0,95.

Obciążenie obudowy jako zmienną losową określono w oparciu o sposób przedstawiony w pracy [6], natomiast wielkość losową nośności obudowy według pracy [7].

Przedstawione na rysunku 1 wyniki przeprowadzonej analizy wskazują na fakt „oszczędnego” doboru obudowy. W świetle przeprowadzonej analizy 70,5% wyrobisk spełnia kryterium zalecanej wartości współczynnika bezpieczeństwa wynoszącej powyżej 1,5, w przypadku 23,5% analizowanych wyrobisk współczynnik bezpieczeństwa osiągnął wartości z przedziału 1,0÷1,5, a w 6% przypadków nie był spełniony podstawowy warunek metody stanu granicznego, gdyż współczynnik bezpieczeństwa osiągnął wartości poniżej 1,0.



Rys. 1. Kształtowanie się średniego współczynnika bezpieczeństwa dla analizowanych rejonów

Przeprowadzone obliczenia konwencjonalnego współczynnika bezpieczeństwa uwzględniającego losowy charakter obciążenia i nośności obudowy dla akceptowanego poziomu

wystąpienia awarii 0,05 wykazały, że aż w 94% analizowanych wyrobisk współczynnik bezpieczeństwa osiągał wartości poniżej 1,0. Aby w analizowanych przypadkach współczynnik bezpieczeństwa na poziomie prawdopodobieństwa wynoszącego 0,95 wynosił co najmniej 1,0, obliczone współczynniki metodą deterministyczną należałoby zwiększyć w zależności od wyrobiska o 20÷260%.

5. Bezpieczeństwo konstrukcji budowli podziemnych

Ryzyko jest funkcją prawdopodobieństwa wystąpienia określonych niebezpiecznych zdarzeń i wynikających z nich konsekwencji [10]. Często ryzyko określa się w sposób ilościowy z zależności

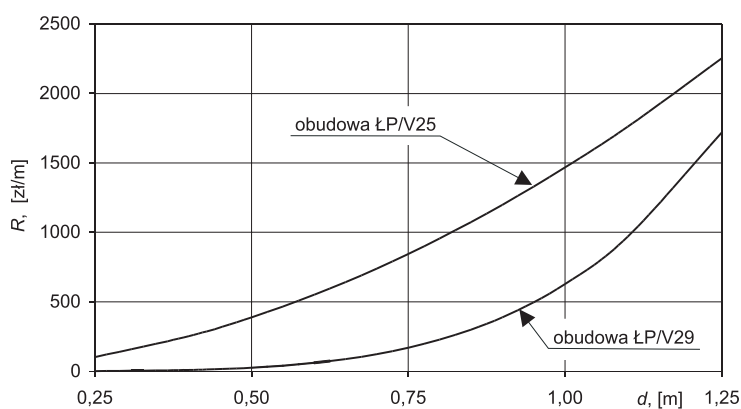
$$R = p \cdot k \quad (5)$$

gdzie:

- R — ryzyko,
- p — prawdopodobieństwo wystąpienia awarii,
- k — konsekwencje wynikające z zagrożeń.

Takie przedstawienie ryzyka [10] pozwala na ocenę i porównanie poziomów ryzyka wynikających z różnych zagrożeń. Ocena ryzyka jest to proces szacowania wielkości ryzyka i określanie warunków, kiedy ryzyko może być tolerowane lub akceptowane.

Na rysunku 2 przedstawiono przykład kształtowania się ryzyka dla wyrobiska korytarzowego drążonego w obudowie ŁP w zależności od wielkości kształtownika oraz odległości pomiędzy odrzwiami.



Rys. 2. Przykład kształtowania się ryzyka dla wyrobiska korytarzowego drążonego w obudowie ŁP

W świetle przedstawionych założeń, funkcja ryzyka w procesie doboru obudowy dla danego wyrobiska może stanowić kryterium optymalizacji. Za optymalne rozwiązanie konstrukcji obudowy w określonych warunkach można uważać to, dla którego ryzyko osiągnie wartość najmniejszą. Ogólnie uproszczoną postać funkcji celu można zapisać w postaci

$$R = p \cdot [k_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + k_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + k_3(x_1, x_2, \dots, x_n)] \rightarrow \min \quad (6)$$

gdzie:

- $k_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — koszt wykonania wyrobiska w zależności od wielkości przekroju poprzecznego, rodzaju obudowy, wielkości kształtownika, konstrukcji poszczególnych elementów obudowy, odległości pomiędzy odrzwiami itp.);
- $k_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — koszt użytkowania wyrobiska w zależności od wielkości przekroju poprzecznego, rodzaju obudowy, wielkości kształtownika, konstrukcji poszczególnych elementów obudowy, odległości pomiędzy odrzwiami itp.);
- $k_3(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — koszty związane z przebudowami i naprawami wyrobiska w zależności od wielkości przekroju poprzecznego, rodzaju obudowy, wielkości kształtownika, konstrukcji poszczególnych elementów obudowy, odległości pomiędzy odrzwiami itp.).

6. Podsumowanie

Budowle podziemne projektowane są w oparciu o szereg danych określanych z pewnym przybliżeniem. Wykonywane są w ośrodku niejednorodnym, co dodatkowo utrudnia proces opisu zjawisk zachodzących w ich otoczeniu. W takiej sytuacji obiektywne oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk górniczych możliwe jest jedynie przy założeniu probabilistycznego modelu analizy jej niezawodności.

W celu oceny niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji budowli podziemnej należy znać losowe charakterystyki nośności elementów lub systemu konstrukcyjnego oraz rozkłady losowych obciążeń, które pozwolą wyznaczyć losowe siły wewnętrzne. Wielkości te można uzyskać w oparciu o analizę statystyczną wyników badań laboratoryjnych i *in situ*.

Przeprowadzona w ramach pracy analiza niezawodności i bezpieczeństwa wyrobisk korytarzowych wykazała, że zastosowana w nich obudowa charakteryzowała się zmiennym prawdopodobieństwem wystąpienia awarii. Szacowane prawdopodobieństwo awarii osiąga wartości od paru do kilkudziesięciu procent. Zmienność ta nie zależy tylko od „oszczędnego” doboru obudowy, ale w znacznej mierze od zmienności warunków naturalnych i górniczych.

W celu obniżenia prawdopodobieństwa awarii konstrukcji wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego wskazane jest stosowanie w procesie projektowania współczynników bezpieczeństwa zależnych od zmienności warunków naturalnych i górniczych oraz jakości wykonania wyrobiska.

LITERATURA

- [1] *Biegus A.*: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. Warszawa – Wrocław, PWN 1999
- [2] *Chudek M.*: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu. Gliwice, Wyd. Politechniki Śląskiej 2002
- [3] *Chudek M.*: Obudowa wyrobisk górniczych. Cz. I. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Wyd. „Śląsk” 1986
- [4] *Chudek M., Duży S., Kleta H., Kleczek Z., Stoiński K., Zorychta A.*: Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Gliwice – Kraków – Katowice, Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej 2000
- [5] *Duży S.*: Własności wytrzymałościowe skał a badania dla potrzeb doboru obudowy wyrobisk. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 8(96), 2002, 13–17
- [6] *Duży S.*: Oddziaływanie górotworu na obudowę wyrobisk korytarzowych w ujęciu probabilistycznym. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, nr 3, 2003, 1–8
- [7] *Duży S.*: Probabilistyczna analiza podporności stalowej obudowy odrzwiowej podatnej wyrobiska korytarzowego. Wiadomości Górnicze, nr 1, 2004, 17–22
- [8] *Duży S.*: Probabilistyczna analiza stateczności budowli podziemnych. Przegląd Górniczy, nr 4, 2004, 33–38
- [9] *Duży S.*: Projektowanie budowli podziemnych w świetle teorii niezawodności. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 261, 2004, 149–158
- [10] *Sobala J., Rosmus P.*: System zarządzania bezpieczeństwem pracy w zakładach górniczych. Katowice, Wyd. GIG 1996
- [11] *Szymczak Cz.*: Elementy teorii projektowania. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1998