ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P. 3351/07

Stanisław DUŻY

STUDIUM NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI OBUDOWY I STATECZNOŚCI WYROBISK KORYTARZOWYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM NIEPEWNOŚCI INFORMACJI

GLIWICE 2007

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1750

P. 3351/07

Stanisław DUŻY

STUDIUM NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI OBUDOWY I STATECZNOŚCI WYROBISK KORYTARZOWYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM NIEPEWNOŚCI INFORMACJI

GLIWICE 2007

Opiniodawcy
Prof. zw. dr hab. inż. Andrzej WICHUR
Prof. dr hab. inż. Kazimierz RUŁKA

Kolegium redakcyjne
REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ
REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Piotr STRZAŁKOWSKI
Prof. nzw. w Politechnice Śląskiej
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta LEŚKO

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

© Copyright by
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
Gliwice 2007

P.56 07

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE ... 7
2. STATECZNOŚĆ WYROBISK KORYTARZOWYCH W ŚWIETLE DOTYCHCZASOWYCH POGLĄDÓW ... 8
2.1. Pojęcie stateczności wyrobiska ... 8
2.2. Przyczyny utraty stateczności wyrobisk korytarzowych ... 9
2.3. Czynniki decydujące o warunkach utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych ... 11
2.4. Metody oceny stateczności wyrobisk korytarzowych ... 14
2.5. Wpływ zmienności poszczególnych czynników na stateczność wyrobisk korytarzowych ... 21
3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY ... 24
4. ELEMENTY TEORII BEZPIECZEŃSTWA I NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI WYROBISK KORYTARZOWYCH W ASPEKCIE UTRZYMANIA ICH STATECZNOŚCI ... 28
4.1. Jakość wykonania wyrobiska ... 30
4.2. Niezawodność konstrukcji ... 32
4.3. Bezpieczeństwo konstrukcji ... 37
5. OCENA NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA KONSTRUKCJI WYROBISK KORYTARZOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WARUNKÓW NIEPEWNOŚCI INFORMACJI ... 39
5.1. Źródła niepewności informacji ... 39
5.2. Metody rozwiązań zadań niezawodności konstrukcji budowli podziemnych ... 40
5.3. Probabilistyczne ujęcie parametrów współpracy obudowy z górotworem ... 42
5.3.1. Probabilistyczne ujęcie obciążenia obudowy jako efektu przekroczenia warunku granicznej równowagi górotworu ... 42
5.3.2. Probabilistyczne ujęcie obciążenia obudowy oparte na równaniach ośrodka złożonego ... 45
5.3.3. Probabilistyczne ujęcie nośności obudowy ... 47
5.3.4. Modelowanie numeryczne metodą elementów skończonych współpracy obudowy z górotworem, z uwzględnieniem losowego charakteru danych wejściowych ... 54
5.4. Analityczno – empiryczna metoda szacowania niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych, uwzględniająca warunki niepewności informacji ... 58
5.4.1. Podstawowe założenia metody ... 60
5.4.2. Algorytm określenia losowego charakteru parametrów współpracy układu obudowa – górotwór i jego rozwiązanie ... 61
5.4.3. Miary niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk ... 69
6. BADANIA JAKOŚCI WYKONANIA WYROBISKA KORYTARZOWEGO W STALOWEJ OBUDOWIE ODRZWIOWEJ PODATNEJ JAKO ŹRÓDŁA IMPERFEKCJI OBCIĄŻENIA I NOŚNOŚCI OBUDOWY ... 70
6.1. Charakterystyka badań ... 70
6.2. Jakość wykonania wyłomu wyrobiska ... 75
6.3. Jakość wykonania obudowy ... 82
6.3.1. Elementy konstrukcyjne obudowy ... 83
6.3.2. Odrzwia obudowy ... 96
6.3.3. Akcesoria obudowy ... 105

6.4. Statystyczny obraz wykonanego wyrobiska korytarzowego 110
6.5. Nośność obudowy w świetle przeprowadzonych badań 113
7. LOSOWA PRZESTRZENNA ZMIENNOŚĆ BUDOWY I WŁASNOŚCI MASYWU SKALNEGO JAKO IMPERFEKCJA WARUNKÓW WSPÓŁPRACY OBUDOWY Z GÓROTWOREM 117
7.1. Charakterystyczny profil geologiczny masywu w otoczeniu projektowanego wyrobiska 117
7.2. Własności wytrzymałościowe i odkształceniowe skał występujących w profilu 118
7.3. Wartości własności wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu dla przyjętego profilu charakterystycznego 124
7.4. Wartości własności wytrzymałościowych i odkształceniowych skał w rejonie projektowanego wyrobiska 126
7.5. Badania zmienności własności wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu skalnego dla wybranych rejonów GZW 130
8. ANALIZA I OCENA NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA KONSTRUKCJI WYROBISK KORYTARZOWYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO W GÓRNOŚLĄSKIM ZAGŁĘBIU WĘGLOWYM 138
8.1. Charakterystyka przyjętych do badań wyrobisk przygotowawczych 138
8.2. Założenia przyjęte do analizy niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych 140
8.3. Losowy charakter obciążenia obudowy wyrobisk korytarzowych 141
8.4. Losowy charakter nośności obudowy analizowanych wyrobisk korytarzowych 145
8.5. Szacowanie niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobiska korytarzowego metodą probabilistyczną poziomu I 148
8.6. Szacowanie niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobiska korytarzowego metodą probabilistyczną poziomu II 150
8.7. Szacowanie niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobiska korytarzowego metodą probabilistyczną poziomu III 153
9. ZACHOWANIE SIĘ WYROBISK KORYTARZOWYCH W ŚWIETLE BADAŃ DOŁOWYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO 155
9.1. Charakterystyka przeprowadzonych badań 155
9.2. Badania zachowania się obudowy wyrobisk przygotowawczych w kopalniach węgla kamiennego i ich analiza 156
9.3. Zachowanie się wyrobisk przygotowawczych a prognoza prawdopodobieństwa utraty stateczności 165
10. KLASYFIKACJA WARUNKÓW UTRZYMANIA STATECZNOŚCI WYROBISK KORYTARZOWYCH 169
10.1. Podstawy ustalenia klas warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych 169
10.2. Weryfikacja klasyfikacji warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych 171
10.3. Współczynniki korekcyjne dla poprawy warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych 173
11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE 176
LITERATURA 183
ZAŁĄCZNIK 1 194
STRESZCZENIA: polskie 216
angielskie 219

CONTENTS

1. INTRODUCTION 7
2. STABILITY OF HEADINGS IN PRESENT OPINIONS 8
2.1. Heading stability conception 8
2.2. Reasons for heading stability loss 9
2.3. Factors deciding the maintenance conditions of heading stability 11
2.4. Heading stability evaluation methods 14
2.5. The influence of certain factor changeability on heading stability 21
3. THESIS, RANGE AND OBJECTIVES OF THE STUDY 24
4. ELEMENTS OF HEADING CONSTRUCTION RELIABILITY AND SAFETY THEORY IN THE ASPECT OF STABILITY MAINTAINING 28
4.1. Heading making quality 30
4.2. Construction reliability 32
4.3. Construction safety 37
5. EVALUATION OF HEADING CONSTRUCTION SAFETY AND RELIABILITY INCLUDING THE INFORMATION UNCERTAINITY CONDITIONS 39
5.1. Information uncertainty sources 39
5.2. Methods of underground buildings construction reliability task solving 40
5.3. Probabilistic frame of support co-operation parameters with rock strata 42
5.3.1. Probabilistic frame of support load as an effect of boundary condition exceeding of rock strata stability 42
5.3.2. Probabilistic frame of support load based on the complex medium equations 45
5.3.3. Probabilistic frame of support load capacity 47
5.3.4. Numerical modelling of support co-operation with rock strata including the random character of the input data using the finished elements method 54
5.4. Analytical-empirical method of heading construction reliability and safety evaluation including the information uncertainty conditions 58
5.4.1. Basic assumptions of the method 60
5.4.2. Algorithm of defining the rock strata - support co-operation parameter randomness and its solution 61
5.4.3. Heading construction reliability and safety measures 69
6. RESEARCH OF HEADING IN STEEL YIELDING ARCH SUPPORT MAKING QUALITY AS A SOURCE OF SUPPORT LOAD AND LOAD CAPACITY IMPERFECTION 70
6.1. Research characteristic 70
6.2. Heading breach making quality 75
6.3. Support making quality 82
6.3.1. Support construction elements 83
6.3.2. Timber set 96
6.3.3. Support accessories 105
6.4. Statistic view of a made heading 110
6.5. Support load capacity in the conducted research 113
7. RANDOM SPATIAL CHANGEABILITY BUILDING AND ROCK MASSIVE PROPERTIES AS CONDITION IMPERFECTION OF SUPPORT COOPERATION WITH ROCK STRATA 117
7.1. Massive geological characteristic profile in the surroundings of the designed heading 117

7.2. Rock strength and deviation properties that occur in the profile 118
7.3. Values of massive strength and deviation properties for the adopted characteristic profile 124
7.4. Values of massive strength and deviation properties in the surroundings of the designed heading 126
7.5. Changeability research of rock massive strength and deviation properties for certain regions of GZW 130
8. ANALYSIS AND EVALUATION OF HEADING CONSTRUCTION RELIABILITY AND SAFETY IN THE COLLIERIES IN THE UPPER SILESIAN MINING DISTRICT 138
8.1. Characteristics of preparatory headings adopted for research 138
8.2. Assumptions adopted to analyse heading construction reliability and safety 140
8.3. The random character of heading support load 141
8.4. The random character of support load capacity of the analysed headings 145
8.5. Evaluation of heading construction reliability and safety with the level I probabilistic method 148
8.6. Evaluation of heading construction reliability and safety with the level II probabilistic method 150
8.7. Evaluation of heading construction reliability and safety with the level III probabilistic method 153
9. BEHAVIOUR OF HEADINGS IN UNDERGROUND RESEARCH IN COLLIERIES 155
9.1. Executed research characteristic 155
9.2. Research of preparatory heading behaviour in collieries and their analysis 156
9.3. Behaviour of preparatory headings and stability loss probability prognosis 165
10. CLASSIFICATION OF HEADING STABILITY MAINTENANCE CONDITIONS 169
10.1. Basics of heading stability maintenance conditions class establishment 169
10.2. Verification of heading stability maintenance conditions classification 171
10.3. Correction coefficients for stability maintenance condition improvement 173
11. SUMMARY AND CONCLUSIONS 176
REFERENCES 183
ATTACHMENT No 1 194
ABSTRACT: Polish 216
English 219

1. WPROWADZENIE

Prowadzenie eksploatacji górniczej powoduje konieczność wykonania wielu wyrobisk korytarzowych udostępniających i przygotowawczych. Wyrobiska te zwykle wykonuje się z odpowiednim wyprzedzeniem i utrzymuje do zakończenia wybierania złoża w danym polu eksploatacyjnym lub na poziomie. W trakcie użytkowania wyrobisk nierzadko obserwuje się występowanie nadmiernych deformacji obudowy i ich zaciskania powodujących trudności w realizacji procesów technologicznych oraz wzrost zagrożenia dla pracujących tam ludzi. Dlatego zapewnienie stateczności wyrobisk górniczych wyrażającej się poprzez zachowanie w określonym czasie wymaganych gabarytów wyrobiska oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracujących w nim ludzi, maszyn i urządzeń jest podstawowym zadaniem ich projektowania i realizacji.

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

W praktyce projektowej do opracowania prognozy oddziaływania górotworu na obudowę wyrobisk górniczych powszechnie stosowane są metody deterministyczne, zakładające, że analizowane wyrobisko zlokalizowane jest w ośrodku o tej samej budowie i własnościach na całym przyjętym odcinku wyrobiska. Jako reprezentatywne wartości poszczególnych parametrów niezbędnych do obliczeń prognostycznych przyjmuje się ich wartości średnie.

Nośność obudowy określana jest najczęściej na podstawie badań laboratoryjnych lub metody stanów granicznych nośności i użytkowania konstrukcji. Do obliczeń przyjmuje się wiele danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem, do wykonania obudowy stosuje się elementy wykonane z określoną dokładnością, a jakość wykonania obudowy również jest niejednorodna.

W celu uwzględnienia ewentualnych zmian w budowie ośrodka lub jego własnościach oraz zmian nośności obudowy przyjmuje się współczynniki bezpieczeństwa, które pozwalają na projektowanie obudowy z pewnym zapasem. Stosowane w projektowaniu budowli podziemnych współczynniki nie uwzględniają zmienności poszczególnych parametrów, charakteryzujących własności górotworu i obudowy.

2. STATECZNOŚĆ WYROBISK KORYTARZOWYCH W ŚWIETLE DOTYCHCZASOWYCH POGLĄDÓW

2.1. Pojęcie stateczności wyrobiska

Przez stateczność rozumie się stan utrzymywania się w równowadze stałej, np. niewywracanie się maszyny lub konstrukcji budowlanej, nieobsuwanie się stoku itp. [92].

W budownictwie podziemnym pojęcie stateczności definiowane jest w odniesieniu do masywu skalnego, wyrobisk górniczych lub do konstrukcji obudowy.

Stateczność masywu skalnego w głównej mierze dotyczy zagadnień utrzymania wyrobisk górniczych oraz skarp. Przez pojęcie stateczności skały rozumie się zdolność wytwarzania statecznych (trwałych) odkrytych powierzchni przy drążeniu i użytkowaniu wyrobiska [8]. W przypadku górotworu otaczającego wyrobiska górnicze przez stateczność skał rozumie się taki stan, w którym procesy zachodzące w układzie „obudowa – górotwór" mają przebieg kontrolowany i prognozowany w czasie. [37] W masywie skalnym naruszonym przez wykonanie wyrobiska górniczego rozróżnia się [40]:

- stateczność trwałą,
- stateczność chwiejną,
- niestateczność całkowitą.

Statecznością trwałą odznaczają się skały lite i częściowo spoiste, które wskutek wykonania wyrobiska w długim okresie ulegają niewielkim deformacjom, w skałach tych nie został przekroczony stan graniczny i nie wymagają one żadnego wzmocnienia. Niestateczność całkowita jest stanem, w którym natychmiastowe, znaczne deformacje górotworu nie dopuszczają do wykonania wyrobiska, natomiast stateczność chwiejna jest to stan pośredni, w którym skały nie ulegają zniszczeniu w określonym przedziale czasu lub przy określonej wielkości odsłoniętej powierzchni górotworu.

W przypadku skarp przez stateczność rozumie się stan gruntu, w którym nie występuje niebezpieczeństwo odłamu, tzn. powstania, wskutek przekroczenia wartości oporu gruntu na ścinanie przez naprężenia ścinające w skarpie, powierzchni poślizgu i przemieszczenia masy gruntowej [12,110].

Stateczność wyrobisk górniczych wg [37] jest to ich zdolność do pozostawania w określonym czasie w stanie pełnej przydatności – zdolności do użyteczności technologicznej z jednoczesnym zapewnieniem całkowitej ochrony środowiska górniczego. Warunek stateczności jest spełniony wówczas, gdy obciążenia przenoszone przez układ „obudowa – górotwór" są mniejsze od obciążenia dopuszczalnego, a przemieszczenia konturu wyrobiska

od przemieszczeń akceptowalnych. Według [104] przez pojęcie stateczności wyrobiska określa się zdolność wyrobisk górniczych do zachowania kształtu i położenia wbrew działającym siłom, dążącym do zmiany istniejącego stanu. W świetle tej definicji wyrobisko zachowuje stateczność, gdy w określonym czasie dozna odkształceń mniejszych niż wartości graniczne, dopuszczalne ze względów ekonomicznych lub bezpieczeństwa. Według [40] stateczność wyrobiska wyraża się zachowaniem, w ustalonym czasie, potrzebnych wymiarów jego przekroju poprzecznego oraz zabezpieczenie ludzi, sprzętu i maszyn przed obrywającymi się z ociosów i stropu odłamkami skalnymi lub przed zawałami. Rozróżnia się następujące formy utraty stateczności wyrobiska: [37]

- zawał – nagła, nieplanowana utrata stateczności obrysu wyrobiska, której towarzyszy naruszenie lub zniszczenie pierwotnej struktury części górotworu otaczającego wyrobisko oraz utrata stateczności obudowy,
- zaciskanie wyrobiska – wszechstronne przemieszczanie się skał w kierunku wybranej przestrzeni, powodując zmniejszenie gabarytów przekroju poprzecznego wyrobiska,
- osuwiska – tworzenie się, wskutek rozwoju w otaczającym górotworze strefy o obniżonej wytrzymałości, powierzchni poślizgu oraz wystąpienie szybkiego i znacznego przemieszczenia się masywu.

Stateczność konstrukcji obudowy jest to zdolność do zachowania niezmiennego położenia i kształtu pod działaniem obciążenia [112]. Obudowa wg [40] jest stateczna, jeśli nie ulega dowolnym przesunięciom w całości lub w częściach pod wpływem wywieranego nań nacisku górotworu, który by groził jej całkowitym zniszczeniem. Stateczność konstrukcji obudowy oceniana jest na podstawie metody stanów granicznych nośności [29].

Obliczenia wg metody stanu granicznego nośności mają na celu zapewnienie odpowiedniego stopnia niezawodności konstrukcji. Aby to osiągnąć, obliczenia należy wykonać zgodnie z obraną metodą projektowania [141]. W odniesieniu do obudowy wyrobisk górniczych obliczenia najczęściej polegają na sprawdzeniu, czy analizowana konstrukcja zbudowana jest z elementów o wystarczającej wytrzymałości oraz jest zdolna przenieść prognozowane przemieszczenia wymuszone konturu wyrobiska i obudowy.

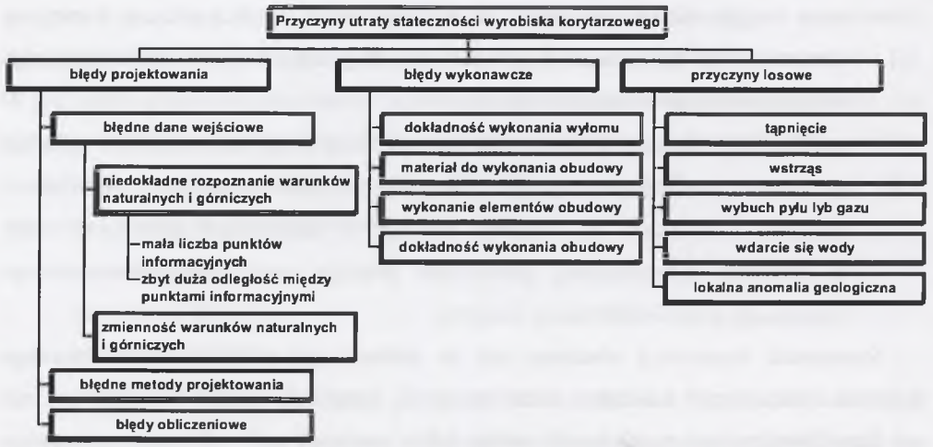
2.2. Przyczyny utraty stateczności wyrobisk korytarzowych

Podstawowym celem projektowania i wykonania wyrobiska jest zapewnienie jego stateczności. Obserwuje się jednak w praktyce sporo przypadków utraty stateczności wyrobiska, które występować mogą pod wieloma postaciami. Utrata stateczności wyrobiska

może być spowodowana wieloma przyczynami i okolicznościami sprzyjającymi jednocześnie w określonym czasie i miejscu.

Aby skutecznie przeciwdziałać zagrożeniu utraty stateczności wyrobiska, istotna jest znajomość przyczyn występowania tego zjawiska.

Na rys. 2.1 przedstawiono, opracowany przy wykorzystaniu m.in. prac [121,162], podział przyczyn występowania utraty stateczności wyrobiska. Ogólnie, przyczyny te podzielono na trzy grupy, a mianowicie wynikające z błędów projektowania, wykonania wyrobiska i jego obudowy oraz z trudnych do przewidzenia zdarzeń losowych.



Rys. 2.1. Przyczyny utraty stateczności wyrobisk korytarzowych
Fig. 2.1. The reasons of heading stability loss

Błędy popełnione w procesie projektowania wynikają z trzech podstawowych przyczyn, a mianowicie mogą być spowodowane przez przyjęcie błędnych danych wejściowych, wykorzystanie w procesie projektowania niewłaściwie dobranych metod projektowania lub prostymi błędami projektanta. W odniesieniu do budownictwa podziemnego jednym z podstawowych zadań jest przyjęcie danych do obliczeń. Niedokładność danych wynikać może z niedokładności rozpoznania warunków naturalnych, wynikających ze zbyt małej liczby lub zbyt dużej odległości pomiędzy punktami informacyjnymi, ale równie często może być spowodowana zmiennością warunków wzdłuż wyrobiska. Obiekty podziemne wykonywane są w masywie skalnym, który nie jest ośrodkiem jednorodnym i zmienność jego budowy oraz własności jest rzeczą naturalną.

Błędy wykonawcze konstrukcji wyrobiska są zwykle sumą zmienności warunków, w jakich wykonywane są wyrobiska oraz niedokładności wykonania elementów obudowy. Zmienność warunków drążenia wyrobiska powoduje, że gabaryty wyłomu wyrobiska wzdłuż jego wybiegu są zróżnicowane, co rzutuje na jakość wykonania i warunki współpracy obudowy z górotworem.

Jakość zabezpieczenia wyrobiska nie zależy jednak tylko od jakości robót górniczych prowadzonych w przodku drążonego wyrobiska. Istotna jest również jakość elementów obudowy stosowanych do zabezpieczenia wyrobiska, na którą składają się własności wytrzymałościowe i odkształceniowe materiału, dokładność wykonania kształtownika oraz dokładność wykonania elementów obudowy.

Analizując przypadki utraty stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych, jedną z najczęściej wymienianych przyczyn są sytuacje losowe, wynikające z wystąpienia trudnego do przewidzenia zjawiska naturalnego, takiego jak: tąpnięcie, wstrząs górotworu, lokalne zniszczenie struktury skalnej obniżające w znaczącym stopniu spodziewane wartości własności wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu, zawodnienie skał itp.

2.3. Czynniki decydujące o warunkach utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych

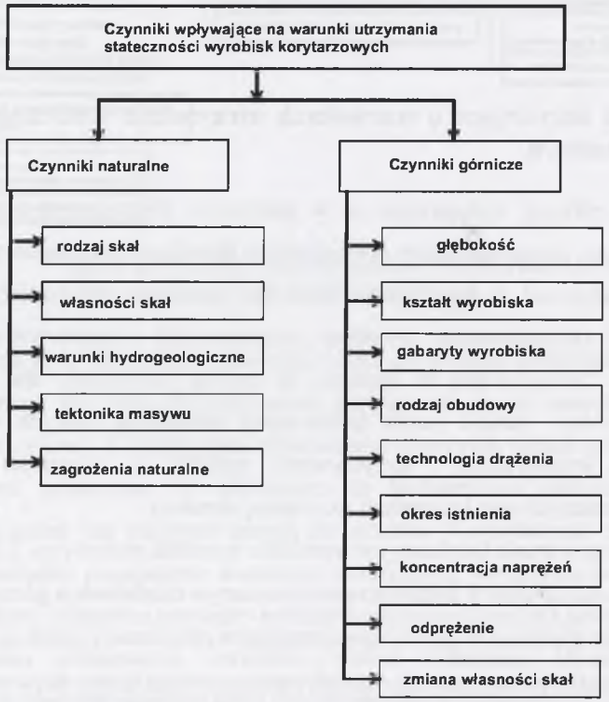
Wyrobiska górnicze wykonywane są w górotworze zbudowanym z niejednorodnego materiału skalnego, często poddanego oddziaływaniu dodatkowych czynników, wynikających z działalności górniczej w jego rejonie. Stan taki powoduje, że zjawiska towarzyszące wykonywaniu i utrzymywaniu wyrobisk korytarzowych charakteryzują się znaczną różnorodnością. Zróżnicowanie to sprawia, że modele teoretyczne dla poszczególnych warunków są różne. Istnieje zatem konieczność stosowania różnych modeli zjawisk towarzyszących wykonywaniu i utrzymywaniu wyrobisk w zależności od warunków naturalnych i górniczych oraz konstrukcji stosowanej obudowy.

Ze względu na warunki lokalizacyjne wyrobiska wyróżnić można (rys. 2.2):

- wyrobisko zlokalizowane w górotworze nienaruszonym działalnością górniczą,
- wyrobisko zlokalizowane w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą,
- wyrobisko zlokalizowane w strefie oddziaływania czynnego frontu eksploatacyjnego.

W przypadku górotworu nienaruszonego działalnością górniczą na charakter zjawisk zachodzących w górotworze wpływ mają czynniki naturalne i górnicze (rys. 2.3) [37,59,61].

Rys. 2.2. Lokalizacja wyrobisk korytarzowych ze względu na warunki górnicze [58]
Fig. 2.2. The location of headings according to mining conditions [58]



Rys. 2.3. Czynniki wpływające na warunki utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych [59,61]
Fig. 2.3. The factors influencing conditions of heading stability upkeep [59,61]

Do głównych czynników naturalnych zalicza się: rodzaj skał budujących masyw, własności wytrzymałościowe i mechaniczne skał, warunki hydrogeologiczne, tektonikę masywu, zagrożenia naturalne. Natomiast do głównych czynników górniczych zalicza się: głębokość lokalizacji wyrobiska, gabaryty wyrobiska, rodzaj zastosowanej obudowy, technologię drążenia wyrobiska oraz okres jego istnienia.

Przypadek pierwszy, polegający na lokalizacji wyrobiska w górotworze naruszonym działalnością górniczą, można podzielić na dwie grupy, a mianowicie: grupa pierwsza obejmować będzie warunki, w którym górotwór w rejonie projektowanego wyrobiska nie został naruszony wpływem eksploatacji górniczej, a tylko wykonanymi wcześniej wyrobiskami korytarzowymi oraz grupa druga, w której wyrobisko lokalizowane jest w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą.

W przypadku lokalizacji wyrobiska w górotworze naruszonym działalnością górniczą w postaci wcześniejszego wykonania innych wyrobisk korytarzowych lub komorowych, obok wymienionych wcześniej warunków naturalnych i górniczych, na przebieg zjawisk zachodzących w górotworze wpływ może mieć koncentracja naprężeń od wzajemnego oddziaływania wyrobisk na siebie.

W przypadku lokalizacji wyrobiska w górotworze naruszonym działalnością górniczą rozróżnić należy przypadek, w którym wyrobisko zlokalizowane jest w górotworze naruszonym działalnością górniczą oraz przypadek, w którym w rejonie istniejącego wyrobiska korytarzowego wykonywane są roboty górnicze.

W przypadku lokalizacji wyrobiska w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą można wyróżnić następujące przypadki: górotwór podebrany, górotwór nadebrany, lokalizację wyrobiska w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów oraz lokalizację wyrobiska w strefie koncentracji naprężeń w wyniku oddziaływania krawędzi dokonanej eksploatacji górniczej. W warunkach górotworu naruszonego eksploatacją górniczą, obok czynników wymienionych wcześniej dla lokalizacji wyrobiska w górotworze nienaruszonym, na przebieg zjawisk zachodzących w otaczającym masywie wpływ będą mieć zmiany wielkości i rozkładu naprężeń (w górotworze wystąpią strefy koncentracji naprężeń i strefy odprężone) oraz własności wytrzymałościowych skał.

W przypadku prowadzenia eksploatacji w rejonie istniejącego wyrobiska korytarzowego można wyróżnić przypadki zbliżania się i zatrzymania krawędzi eksploatacji w niewielkiej odległości od wyrobiska, podbieranie wyrobiska, nadbieranie wyrobiska lub prowadzenie eksploatacji w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska (np. chodniki przyścianowe). W tym przypadku wyrobisko poddane jest oddziaływaniu wszystkich czynników wymienionych

powyżej. Nadmienić należy, że w przypadku oddziaływania czynnego frontu eksploatacyjnego w rejonie wyrobiska występuje wiele zjawisk dynamicznych zwielokratniających wpływ eksploatacji na wyrobisko.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej złożoność zagadnienia wpływu warunków naturalnych i górniczych na charakter i przebieg zjawisk zachodzących w górotworze w wyniku wykonywania i utrzymywania wyrobisk korytarzowych, konieczne wydaje się wprowadzenie zróżnicowanych metod doboru i projektowania obudowy dla poszczególnych przypadków charakteryzujących warunki geologiczno – górnicze.

2.4. Metody oceny stateczności wyrobisk korytarzowych

Zapewnienie stateczności wyrobiska korytarzowego jest podstawowym zadaniem w procesie jego projektowania. W praktyce projektowej stosuje się różne metody zależne od charakteru problemu oraz stosowanych narzędzi i procedur. Przyjmując stosowane w procesie projektowania narzędzia i procedury, można wyróżnić następujące grupy metod oceny stateczności wyrobisk korytarzowych [163]:

- metody heurystyczne – polegające na określeniu charakteru rozpatrywanego problemu i wykorzystaniu odpowiedniej analogii (np. metody traktujące górotwór jako ośrodek sprężysty, sprężysto – plastyczny, sprężysto – plastyczno – spękany itp.),
- metody systematyczne – opierające się na szczegółowej analizie problemu i występujących w nim zależności oraz systematycznym przeglądzie możliwych wariantów rozwiązań (metody zalecane w normach i wytycznych oparte na różnych modelach fizycznych dobieranych na podstawie analizy warunków geologiczno – górniczych),
- metody systemowe – opierające się na podstawowych zasadach teorii systemów (metody traktujące układ obudowa – górotwór jako elementy – podsystemy wzajemnie ze sobą współdziałające i wpływające na procesy zachodzące w poszczególnych elementach – podsystemach układu),
- metody katalogowe – wykorzystujące w projektowaniu gotowe zestawy rozwiązań cząstkowych (projekty typowe, uproszczone metody oparte na doświadczeniu),
- metody symulacyjne – wykorzystujące głównie metody CAD/CAM, pozwalające na uzyskanie projektu wybranego spośród wielu możliwych wariantów rozwiązania projektowego (algorytmy oparte na metodach numerycznych).

Wspólną cechą wymienionych powyżej metod oceny stateczności wyrobisk korytarzowych jest sformułowanie problemu interakcji w układzie obudowa – górotwór i jego rozwiązanie.

Niezależnie od stosowanej metody zagadnienie oceny stateczności wyrobisk korytarzowych w efekcie końcowym sprowadza się do bilansowania wartości opisujących oddziaływanie górotworu na obudowę wyrobiska (obciążenie, przemieszczenia konturu wyrobiska) z wartościami charakteryzującymi obudowę górniczą (nośność, podatność).

Wielkość oddziaływania górotworu na obudowę wyrobiska określa się za pomocą metod analitycznych lub numerycznych, przyjmując jako dane m.in. własności masywu skalnego, stan naprężenia w górotworze oraz gabaryty projektowanego wyrobiska. Sformułowane dotychczas hipotezy i teorie, dotyczące zachowania się masywu skalnego w otoczeniu wyrobiska korytarzowego umożliwiające obliczenie obciążenia jego obudowy, można podzielić na następujące grupy [1,37,40,90,111]:

- wzory empiryczne,
- metody oparte na warunku granicznej równowagi górotworu,
- metody oparte na równaniach ośrodka sypkiego,
- metody oparte na równaniach ośrodka sprężystego,
- metody oparte na równaniach ośrodka złożonego.

Metody empiryczne oparte są na obserwacjach prowadzonych w drążonych wyrobiskach górniczych, których wyniki stały się podstawą do ustalenia równań empirycznych, uzależniających wielkość obciążenia obudowy od parametrów geologiczno – górniczych, takich jak np.: okres istnienia wyrobiska, jego gabaryty, ciężar objętościowy skał, głębokość lokalizacji itp. Do najbardziej znanych prac kwalifikowanych do omawianej grupy zaliczyć można między innymi prace Bendela, Terzaghiego, A. Bilińskiego i innych.

Metody oparte na warunku granicznej równowagi górotworu są najliczniej reprezentowane w literaturze. Metodami tymi opisywać można w zasadzie dowolny masyw skalny, zakładając przy tym graniczny stan równowagi różnych fragmentów górotworu otaczającego wyrobisko. Do najbardziej znanych metod opartych na warunku granicznej równowagi górotworu można zaliczyć m.in. prace Protodiakonowa, Terzaghiego, Ruppenejta, Kommerela, Rittera, Engessera, Suqueta, Slesariewa, Szechyego, Cymbariewicza, Sałustowicza, Chudka – Śwista, Bierbaumera, Gergowicza, Gałczyńskiego. Metody tej grupy przyjmują różne modele deformacji górotworu w wyniku wykonania wyrobiska, a mianowicie:

- grupa I – metody opierające się na teorii sklepienia ciśnień,
- grupa II – metody przyjmujące założenie, że w procesie deformacji udział biorą skały nadległe od stropu wyrobiska do powierzchni terenu.

Prace należące do grupy I oparte są na założeniach, że w wyniku wykonania wyrobiska nad nim tworzy się sklepienie ciśnień, w obrębie którego masyw skalny ulega rozluźnieniu i przemieszczeniu w stronę wybranej przestrzeni. Różnice pomiędzy poszczególnymi autorami polegają na przyjęciu kształtu tworzącego się nad wyrobiskiem sklepienia ciśnień (paraboliczne, eliptyczne, łukowe) oraz zasięgu w otoczeniu wyrobiska (strop, strop i ociosy, strop, spąg i ociosy). W przypadku rozwiązywania zagadnień związanych z wyrobiskami zalegającymi na małej głębokości częściej stosowane są metody zaliczane do grupy II, oparte na założeniu, że w wyniku wykonania wyrobiska w procesie deformacji bierze udział bryła górotworu, zalegająca bezpośrednio nad tym wyrobiskiem i sięgająca aż do powierzchni terenu. Różnice pomiędzy poszczególnymi metodami tej grupy polegają jedynie na określeniu zasięgu deformacji nad wyrobiskiem.

Metody oparte na równaniach ośrodka sypkiego traktują górotwór jako ośrodek dyskretny. Do najbardziej znanych prac z tej grupy należą między innymi prace Kandaurowa, traktujące masyw skalny jako ośrodek sypki rozporowy lub bezrozporowy. Proces deformacji górotworu otaczającego wyrobisko, w myśl przyjętych tu założeń, przebiega w sposób losowy, a jego przebieg opisują metody stochastyczne.

Metody oparte na równaniach teorii sprężystości traktują górotwór jako ośrodek sprężysty. Do tej grupy zalicza się między innymi prace Kirscha, Fennera, Dinnika, Schmidta i Delarue. Przyjęcie modelu ośrodka sprężystego powoduje, że możliwe jest określenie spójnego uzależnienia naprężeń i odkształceń od własności ośrodka oraz kształtu i wielkości przekroju wyrobiska. Z założeń teorii sprężystości wynika, że odkształcenia ośrodka są w zakresie sprężystości. Wychodząc z założenia, że górotwór zachowuje się jak ośrodek sprężysty, uwzględniając jednocześnie zmienność w czasie procesów naprężeniowo – deformacyjnych, metody oparte na teorii sprężystości rozszerzono o podstawowe równania ośrodka reologicznego. Większość dotychczasowych rozwiązań wykorzystuje modele reologiczne Maxwella, Zennera, Poyntinga–Thompsona itp. Do najbardziej znanych rozwiązań w zakresie modeli reologicznych górotworu zalicza się prace Sałustowicza, Filcka, Kisiela, Dimowa itd. Stosowane modele reologiczne opisują procesy naprężeniowo – deformacyjne w otoczeniu wyrobiska albo równaniami stanu, zastępując ciało modelem mechanicznym, albo poprzez wprowadzenie do równań stanu zmienności odkształcalności górotworu w czasie.

Metody oparte na równaniach ośrodka złożonego przyjmują, że w fazie początkowej górotwór zachowuje się jak ośrodek sprężysty. Po wykonaniu wyrobiska w bezpośrednim jego otoczeniu przekroczony zostaje stan graniczny i tworzą się strefy niesprężyste

o określonym zasięgu. Do tej grupy zalicza się między innymi prace Sałustowicza, Talbore'a, Ruppenejta, Labasse'a itp. W dotychczasowych rozwiązaniach najczęściej stosowane były modele ośrodków: sprężysto – spękanego, sprężysto – plastycznego i sprężysto – plastyczno – spękanego.

W modelu sprężysto – spękanym (model sprężysty ze strefą spękań) zakłada się, że wyrobisko wykonywane jest w ośrodku sprężystym, jednak w wyniku koncentracji naprężeń spowodowanej jego wykonaniem w otaczającym masywie występuje stan graniczny i zniszczenie skał. W wyniku tego w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska tworzy się strefa spękań (zniszczenia). Zniszczenie skał występuje tylko do pewnej odległości od obrysu wyrobiska, poza którą górotwór nadal zachowuje swe własności sprężyste.

W modelu sprężysto – plastycznym zakłada się, że wyrobisko wykonywane jest w ośrodku sprężystym, jednak w wyniku wykonania wyrobiska występuje koncentracja naprężeń, powodująca wystąpienie stanu granicznego i przejście skał w fazę plastycznego płynięcia. W bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska tworzy się strefa plastyczna, w obrębie której skały są w stanie pozagranicznym i mają zmniejszoną wytrzymałość. Przekroczenie stanu granicznego występuje tylko do pewnej odległości od obrysu wyrobiska, poza którą górotwór nadal zachowuje swe własności sprężyste.

W modelu sprężysto – plastyczno – spękanym zakłada się, że wyrobisko wykonywane jest w ośrodku sprężystym, jednak w wyniku wykonania wyrobiska występuje koncentracja naprężeń, powodująca wystąpienie stanu granicznego i zniszczenia skał. W wyniku tego, w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska tworzy się strefa spękań, w obrębie której skały są zniszczone i nie mają żadnej wytrzymałości. Zniszczenie skał występuje tylko do pewnej odległości od obrysu wyrobiska, poza którą górotwór znajduje się w stanie pozagranicznym, jednak nie została zniszczona struktura skał i mają one pewną wytrzymałość. Naprężenia powodujące wystąpienie stanu granicznego maleją wraz z oddalaniem się od obrysu wyrobiska i w pewnej odległości od niego górotwór przechodzi w stan sprężysty.

W praktyce projektowej stosowana jest powszechnie analityczna metoda obliczania obciążenia obudowy polegająca na określaniu w rejonie projektowanego wyrobiska stref odkształceń niesprężystych [29, 37, 40, 138, 139]. Metoda ta zakłada, że:

a) W przypadku zalegania wyrobiska na głębokości mniejszej od głębokości krytycznej masyw skalny zachowuje się jak ośrodek sprężysty, a obciążenie obudowy związane jest z ciężarem skał zawartych w zasięgu strefy odprężonej obliczanym wg hipotezy sklepienia ciśnień, np. wg Protodiakonowa.

b) W przypadku zalegania wyrobiska na głębokości większej od głębokości krytycznej oraz w zależności od przemieszczeń konturu wyrobiska mogą wystąpić dwa przypadki:
   - przypadek I – w otoczeniu wyrobiska powstaje strefa plastyczna, która w pewnej odległości od wyrobiska zanika. Obciążenie obudowy w tym przypadku jest związane z ciężarem skał zawartych w obrębie strefy plastycznej;
   - przypadek II – w otoczeniu wyrobiska powstaje strefa spękań, w obrębie której skały uległy zniszczeniu. W pewnej odległości od obrysu wyrobiska strefa ta zanika i powstaje strefa plastyczna, w której skały znajdują się w stanie przekroczenia stanu granicznego, ale zachowują jeszcze częściowo swoje własności wytrzymałościowe. Obciążenie obudowy w tym przypadku jest związane z ciężarem skał zawartych w obrębie strefy spękań.

Metody modelowania numerycznego wykorzystują podstawy teoretyczne metody elementów skończonych, metody elementów brzegowych, metody różnic skończonych, metody elementów oddzielnych itp. Wykorzystując odpowiednie algorytmy, modeluje się określoną bryłę górotworu oraz konstrukcję obudowy. Modele mogą być modelami płaskimi lub przestrzennymi. Poszczególnym elementom przypisuje się własności wytrzymałościowe i odkształceniowe modelowanego materiału oraz przyjmuje się warunki brzegowe odwzorowujące interakcje w układzie obudowa – górotwór. Obliczenia modelu obejmują stan sprężysty oraz stany niesprężyste definiowane poprzez przyjęcie równania stanu granicznego. Najczęściej stosowanymi równaniami stanu granicznego są równanie Coulomba – Mohra i Hoeka – Browna. Metody numeryczne pozwalają na obliczanie sił wewnętrznych, naprężeń i przemieszczeń układu obudowa – górotwór, dzięki czemu można odpowiedzieć na pytanie, czy przyjęta konstrukcja obudowy zapewnia stateczność wyrobiska.

Innym podstawowym parametrem decydującym o stateczności budowli podziemnych jest **nośność obudowy** rozumiana jako wielkość maksymalnego obciążenia, jakie może przenieść obudowa bez osiągnięcia stanu granicznego. Nośność obudowy lub jej poszczególnych elementów konstrukcyjnych określa się na podstawie metody stanów granicznych.

Jakość całej konstrukcji lub jej części z punktu widzenia nośności powinna być wyrażona w odniesieniu do zbioru stanów granicznych, które oddzielają stany konstrukcji pożądane od niepożądanych [141]. Rozróżnia się:
- stany graniczne nośności – odpowiadają maksymalnej nośności lub w pewnych przypadkach maksymalnemu dopuszczalnemu odkształceniu lub przemieszczeniu,
- stany graniczne użytkowalności – dotyczą normalnego użytkowania konstrukcji.

Do stanów granicznych nośności zalicza się:
- utratę równowagi części lub całości konstrukcji traktowanych jako ciało sztywne,
- osiągnięcie maksymalnej nośności w przekrojach, elementach lub połączeniach przez zerwanie lub nadmierne odkształcenie,
- przekształcenie się konstrukcji w mechanizm,
- osiągnięcie stanu niestateczności konstrukcji lub jej części,
- nagłą zmianę przyjętego ustroju nośnego w nowy ustrój.

Sprawdzenie stanów granicznych nośności wg [137] polega na wykazaniu, że w każdym miarodajnym przekroju (elemencie) konstrukcji, dla każdej kombinacji oddziaływań obliczeniowych spełniony jest warunek:

$$S_d \leq R_d \tag{2.1}$$

gdzie:

S_d – wartość obliczeniowa efektu oddziaływania (uogólnionej siły wewnętrznej),

R_d – wartość obliczeniowa nośności konstrukcji (elementu konstrukcji).

Do stanów granicznych użytkowalności zalicza się [141]:
- niedopuszczalne odkształcenia konstrukcji lub podłoża,
- lokalne uszkodzenia konstrukcji,
- nadmierne drgania konstrukcji.

Nośność obudowy w praktyce określana jest najczęściej przy wykorzystaniu jednej z dwóch metod, a mianowicie:
- **Metoda I** – polega na określaniu nośności obudowy na podstawie badań laboratoryjnych,
- **Metoda II** – oparta na analizie rozkładu i wielkości sił wewnętrznych w obudowie polega na określaniu nośności obudowy na podstawie metody stanów granicznych.

Wymienione powyżej metody polegają na określaniu nośności konstrukcji przy uwzględnieniu dwóch kryteriów, a mianowicie kryterium wytrzymałości kształtownika oraz kryterium nośności zamków obudowy.

Określenie nośności odrzwiowej obudowy podatnej na podstawie badań stanowiskowych (metoda I) polega na badaniu odrzwi usztywnionych w złączach oraz odrzwi podatnych [134]. Badania odrzwi usztywnionych w złączach pozwalają na określenie nośności odrzwi ze względu na wytrzymałość kształtownika, a badania odrzwi podatnych pozwalają na określenie nośności ze względu na kryterium nośności zamka obudowy (nośność zsuwna). Badania odrzwi w stanie usztywnionym polegają na rejestracji deformacji plastycznych odrzwi pod wpływem ich obciążenia. Nośność odrzwi ze względu na wytrzymałość

kształtownika jest to suma maksymalnych wartości sił czynnych zarejestrowanych w czasie badania. Badania stanowiskowe odrzwi ze względu na nośność zamków prowadzone są w podobny sposób, jednak rejestracji podlegają wielkości zsuwu w zamkach oraz sił obciążających odrzwia bezpośrednio przed zsuwem.

Metoda druga polega na obliczeniu sił wewnętrznych i naprężeń w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi obudowy oraz obliczeniu siły osiowej w zamkach odrzwi pod wpływem działającego obciążenia obudowy o określonym rozkładzie i wielkości. Wykorzystując tak sformułowane założenia, nośność obudowy stalowej podatnej określić można przez przekształcenie wzorów podanych m.in. w pracach [22,29,45,47,114,115,117, 151,152]. Dla przypadku mimośrodowego ściskania kształtownika uwzględniającego wyboczenie i wzmocnienie stali wzór przyjmuje postać:

$$P_0 = \min\begin{cases} \dfrac{10^3 \cdot f_d (m+n_1)}{d \cdot \left[\dfrac{M_{max}}{W_x} + \dfrac{N_0}{\varphi \cdot A}\right]} \cdot 1m \\ \dfrac{N_Z}{d \cdot N} \cdot 1m \end{cases} \quad \text{[kPa].} \qquad (2.2)$$

Po uwzględnieniu, zgodnie z normą PN–90/B–03200 [132], zwichrzenia oraz uplastycznienia przekroju kształtownika wzór na nośność obudowy może przyjąć postać:

$$P_0 = \min\begin{cases} \dfrac{10^3 \cdot f_d (m+n_1)}{d \cdot \left[\dfrac{M_{max}}{\alpha_{pl} \cdot \varphi_L \cdot W_x} + \dfrac{N_0}{\varphi \cdot A}\right]} \cdot 1m \\ \dfrac{N_Z}{d \cdot N} \cdot 1m \end{cases} \quad \text{[kPa],} \qquad (2.3)$$

gdzie:

M_{max} – wartość ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla obciążenia wynoszącego 1 kPa, [kN·m/kPa],

N_0 – wartość siły osiowej w miejscu ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla obciążenia wynoszącego 1 kPa, [kN/kPa],

W_x – wartość wskaźnika zginania przekroju kształtownika odrzwi obudowy, [m^3],

φ – wartość współczynnika wyboczenia zależna od wielkości kształtownika i rozmiaru odrzwi wg PN-80/B-03200,

α_{pl} – współczynnik rezerwy plastycznej wg PN–90/B–03200,

φ_L – współczynnik zwichrzenia wg PN–90/B–03200,

m – współczynnik Schaefera zależny od rodzaju przekroju kształtownika,

n_1 – współczynnik materiałowy wg Schaefera,

A – wartość przekroju poprzecznego kształtownika odrzwi obudowy, [m^2],

N_Z – wartość nośności zsuwnej odrzwi obudowy ŁP, [kN],

N – wartość siły osiowej w miejscu zamka odrzwi obudowy ŁP dla obciążenia wynoszącego 1 kPa, [kN/kPa],

f_d – wartość obliczeniowa wytrzymałości na rozciąganie stali, [MPa],

d – odległość między odrzwiami obudowy ŁP, [m].

2.5. Wpływ zmienności poszczególnych czynników na stateczność wyrobisk korytarzowych

Na stateczność wyrobisk korytarzowych wpływa obciążenie obudowy i jej nośność. Jako miernik stateczności konstrukcji obudowy przyjmuje się współczynnik bezpieczeństwa wyrażany jako stosunek nośności obliczeniowej konstrukcji do jej obciążenia obliczeniowego. Konstrukcja obudowy wyrobiska osiąga stan graniczny, jeśli współczynnik bezpieczeństwa przyjmuje wartość nie większą od 1 [121,138,141].

Zmienność poszczególnych danych, wpływających na obciążenie obudowy i jej nośność, przyjmowanych do oceny stateczności wyrobiska powoduje występowanie niebezpieczeństwa błędnego oszacowania stanu bezpieczeństwa wyrobiska. Na rys. 2.4 przedstawiono kształtowanie się wpływu zmienności poszczególnych danych wejściowych do projektowania wyrobiska na wartość współczynnika bezpieczeństwa [81]. Na wykresie tym wartość ujemna oznacza zaniżenie wartości, natomiast wartość dodatnia – zawyżenie analizowanej wartości.

Oznaczenia przyjęte na rys. 2.4.:

x – analizowany parametr,

Δx – różnica między przyjętą do obliczeń i rzeczywistą wartością analizowanego parametru x,

k – współczynnik bezpieczeństwa,

Δk – różnica między wartością współczynnika bezpieczeństwa określoną dla wartości x przyjętej do obliczeń i wartością współczynnika bezpieczeństwa obliczoną dla wartości rzeczywistej,

γ – ciężar objętościowy skał,

H – głębokość lokalizacji wyrobiska,

R_c – wytrzymałość na ściskanie skał w masywie,

S_w – szerokość wyrobiska,

E – moduł sprężystości podłużnej skał,

r – wskaźnik rozmakalności wg GIG, [101],

f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali na rozciąganie i ściskanie wg PN-90/B-03200,

M_{max} – ekstremalny moment zginający występujący na obwodzie odrzwi obudowy,

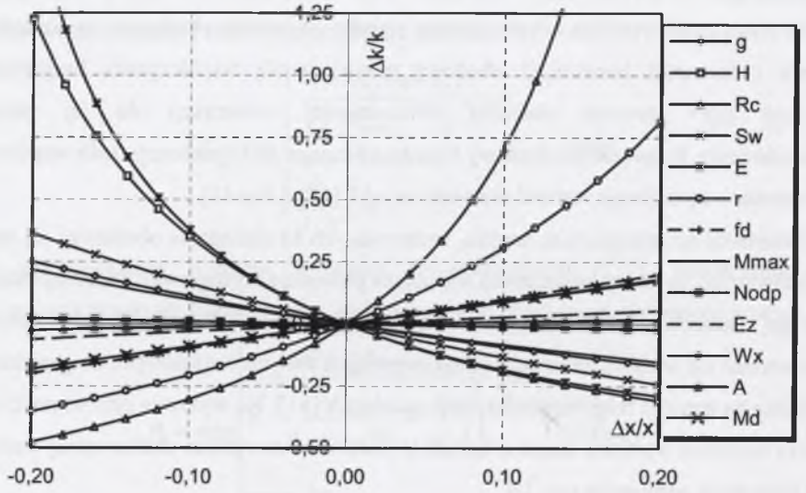
N_{odp} – siła osiowa w miejscu występowania ekstremalnego momentu zginającego,

E_z – moduł ściśliwości wykładki kamiennej określany wg [29,40,117,152],

W_x – wskaźnik zginania kształtownika odrzwi obudowy,

A – pole przekroju poprzecznego kształtownika,

M_d – moment dokręcenia śrub w zamkach obudowy odrzwiowej.



Rys. 2.4. Przykład wpływu poszczególnych czynników na stateczność wyrobiska korytarzowego [81]
Fig. 2.4. Example of influence of certain factors on heading stability [81]

Z przeprowadzonej analizy wynika, że największy wpływ na zmienność współczynnika bezpieczeństwa mają takie dane, jak: głębokość zalegania wyrobiska, wytrzymałość na ściskanie skał w masywie, moduł sprężystości skał oraz wskaźnik rozmakalności. Wymienione czynniki wpływają na wielkość obciążenia obudowy. Przeszacowanie wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika rozmakalności skał oraz niedoszacowanie modułu sprężystości i głębokości powodować może powstanie stanu niebezpiecznego w wyrobisku. Spośród analizowanych czynników najmniejszy wpływ na zmienność współczynnika bezpieczeństwa ma zmienność przekroju poprzecznego kształtownika oraz siły osiowej w miejscu występowania ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy.

Stosunkowo niewielki wpływ na zmienność współczynnika bezpieczeństwa ma zmienność w analizowanym zakresie (± 20%) modułu ściśliwości wykładki kamiennej.

Znaczące wartości zmienności współczynnika bezpieczeństwa wskutek niedokładności oznaczenia poszczególnych danych wejściowych do projektowania obudowy wskazują na konieczność możliwie jak najdokładniejszego określenia ich dla potrzeb oceny stateczności.

Zauważyć należy fakt, że analizowane czynniki związane są z warunkami naturalnymi (np. własności wytrzymałościowe i odkształceniowe skał), które określane są w praktyce z pewnym przybliżeniem, oraz z jakością wykonania wyrobiska i jego obudowy, którą w praktyce traktuje się jako czynnik realizowany w sposób doskonały, bez niedokładności. Ewentualne nieścisłości w przyjmowanych danych równoważy się przyjmując w końcowym etapie projektowania współczynniki bezpieczeństwa.

3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Projektowanie budowli podziemnych opiera się na wielu danych określanych na podstawie badań prowadzonych w różnych miejscach – nie zawsze w wystarczająco bliskiej odległości od projektowanego wyrobiska – przy wykorzystaniu różnych technik i metod badawczych. Dodatkowo należy podkreślić, że budowle podziemne wykonywane są w ośrodku niejednorodnym, co dodatkowo utrudnia proces opisu zjawisk, zachodzących w otoczeniu wyrobiska, za pomocą ośrodka jednorodnego.

Drążenie wyrobisk górniczych jest procesem złożonym pod względem technologicznym, co powoduje, że efekt końcowy tego procesu ma charakter niejednorodny i w różnym stopniu odbiegający od wartości projektowych. Z drugiej strony, jakość wykonania wyrobiska decyduje o niezawodności i bezpieczeństwie konstrukcji budowli. Istnieje zatem potrzeba jak najdokładniejszej prognozy wpływu czynników naturalnych i technologicznych na jakość wykonania wyrobiska oraz jej uwzględnienia w opracowaniu projektu.

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 wartości sił wewnętrznych. Wielkości te można uzyskać opierając się na analizie statystycznej wyników badań laboratoryjnych i in situ. Zakres badań wielkości charakteryzujących warunki naturalne i górnicze w warunkach kopalń podziemnych jest ograniczony. Ograniczenie to wynika nie tylko ze względów ekonomicznych, ale i technicznych.

Biorąc pod uwagę złożoność podjętego tematu, w pracy sformułowano dwa podstawowe cele, a mianowicie cel naukowy i cel utylitarny.

Celem naukowym pracy jest opis, na podstawie przeprowadzonych badań, zmienności podstawowych danych do oceny stateczności wyrobisk korytarzowych oraz wykazanie, że uzyskanie dokładniejszego wyniku oceny niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych drążonych i utrzymywanych w kopalniach węgla kamiennego jest możliwe poprzez zastosowanie modeli teoretycznych opartych na zasadach probabilistycznej analizy konstrukcji. Tak zbudowane modele teoretyczne pozwalają na uwzględnienie w procesie projektowania wyrobisk korytarzowych niepewności informacji wynikających m.in. ze zmienności budowy geologicznej masywu skalnego, własności wytrzymałościowych

i odkształceniowych skał, jakości materiału i elementów konstrukcyjnych stosowanych do wykonania obudowy, dokładności wykonania wyrobiska i jego obudowy itp. Osiągnięcie tak sformułowanego celu jest możliwe poprzez poznanie zakresu niepewności informacji, wyrażającego się dokładnością i zmiennością przyjmowanych danych wejściowych do projektowania.

Celem utylitarnym pracy jest opracowanie metodyki oceny niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk korytarzowych przydatnej do stosowania w praktyce projektowania górniczego. Ustalone w opracowanej metodyce mierniki niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji umożliwią zastosowanie klasyfikacji warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych, na podstawie której można odpowiednio korygować stosowane w metodzie stanów granicznych wartości współczynników bezpieczeństwa.

Aby postawione w pracy cele mogły być zrealizowane, konieczne było przeprowadzenie wielu badań, analiz i obserwacji w drążonych i utrzymywanych wyrobiskach korytarzowych, ustalając zmienności poszczególnych danych wejściowych, ich wariancję i rozkłady statystyczne.

Uwzględniając wymienione uwarunkowania, sformułowano następującą tezę pracy:

Dla prognozowania stateczności wyrobisk korytarzowych istnieje konieczność opracowania metodyki jej oceny, uwzględniającej niepewność informacji wynikającą ze zmienności warunków geologiczno–górniczych, własności wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu, jakości materiału i elementów konstrukcyjnych obudowy oraz dokładności wykonania wyrobiska i jego obudowy. Metodykę oceny stateczności wyrobisk korytarzowych oprzeć można na podstawach teorii niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji. Traktując dane wejściowe do projektowania jako zmienne losowe, miernikiem niezawodności konstrukcji budowli podziemnej może być prawdopodobieństwo utraty stateczności. Aby konstrukcja budowli podziemnej była bezpieczna, określona wartość prawdopodobieństwa utraty stateczności konstrukcji obudowy wyrobiska powinna przyjmować wartości akceptowalne.

Zagadnienie stateczności drążonych i utrzymywanych wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych jest zagadnieniem bardzo złożonym, o czym świadczy m.in. mnogość czynników omówionych w rozdziale 2.3, dlatego rozwiązanie postawionych w pracy celów i udowodnienie sformułowanej tezy oparto na przykładzie wyrobisk przygotowawczych, wykonanych w stalowej obudowie odrzwiowej podatnej. Dokonując takiego wyboru, przyjęto następujące założenia:

- w kopalniach węgla kamiennego wyrobiska przygotowawcze stanowią zdecydowaną większość wśród wszystkich drążonych i utrzymywanych wyrobisk korytarzowych,
- wyrobiska przygotowawcze drążone i utrzymywane są w złożu, a więc w przypadku kopalń węgla kamiennego w skałach o najniższych parametrach wytrzymałościowych i odkształceniowych, co często stwarza największe trudności w utrzymaniu ich stateczności,
- ze względu na warunki utrzymania stateczności wyrobisk górniczych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, ponad 90% wyrobisk wykonanych jest w stalowej obudowie odrzwiowej podatnej,
- konieczność uzyskiwania wysokiej koncentracji wydobycia z jednego przodka eksploatacyjnego powoduje konieczność stosowania wysoko wydajnych kompleksów ścianowych, co z kolei powoduje, że wyrobiska przygotowawcze muszą mieć odpowiednio wielkie gabaryty i kształt przekroju poprzecznego, a w trakcie całego okresu ich użytkowania nie powinny ulec zaciśnięciu,
- prowadzenie eksploatacji na dużych głębokościach powodujących wysoką temperaturę skał otaczających wyrobiska oraz w warunkach zagrożenia gazowego powoduje większe wymagania wentylacyjne w przodku eksploatacyjnym, a co za tym idzie utrzymanie wymaganych gabarytów przekroju poprzecznego wyrobisk przygotowawczych,
- analizą objęto najczęściej stosowane w polskim górnictwie przekroje poprzeczne wyrobisk przygotowawczych, a mianowicie przekroje odpowiadające rozmiarom odrzwi obudowy ŁP-8, ŁP-9, ŁP-10 i ŁP-12,
- w przeprowadzonej analizie uwzględniono drążenie wyrobisk z urabianiem skał za pomocą kombajnu chodnikowego oraz za pomocą robót strzałowych,
- w analizie uwzględniono najczęściej stosowaną w kopalniach węgla kamiennego GZW konstrukcję obudowy ŁP, składającą się z odrzwi typoszeregu A wykonanych z profilu V25 lub V29, łuki ociosowe i stropnicowe połączone strzemionami SD25 i SD29, posadowienie odrzwi na typowych podkładkach stalowych, jako okładziny stosowane siatki stalowe zaczepowe, rozpory stalowe dwustronnego działania.

Złożoność podjętego tematu oraz waga zagadnienia dla prawidłowego i bezpiecznego prowadzenia eksploatacji górniczej w kopalniach węgla kamiennego spowodowały szeroki zakres pracy, uwzględniający zarówno rozważania teoretyczne z budową algorytmów i sposobów postępowania w rozwiązywaniu zadań szczegółowych, jak i badania

eksperymentalne, pozwalające na opis zjawisk i procesów zachodzących w wyrobiskach korytarzowych i ich otoczeniu. Praca obejmuje:

- charakterystykę metodyk oceny niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji budowli podziemnych z uwzględnieniem niepewności informacji opartych na różnych modelach teoretycznych współdziałania obudowy z górotworem (metody tradycyjne oparte na bilansie nośności konstrukcji obudowy i jej obciążenia, metody numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych itp.), wykorzystujących metodę symulacji Monte Carlo,
- analityczno – empiryczną metodę oceny niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych, zakładającą, że wszystkie dane wejściowe do projektowania są zmiennymi losowymi o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa,
- wyniki i analizę przeprowadzonych badań:
  - zmienności własności wytrzymałościowych i odkształceniowych skał budujących masyw w rejonie analizowanych wyrobisk,
  - jakości materiału i elementów konstrukcyjnych obudowy zastosowanej w drążonych wyrobiskach korytarzowych,
  - jakości wykonania wyłomu wyrobiska i obudowy ŁP w przodku drążonego wyrobiska,
  - zachowania się wyrobisk w trakcie ich użytkowania.
- analizę niezawodności konstrukcji wyrobisk przeprowadzoną na podstawie przyjętych metodyk i ich weryfikacji z wynikami badań dołowych,
- klasyfikację warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych,
- propozycję prostych działań zmierzających do poprawy stopnia bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych.

4. ELEMENTY TEORII BEZPIECZEŃSTWA I NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI WYROBISK KORYTARZOWYCH W ASPEKCIE UTRZYMANIA ICH STATECZNOŚCI

Konstrukcje budowlane i jej poszczególne elementy powinny być tak zaprojektowane, aby mogły przeciwstawić się oddziaływaniom zewnętrznym, zachowując swoje parametry użytkowe w trakcie budowy, użytkowania w normalnych warunkach oraz utrzymać konstrukcyjną całość w przypadku wystąpienia zdarzeń losowych (np. miejscowe uszkodzenie, wystąpienie zjawiska dynamicznego itp.) [121].

Projektowanie obudowy wyrobisk górniczych realizowane jest przy wykorzystaniu metody stanów granicznych, zaliczanej do metod półprobabilistycznych [5] lub probabilistycznych poziomu I [121]. Do obliczeń przyjmuje się wiele 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 zrobione z określoną dokładnością, a jakość wykonania obudowy również jest niejednorodna. Stan ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe. Powstaje zatem problem ilościowego ujęcia losowego charakteru zarówno danych wejściowych, jak i parametrów projektowanych.

Pierwsze rozwiązania problemów niezawodności i bezpieczeństwa budowli przy zastosowaniu metod rachunku prawdopodobieństwa pochodzą z pierwszej połowy XX wieku, a ich twórcami byli m.in. M. Mayer, N. S. Strelecki, W Wierzbicki, A. M. Freudenthal i A. R. Rżanicyn [5,86,118,153,158,172]. Znaczący wkład w rozwój badań w zakresie probabilistycznej analizy niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych w drugiej połowie XX wieku wniósł J. Murzewski [120,121,122].

W odniesieniu do oceny stateczności wyrobisk górniczych metody analizy probabilistycznej nie były wykorzystywane w zbyt szerokim zakresie. Rozwiązania stosujące funkcje losowe do projektowania obudowy szybów podał A. Wichur [169,170,171]. Metody te dały bardzo dobre wyniki i zostały wykorzystane m.in. przy opracowaniu norm regulujących projektowanie obudowy szybów górniczych. Pierwsze próby zastosowania metod probabilistycznej analizy konstrukcji stalowych podjęto m.in. w pracach [44,45,53,54,59,61,63,65,68,71,73,74,78] do określania nośności stalowej obudowy odrzwiowej podatnej oraz szacowania bezpieczeństwa konstrukcji.

Stan konstrukcji, w którym przestaje ona spełniać wymagania projektowe, nazywany jest zawodnością. Zawodność rozumiana jest jako katastrofa, awaria lub inne formy utraty nośności konstrukcji, np. nadmierne deformacje, drgania itp. [5]. W ujęciu probabilistycznym zawodność definiowana jest jako prawdopodobieństwo wystąpienia w obiekcie budowlanym użytkowanym w określonym środowisku i określonym czasie zdarzenia losowego, powodującego zniszczenie konstrukcji lub jej istotnych części, albo niedopuszczenie lub wyłączenie jej z użytkowania z powodu zagrożenia awaryjnego [122,141].

Katastrofa jest to nagłe zniszczenie budowli lub jej elementu w formie nośności o tragicznych następstwach ekonomicznych i społecznych [5]. W odniesieniu do wyrobisk górniczych katastrofa utożsamiana będzie z utratą stateczności wyrobiska w postaci zawału.

Awaria jest to uszkodzenie konstrukcji, uniemożliwiające lub ograniczające użytkowanie obiektu [5]. Wyrobisko górnicze ulegnie awarii, gdy wskutek zaciskania utraci swoją funkcjonalność. Utrata funkcjonalności może wystąpić w postaci zmniejszenia wskutek deformacji górotworu i obudowy gabarytów wyrobiska, uniemożliwiając realizację podstawowych zadań technologicznych (np. brak zachowania wymaganych odległości ruchowych pomiędzy urządzeniami i obudową, trudności w realizacji transportu kołowego wskutek nadmiernego wypiętrzania spągu itp.), a także w postaci zmniejszenia przekroju poprzecznego, utrudniającego doprowadzenie lub odprowadzenie wymaganej ilości powietrza.

W najczęściej stosowanych w projektowaniu modelach wyróżnia się trzy podstawowe wymagania, a mianowicie [122,141, 163]:

- wymagania jakości,
- wymagania niezawodności,
- wymagania bezpieczeństwa.

Wymagania w zakresie systemów jakości w projektowaniu, wykonaniu i naprawach, w wytwarzaniu i montażu oraz w próbach odbiorowych regulują normy PN – ISO 9001 – 9003 [143,145,146]. Jakość definiowana jest jako zbiór wszystkich cech charakterystycznych pewnej całości, która ma zdolność spełniania ustanowionych i zamierzonych potrzeb [141]. W modelach matematycznych jakość definiowana jest jako prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) lub jej elementy (podsystemy) w chwili odbioru nie mają wad [163].

Wymagania niezawodności regulowane są przez PN – ISO 2394: 2000 i uwzględniają trzy podstawowe zagadnienia, a mianowicie [141]:

- użytkowalność – w konstrukcji nie wystąpią odkształcenia, zarysowania ani drgania uciążliwe dla użytkowników obiektu,
- bezpieczeństwo – w konstrukcji w czasie użytkowania nie zajdą groźne uszkodzenia na skutek obciążeń lub innych działań,
- niewrażliwość na katastrofę – w konstrukcji w czasie użytkowania nie dojdzie do katastrofalnych szkód w wyniku żywiołów, błędów ludzkich itp.

W stosowanych metodach projektowania niezawodność definiowana jest najczęściej jako prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie awarii w przyjętym czasie jej eksploatacji (przy założeniu że w chwili odbioru nie ma wad) [163].

Wymagania w zakresie bezpieczeństwa konstrukcji według polskiego prawa budowlanego obejmują następujące zagadnienia [141]:

- bezpieczeństwo konstrukcji – konstrukcji nie zagraża zniszczenie, a w przypadku zachodzenia procesu niszczenia powinny być widoczne jego wstępne objawy,
- bezpieczeństwo pożarowe – konstrukcja wytrzyma do ewakuacji, rozprzestrzenianie ognia i dymu jest ograniczone,
- bezpieczeństwo użytkowania – nie ma przeszkód przejścia, śliskich miejsc, opadających części, zagrożeń wypadania ludzi itp.

W stosowanych metodach projektowania bezpieczeństwo definiowane jest jako prawdopodobieństwo, że konstrukcja (system) nie ulegnie zniszczeniu w okresie jej realizacji i eksploatacji [163].

4.1. Jakość wykonania wyrobiska

Probabilistyczna analiza właściwości konstrukcji zajmuje się metodami wnioskowania o całej zbiorowości na podstawie statystycznych badań cech pewnej części populacji obiektów realizowanych według takich samych projektów, z takich samych materiałów, spełniających tę samą funkcję [5].

W celu określenia prawdopodobieństwa bezpieczeństwa (awarii) konstrukcji należy określić losowe charakterystyki nośności elementów lub systemu konstrukcyjnego oraz rozkłady losowych obciążeń, które pozwolą wyznaczyć losowe siły wewnętrzne w obudowie.

Stan, w jakim znajduje się konstrukcja w chwili oddania do użytku, określa się na podstawie analizy jakości, która składa się z następujących etapów [163]:

- określenie celu badań,
- określenie metodologii badań,

- określenie metodologii przetworzenia danych,
- ustalenie zbioru obiektów poddanych badaniom,
- wykonanie obserwacji i pomiarów,
- przetworzenie uzyskanych informacji,
- sformułowanie wniosków.

Celem analizy jakości jest określenie wielkości i rozkładu odchyleń od wartości projektowych parametrów charakteryzujących wyrobisko korytarzowe. Cel ten realizuje się poprzez pomiary wytypowanych parametrów charakteryzujących jakość konstrukcji w chwili jej oddawania do użytku. Specyfikacja parametrów charakteryzujących jakość wykonania konstrukcji zależy od charakteru analizowanej konstrukcji oraz stosowanej metody oceny jej stateczności.

W przypadku wyrobiska korytarzowego w kopalni podziemnej do podstawowych czynników decydujących o niezawodności i bezpieczeństwie konstrukcji zależnych od jakości wykonania zalicza się [34,40,80,82,114,115,117,133]:

a) elementy jakości wykonania wyłomu wyrobiska
   - szerokość i wysokość wyłomu wyrobiska,
   - dopasowanie kształtu przekroju poprzecznego wyłomu do kształtu obudowy wyrobiska,
   - nierówność powierzchni wyłomu na całym obwodzie wyrobiska,
b) elementy jakości wykonania obudowy wyrobiska
   - szerokość i wysokość wyrobiska w świetle obudowy,
   - parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe materiału, z którego wykonane są poszczególne elementy obudowy,
   - parametry geometryczne elementów (prefabrykatów) obudowy,
   - dotrzymanie parametrów wytrzymałościowych obudowy lub jej poszczególnych elementów (np. właściwy dobór sortymentu, zgodność wymiarów obudowy z jej projektem – grubość obudowy, odległość między odrzwiami, właściwy moment dokręcenia śrub w zamkach itp., kompletność konstrukcji, właściwa pod względem ilościowym i jakościowym zabudowa akcesoriów obudowy – stopy podporowe, rozpory, okładziny itp.),
   - prawidłowe powiązanie obudowy z górotworem (jakość wykładki, ilość, rozmieszczenie i wielkość pustek za obudową itp.).

W zależności od konstrukcji obudowy oraz metody oceny niezawodności konstrukcji ustala się wielkości mierzone, które podlegają przetwarzaniu. Dla poszczególnych pomiarów ustala się metodologię badań, obejmującą:

- sposób pomiaru,
- częstość pomiarów,
- sposób ewidencjonowania wyników.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów ustala się statystyki poszczególnych parametrów. Statystyczny opis wyników pomiarów zmiennej losowej analitycznie można przedstawić za pomocą następujących wielkości: wartość oczekiwana, wariancja, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, kowariancja i współczynnik korelacji. Wyniki przeprowadzonych pomiarów dla poszczególnych parametrów można traktować jako zmienne losowe dyskretne lub ciągłe.

W celu uzyskania obiektywnych informacji o obiekcie w chwili jego oddania do użytku należy przeprowadzić badania na wytypowanym zbiorze obiektów, który powinien spełniać kryteria reprezentatywności. Cechy ilościowe i jakościowe próby nie powinny znacznie odbiegać od częstości występowania tych cech w populacji ogólnej. Zbiór obiektów poddanych badaniom winien być wybierany w sposób losowy z populacji generalnej, a jego liczebność winna zapewnić żądaną dokładność oceny.

4.2. Niezawodność konstrukcji

Oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk górniczych możliwe jest jedynie przy wykorzystaniu teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji.

Miarą bezpieczeństwa konstrukcji w rozwiązaniu probabilistycznym poziomu I jest współczynnik bezpieczeństwa wyrażany w postaci [5,121]:

$$n = \frac{P_0}{q_0} \geq 1{,}0 \tag{4.1}$$

gdzie: P_0 – kwantyl nośności obudowy,

q_0 – kwantyl obciążenia obudowy.

Ocena bezpieczeństwa konstrukcji w rozwiązaniu probabilistycznym poziomu II opiera się na założeniu, że warunek awarii można zapisać w postaci:

$$Z_0 = P_0 - q_0 \geq 0 \tag{4.2}$$

gdzie:

Z_0 – zapas bezpieczeństwa,

P_0 – nośność obudowy,

q_0 – obciążenie obudowy.

Decydujące znaczenie mają tu dwa parametry rozkładów prawdopodobieństwa, a mianowicie wartość oczekiwana i odchylenie standardowe. Bezpieczeństwo konstrukcji, opierające się na idei „najsłabszego ogniwa", pozwala przyjąć za wartości progowe nośności P_0 i obciążenia obudowy q_0 w postaci:

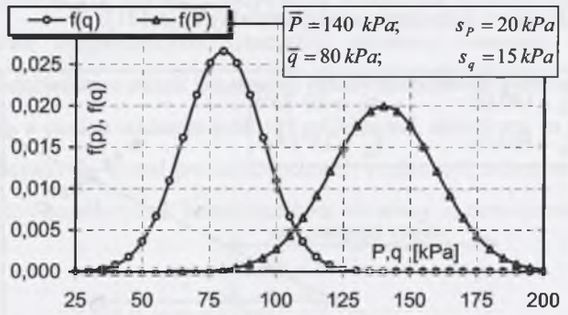
$$\begin{aligned} P_0 &= \overline{P}_0 - t_{P_0} \cdot s_{P_0} \\ q_0 &= \overline{q}_0 + t_{q_0} \cdot s_{q_0} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Wielkości losowe nośności obudowy i jej obciążenia o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa można zapisać w postaci (rys. 4.1):

$$\begin{aligned} f(P_0) &= \frac{1}{s_{P_0} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{P_0 - \overline{P}_0}{2 \cdot s_{P_0}} \right) \\ f(q_0) &= \frac{1}{s_{q_0} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{q_0 - \overline{q}_0}{2 \cdot s_{q_0}} \right) \end{aligned} \tag{4.4}$$

gdzie: $\overline{P}_0, \overline{q}_0$ – średnie wartości nośności obudowy i jej obciążenia,

s_{P_0}, s_{q_0} – odchylenia standardowe wartości nośności obudowy i jej obciążenia.



Rys. 4.1. Przykład rozkładu obciążenia i nośności obudowy jako zmiennych losowych o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa

Fig. 4.1. Example of load distribution and support load capacity as random variables of standard probability distribution

Jako miarę bezpieczeństwa przyjmuje się współczynnik niezawodności Cornella t:

$$t = \frac{\overline{P}_0 - \overline{q}_0}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}} \tag{4.5}$$

Wartość dystrybuanty współczynnika niezawodności *p(t)* oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość *[1-p(t)]* oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (utraty stateczności przez obudowę).

W metodzie poziomu II wg [5,163] na tym poziomie obliczeń stosuje się warunki typu:

$$p \leq p_a \tag{4.6}$$

gdzie:

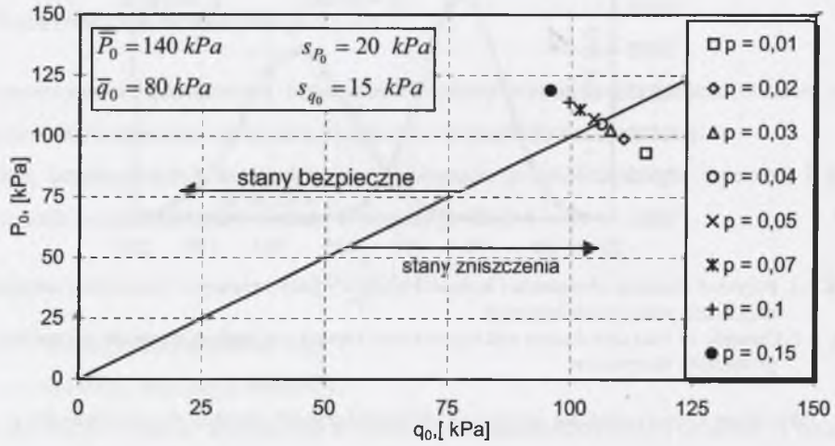
p – prawdopodobieństwo awarii,

p_a – akceptowany poziom prawdopodobieństwa awarii.

W zależności od rodzaju warunku oceny stopnia bezpieczeństwa konstrukcji jako akceptowany poziom prawdopodobieństwa awarii obiektów budowlanych stosuje się wielkości rzędu [163]:

- dla warunków wytrzymałościowych – $10^{-4} \div 10^{-6}$,
- dla warunków użytkowalności konstrukcji – $10^{-2} \div 10^{-4}$.

Przedstawiona powyżej metoda analizy szacowania bezpieczeństwa może być wykorzystana w prognozowaniu niezawodności nietypowych obiektów budowlanych, takich jak np. obiekty wymagające indywidualnego szacowania zapasu bezpieczeństwa ze względu na brak aktualnych norm czy przepisów, obiektów o nietypowym obciążeniu lub konstrukcji, których nośność określono metodami eksperymentalnymi [5,121].



Rys. 4.2. Przykład stanów konstrukcji obudowy wyrobiska korytarzowego z uwzględnieniem różnych poziomów prawdopodobieństwa utraty stateczności

Fig. 4.2. Example of heading support construction state undertaking different levels of error probability

Rozpatrując przypadek niezawodności konstrukcji, w której o bezpieczeństwie decydują dwa niezależne czynniki losowe, a mianowicie nośność obudowy $P_0(x)$ oraz jej obciążenie $q_0(x)$, bezpieczeństwo konstrukcji można interpretować graficznie wydzielając w układzie współrzędnych obszary zawodności i niezawodności oddzielonych linią $P_0 - q_0 = 0$ (rys. 4.2).

Przyjmując probabilistyczny wskaźnik niezawodności β obliczany z zależności:

$$\beta = \frac{\overline{P}_0 - \overline{q}_0}{\alpha_{P_0} \cdot s_{P_0} + \alpha_{q_0} \cdot s_{q_0}}$$

$$|\alpha_{P_0}| = \frac{s_{P_0}}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}} \quad , \tag{4.7}$$

$$|\alpha_{q_0}| = \frac{s_{q_0}}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}}$$

największe prawdopodobieństwo, że brzeg obszaru granicznego zostanie przekroczony występuje w punkcie kontrolnym o współrzędnych:

$$q_0^* = |\alpha_{q_0}| \cdot \beta$$
$$P_0^* = |\alpha_{P_0}| \cdot \beta \tag{4.8}$$

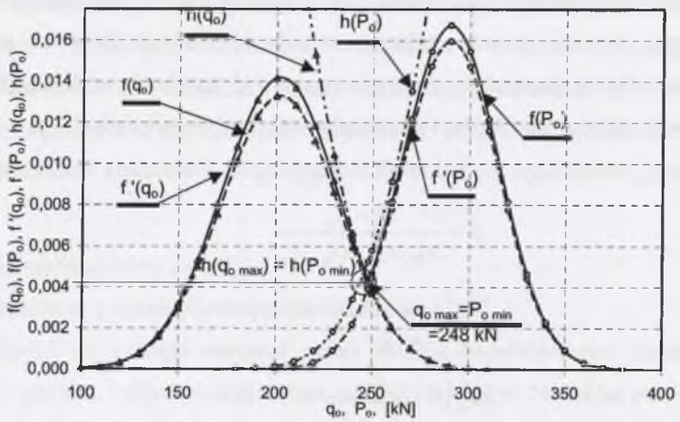
Wartość wskaźnika niezawodności β jest współbrzmiący z współczynnikiem niezawodności Cornella t i wartość dystrybuanty wskaźnika niezawodności $p(\beta)$ oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość *[1-p(β)]* oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (utraty stateczności przez obudowę).

Inną, wygodną z punktu widzenia praktyki projektowej, stosowaną na tym poziomie wg [163] (wg [5] zaliczany do metod probabilistycznych poziomu I) miarą bezpieczeństwa jest tzw. konwencjonalny współczynnik bezpieczeństwa wyrażany za pomocą wzoru:

$$\gamma_K = \frac{\overline{P}_0 - t_{P_0} \cdot s_{P_0}}{\overline{q}_0 + t_{q_0} \cdot s_{q_0}} \tag{4.9}$$

gdzie: t_{P_0}, t_{q_0} – współczynniki zależne od wymaganego poziomu prawdopodobieństwa.

W metodzie probabilistycznej poziomu III [5,121,163] zakłada się, że nośność obudowy oraz jej obciążenie są zmiennymi losowymi o funkcjach rozkładu $f(q_o)$, $f(P_o)$ i dystrybuantach $F(q_o)$, $F(P_o)$. Zakres wartości q_o i P_o jest ograniczony, tzn. skrajne wartości q_o i P_o oraz różniące się od centralnej są mało prawdopodobne, jednak możliwe. Nieograniczone krzywe rozkładów $f(q_o)$ i $f(P_o)$ uważa się za bezwzględne charakterystyki rozkładów. Ponadto, rozróżnia się warunkowe charakterystyki rozkładów $f'(q_o)$ i $f'(P_o)$, dla których zakres zmienności leży po jednej stronie zmienności q_o i P_o (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Przykład rozkładu obciążenia i nośności obudowy jako zmiennych losowych o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa dla poziomu III

Fig. 4.3. Example of load distribution and support load capacity as random variables of standard probability distribution for level III

Warunkowe charakterystyki rozkładów $f'(q_o)$ i $f'(P_o)$ przyjmują postać:

– funkcja nośności obudowy ograniczona jest lewostronnie wartością $P_{o\,min}$:

$$f'(P_o)=0 \qquad \text{dla } P_o \le P_{\min}$$
$$f'(P_o)=\frac{f(P_o)}{1-F(P_{o\min})} \qquad \text{dla } P_o > P_{\min} \tag{4.10}$$

– funkcja obciążenia obudowy ograniczona jest prawostronnie wartością $q_{o\,max}$:

$$f'(q_o)=\frac{f(q_o)}{F(q_{o\max})} \qquad \text{dla } q_o < q_{o\max}$$
$$f'(q_o)=0 \qquad \text{dla } q_o \ge q_{o\max} \tag{4.11}$$

Jako miary bezpieczeństwa przyjęto funkcje ryzyka $h(P_{o\,min})$ i $h'(q_{o\,max})$ przekroczenia wartości $P_{o\,min}$ w dół oraz $q_{o\,max}$ w górę w postaci:

$$h(P_{o\min})=\frac{f(P_{o\min})}{1-F(P_{o\min})} \tag{4.12}$$

$$h'(q_{o\max})=\frac{f(q_{o\max})}{F(q_{o\max})} \tag{4.13}$$

Funkcją ryzyka (zagrożenia) nazywa się prędkość, z jaką rośnie zawodność w stosunku do niezawodności.

Skalę zagrożenia współrzędnej stanu konstrukcji wyrażają wzory:

$$\frac{1}{k_{P_o}}=P_{o\min}\cdot h(P_{o\min}) \tag{4.14}$$

$$\frac{1}{k_{q_o}}=q_{o\max}\cdot h'(q_{o\max}) \tag{4.15}$$

Przyjmując jako kryterium optymalizacji stałą skalę zagrożenia

$$\frac{1}{k_{P_o}}=\frac{1}{k_{q_o}}=\frac{1}{k}, \tag{4.16}$$

można otrzymać równanie niebezpiecznego stanu konstrukcji w postaci:

$$p_f=1-[1-F(P_o)]\cdot F(q_o) \tag{4.17}$$

gdzie

$F(P_o)$, $F(q_o)$ – dystrybuanty nośności i obciążenia obudowy.

Optymalną miarą bezpieczeństwa w omawianej metodzie jest minimalizacja zawodności konstrukcji $p_f=\min$.

4.3. Bezpieczeństwo konstrukcji

Niezawodność konstrukcji obejmuje zagadnienie bezpieczeństwa poszczególnych elementów konstrukcji, określając bezpieczeństwo lub awarię na podstawie zasady najsłabszego ogniwa. Przez pojęcie bezpieczeństwa konstrukcji rozumie się funkcję prawdopodobieństwa wystąpienia awarii spowodowanej przynajmniej w jednym ze źródeł. Ogólnie, funkcję tę można zapisać w postaci:

$$p_a=1-\prod_{i=1}^{n}[1-p(x_i)] \tag{4.18}$$

gdzie:

p_a – całkowite prawdopodobieństwo awarii konstrukcji,

$p(x_i)$ – prawdopodobieństwo awarii z punktu widzenia i-tej własności,

n – liczba źródeł możliwości powstawania awarii konstrukcji.

Często w rozwiązaniach optymalizacyjnych bezpieczeństwa konstrukcji jako kryterium optymalizacyjne przyjmowana jest funkcja ryzyka. Funkcja ryzyka (zagrożenia) wg [121] definiowana jest jako prędkość, z jaką rośnie zawodność w stosunku do niezawodności:

$$h(t)=\frac{dq/dt}{Q(t)}=\frac{f(t)}{1-F(t)} \tag{4.19}$$

gdzie:

$$f(t)=\frac{dq}{dt}$$
$$F(t)=q(t) \tag{4.20}$$

t – losowa trwałość,

$q(t)$ – zawodność,

$Q(t)$ – niezawodność.

Przedstawiona powyżej postać funkcji ryzyka wykorzystywana jest w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji metodą probabilistyczną poziomu III [5,121] do określenia ryzyka zaniżenia nośności konstrukcji (wzór 4.12) oraz do oceny ryzyka przekroczenia jej obciążenia (wzór 4.13).

W metodach optymalizacyjnych ryzyko definiowane jest również jako funkcja prawdopodobieństwa wystąpienia określonych niebezpiecznych zdarzeń i wynikających z nich konsekwencji [156]. Często ryzyko określa się w sposób ilościowy z zależności:

$$R = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot c_i \cdot k_i \qquad (4.21)$$

gdzie:

p_i – prawdopodobieństwo powstania awarii w i-tym źródle,

c_i – współczynnik wagowy i-tej pozycji skutków, uwzględniający m.in. jej wpływ na czynniki niepoliczalne,

k_i – wartość i-tej pozycji skutków spowodowanych awarią.

Takie przedstawienie ryzyka [156] 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.

5. OCENA NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA KONSTRUKCJI WYROBISK KORYTARZOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WARUNKÓW NIEPEWNOŚCI INFORMACJI

5.1. Źródła niepewności informacji

Stosowane dotychczas i szeroko opisane w literaturze metody rozwiązywania problemów optymalizacyjnych oparte są na metodach deterministycznych, a te z kolei na założeniu, że wszystkie dane wejściowe do projektowania określone są dokładnie jedną wartością, niezmieniającą się w całym okresie użytkowania konstrukcji. Doświadczenie budownictwa podziemnego wskazuje jednak, że w odniesieniu do wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego jest to bardzo trudne. Trudności te wynikają z tego, że wyrobiska wykonywane są w górotworze, który charakteryzuje się zmiennością zarówno budowy, jak i własności skał.

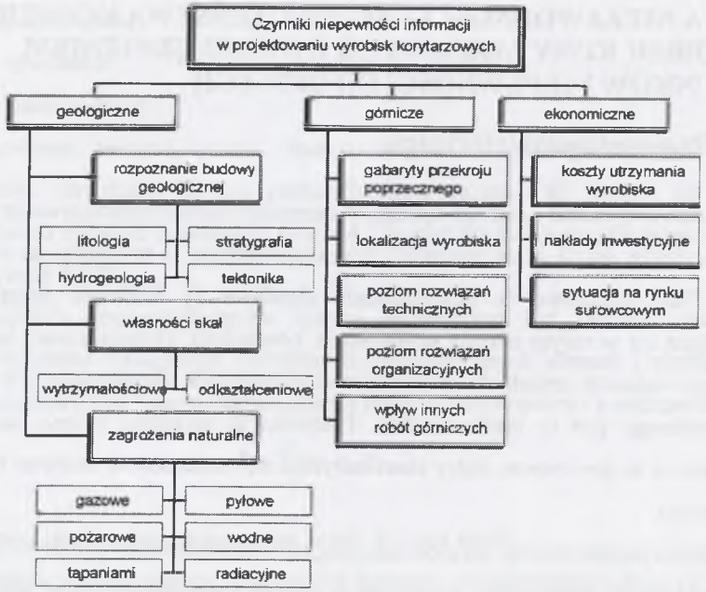
W praktyce projektowej do opracowania prognozy oddziaływania górotworu na obudowę wyrobisk górniczych powszechnie stosowane są metody półprobabilistyczne, zakładające, że analizowane wyrobisko zlokalizowane jest w ośrodku o tej samej budowie i własnościach na całym przyjętym odcinku. Jako reprezentatywne wartości poszczególnych parametrów niezbędnych do obliczeń prognostycznych przyjmuje się ich wartości średnie.

Nośność obudowy określana jest najczęściej na podstawie badań laboratoryjnych lub opierających się na metodzie stanów granicznych nośności konstrukcji.

W celu uwzględnienia ewentualnych zmian w budowie ośrodka lub jego własnościach oraz zmian nośności obudowy przyjmuje się współczynniki bezpieczeństwa, które pozwalają na projektowanie obudowy z pewnym zapasem.

Na rys. 5.1 przedstawiono główne czynniki, powodujące niepewność informacji w projektowaniu budowli podziemnych. Niepewność informacji wynika głównie ze zmienności ośrodka skalnego, jakości wykonania wyrobiska, jakości elementów obudowy, jakości wykonania obudowy, dokładności rozpoznania geologicznego, złożoności warunków górniczych, stopnia rozpoznania geologicznego, warunków rynkowych itp.

Jak z przedstawionego na rysunku schematu wynika, dobór obudowy dla wyrobisk podziemnych wykonywany jest w przy wykorzystaniu wielu danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem. Stan ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe.



Rys. 5.1. Główne czynniki niepewności informacji w procesie projektowania wyrobisk korytarzowych [72]
Fig. 5.1. Main factors of information unreliability in heading designing process [72]

5.2. Metody rozwiązań zadań niezawodności konstrukcji budowli podziemnych

W rozwiązaniach teorii niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji podstawowym zadaniem jest określenie podstawowych parametrów współpracy obudowy z górotworem, do których zalicza się obciążenie obudowy i jej nośność.

Zakładając, że obciążenie obudowy i jej nośność $q_0(\omega)$ i $P_0(\xi)$ są funkcjami zmiennych losowych określanymi na podstawie n i m przyjmowanych danych traktowanych jako zmienne losowe o dowolnych rozkładach prawdopodobieństwa $x_i(\omega)$ i $y_i(\xi)$, można je wyznaczyć za pomocą wzorów [5,149,164]:

$$q_0(\omega) = f_1[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] \tag{5.1}$$

$$P_0(\xi) = f_2[y_1(\xi), y_2(\xi), \ldots, y_m(\xi)] \tag{5.2}$$

Wartość średnią oraz odchylenie standardowe obciążenia obudowy dla przyjętego modelu można określić ze wzoru:

$$\overline{q_0} = \int_{\Omega_1} f_1[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] \cdot g_1[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] \cdot d\mu_1 \tag{5.3}$$

$$s_{q_0} = \sqrt{\int_{\Omega_1} \{f_1[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] - \overline{q_0}\}^2 \cdot g_1[x_1(\omega), x_2(\omega), \ldots, x_n(\omega)] \cdot d\mu_1} \tag{5.4}$$

$$d\mu_1 = dx_1 \cdot dx_2 \cdot dx_3 \cdot \ldots \cdot dx_n \,, \qquad \Omega_1 = R^n \tag{5.5}$$

Wartość średnią oraz odchylenie standardowe nośności obudowy można określić ze wzorów:

$$\overline{P_0} = \int_{\Omega_2} f_2[y_1(\xi), y_2(\xi), \ldots, y_m(\xi)] \cdot g_2[y_1(\xi), y_2(\xi), \ldots, y_m(\xi)] \cdot d\mu_2 \,, \tag{5.6}$$

$$s_{P_0} = \sqrt{\int_{\Omega_2} \{f_2[y_1(\xi), y_2(\xi), \ldots, y_m(\xi)] - \overline{P_0}\}^2 \cdot g_2[y_1(\xi), y_2(\xi), \ldots, y_m(\xi)] \cdot d\mu_2} \,, \tag{5.7}$$

$$d\mu_2 = dy_1 \cdot dy_2 \cdot dy_3 \cdot \ldots \cdot dy_m \,, \qquad \Omega_2 = \mathrm{R}^m \tag{5.8}$$

Rozwiązanie równań (5.3), (5.4), (5.6) i (5.7) w przypadku braku znajomości rozkładu prawdopodobieństwa poszczególnych danych lub opisu poszczególnych danych równaniami różnych rozkładów prawdopodobieństwa jest możliwe tylko poprzez zastosowanie metody symulacyjnej, np. metody Monte Carlo.

Metoda Monte Carlo – to sposób rozwiązywania zagadnień matematycznych drogą tzw. modelowania statystycznego, polegający na dobieraniu do rozwiązywanego problemu takiego procesu losowego, którego parametry statystyczne przybliżałyby poszukiwanie wartości rozwiązań. Podstawą metody jest zbiór liczb losowych generowanych z przedziału określonej gęstości rozkładu. Dokładność wyniku otrzymanego za pomocą omawianej metody zależy od liczby prób i rośnie w miarę jej wzrostu. Powoduje to niestety dużą pracochłonność i czasochłonność metody.

Jeżeli wszystkie dane wejściowe do obliczeń obciążenia obudowy i jej nośności można opisać normalnym rozkładem prawdopodobieństwa, to można przyjąć, że i wyniki obliczeń (obciążenie obudowy oraz jej nośność) charakteryzować się będą również normalnym rozkładem prawdopodobieństwa [5,6,10].

Przyjmując sformułowane powyżej założenia, dla celów praktycznych, do oszacowania niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych można zastosować metodę uproszczoną.

Wartość średnią obciążenia obudowy i jej nośności można określić ze wzorów aproksymacyjnych jako wartości obliczone dla średnich wartości poszczególnych danych:

$$\overline{q_0} = f_1(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \ldots, \overline{x}_n) \tag{5.9}$$

$$\overline{P_0} = f_2(\overline{y}_1, \overline{y}_2, \ldots, \overline{y}_m) \tag{5.10}$$

Odchylenie standardowe obciążenia obudowy jako zmiennej losowej o rozkładzie normalnym obliczyć można ze wzorów:

$$s_{q_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_i}\right)^2 \cdot s_{x_i}^2} \tag{5.11}$$

$$s_{P_0} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial f_2}{\partial y_i}\right)^2 \cdot s_{y_i}^2} \tag{5.12}$$

Ze wzorów (5.11) i (5.12) wynika, że odchylenie standardowe obciążenia obudowy i jej nośności będzie zawsze większe od odchyleń standardowych poszczególnych danych wejściowych do obliczeń.

5.3. Probabilistyczne ujęcie parametrów współpracy obudowy z górotworem

Oszacowanie bezpieczeństwa konstrukcji obudowy wyrobisk górniczych przy uwzględnieniu losowego charakteru parametrów wejściowych możliwe jest przy wykorzystaniu teorii niezawodności i bezpieczeństwa opartej na probabilistycznych metodach analizy konstrukcji.

5.3.1. Probabilistyczne ujęcie obciążenia obudowy jako efektu przekroczenia warunku granicznej równowagi górotworu

Metody stosowane do obliczania obciążenia obudowy oparte na warunku granicznej równowagi najczęściej zawierają następujące dane:

- szerokość wyrobiska – S_w, m,
- wysokość wyrobiska – W_w, m,
- parametr charakteryzujący własności wytrzymałościowe masywu skalnego (np. wskaźnik zwięzłości skał wg Protodiakonowa – f, kąt tarcia wewnętrznego skał – φ, itp.),
- ciężar objętościowy skał w obrębie strefy odprężonej – γ, MN/m^3.

Wykorzystując założenia hipotezy Cymbariewicza, obciążenie statyczne obudowy definiowane jako ciężar skał zawartych w obrębie strefy odprężonej ogólnie można zapisać w postaci:

$$\overline{q_0} = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} q_0(f, S_W, W_W, \gamma)\cdot g(f, S_W, W_W, \gamma)\cdot df \cdot dS_W \cdot dW_W \cdot d\gamma \tag{5.13}$$

Odchylenia standardowe obciążenia obudowy jako zmiennej losowej można obliczyć ze wzoru:

$$s_{q_0} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}[q_0(f, S_W, W_W, \gamma) - \overline{q_0}]^2 \cdot g(f, S_W, W_W, \gamma)\cdot df \cdot dS_W \cdot dW_W \cdot d\gamma} \tag{5.14}$$

gdzie:

$q_0(f, S_W, W_W, \gamma)$ – funkcja wyrażająca obciążenie statyczne obudowy wg Cymbariewicza w postaci:

$$q_0(f, S_W, W_W, \gamma) = \gamma \cdot \frac{0{,}5 \cdot S_W + W_W \cdot \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\operatorname{arctg} f}{2}\right)}{f} \tag{5.15}$$

$g(f, S_W, W_W, \gamma)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa,

f – wskaźnik zwięzłości skał wg Protodiakonowa,

S_W – szerokość wyrobiska w wyłomie,

W_W – wysokość wyrobiska w wyłomie,

γ – ciężar objętościowy skał.

Rozwiązanie równań (5.13) i (5.14) w przypadku braku znajomości funkcji rozkładu prawdopodobieństwa lub opisu poszczególnych danych równaniami różnych rozkładów jest możliwe tylko przez zastosowanie metody symulacyjnej. Zakładając przedziały zmienności poszczególnych danych w określonych poziomem prawdopodobieństwa wystąpienia

$$f_{\min} \le f \le f_{\max} \ , \tag{5.16}$$

$$\gamma_{\min} \le \gamma \le \gamma_{\max} \ , \tag{5.17}$$

$$S_{W\min} \le S_W \le S_{W\max} \ , \tag{5.18}$$

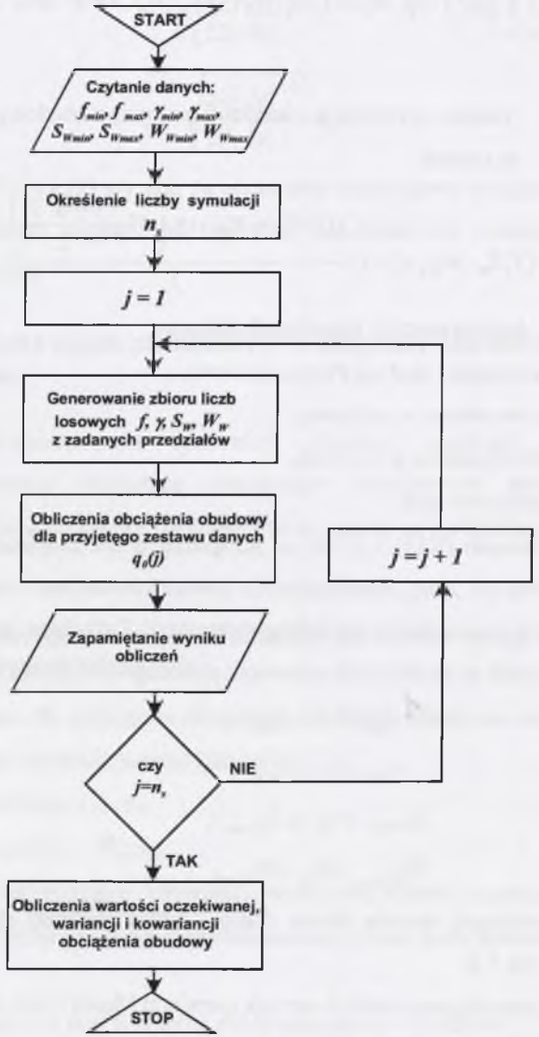
$$W_{W\min} \le W_W \le W_{W\max} \ , \tag{5.19}$$

zadanie można rozwiązać metodą Monte Carlo. Ogólny schemat algorytmu tej metody przedstawiono na rys. 5.2.

Rozwiązanie postawionego zadania metodą symulacji Monte Carlo wymaga generowania znacznej liczby zestawów danych wejściowych, co powoduje, że metoda ta jest bardzo pracochłonna i czasochłonna. Dlatego też dla celów praktycznych, kiedy konieczne jest wykonanie obliczeń dla wielu wyrobisk, można wykorzystać metodę przybliżoną.

Zakładając, że wszystkie dane wejściowe do obliczeń obciążenia obudowy (f, S_W, W_W, γ) opisane normalnym rozkładem prawdopodobieństwa (rozkład Gaussa) charakteryzowane są wartościami średnimi oraz odchyleniami standardowymi, wówczas obciążenie obudowy

w przybliżeniu również ma normalny rozkład prawdopodobieństwa i charakteryzowane może być wartością średnią oraz odchyleniem standardowym.



Rys. 5.2. Ogólny schemat blokowy algorytmu obliczania obciążenia obudowy jako efektu przekroczenia warunku granicznej równowagi górotworu metodą Monte Carlo
Fig. 5.2. Main block diagram of support load calculation algorithm as an effect of rock mass stability overpassing using the Monte Carlo method

Wykorzystując za pracami [5,6,10] równania aproksymacyjne w postaci (5.9) i (5.11), wartość średnią oraz odchylenie standardowe obciążenia statycznego obudowy można zapisać w postaci:

$$\bar{q}_0 = \bar{\gamma} \cdot \frac{0{,}5 \cdot \bar{S}_W + \bar{W}_W \cdot \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\operatorname{arctg} \bar{f}}{2}\right)}{\bar{f}} \tag{5.20}$$

$$s_{q0} = \sqrt{\left(\frac{s_{S_W} \cdot \bar{\gamma}}{2 \cdot \bar{f}}\right)^2 + \left[\frac{\bar{\gamma} \cdot s_{W_W} \cdot \operatorname{tg}\left(45 - \frac{arc\ \operatorname{tg}\ \bar{f}}{2}\right)}{\bar{f}}\right]^2 + \left[\frac{\bar{q}_0}{\bar{f}} + \frac{\bar{W}_W \cdot \bar{\gamma}}{2 \cdot \bar{f} \cdot \left(1 + \bar{f}^2\right) \cdot \cos^2\left(45 - \frac{arc\ \operatorname{tg}\ \bar{f}}{2}\right)}\right]^2 \cdot s_f^2 + \left(\frac{\bar{q}_0}{\bar{\gamma}} \cdot s_\gamma\right)^2} \tag{5.21}$$

gdzie:

$\bar{R}_C$ – średnia wartość wytrzymałości na ściskanie określonego pakietu skał,

s_{Rc} – odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie określonego pakietu skał,

$\bar{S}_W, \bar{W}_W$ – średnia wielkość szerokości i wysokości wyrobiska,

s_{S_W}, s_{W_W} – odchylenie standardowe szerokości i wysokości wyrobiska.

5.3.2. Probabilistyczne ujęcie obciążenia obudowy oparte na równaniach ośrodka złożonego

Probabilistyczne ujęcie obliczania obciążenia obudowy wykorzystujące równania ośrodka złożonego przedstawiono na przykładzie modelu ośrodka sprężysto – plastyczno – spękanego szeroko omówionego w pracach [29,37,104,138,139]. W świetle prezentowanych rozwiązań podstawowymi danymi do obliczeń są:

- szerokość wyłomu wyrobiska – S_W, m,
- wysokość wyłomu wyrobiska – W_W, m,
- głębokość lokalizacji wyrobiska – H, m,
- wytrzymałość na ściskanie – R_c, MPa,
- moduł sprężystości – E, MPa,
- współczynnik Poissona – ν,
- kąt tarcia wewnętrznego – φ, stopnie,
- graniczne odkształcenie sprężyste skał – ε_g, mm/m.,
- ciężar objętościowy skał – γ, MN/m^3.

Uwzględniając charakter procesów naprężeniowo – deformacyjnych, można wyróżnić małą oraz dużą głębokość lokalizacji wyrobiska. W przypadku lokalizacji wyrobiska na małej głębokości w procesie deformacji górotworu, a zatem i obciążania obudowy, bierze udział cały masyw skalny od poziomu wyrobiska do powierzchni terenu, natomiast w przypadku lokalizacji wyrobiska na dużej głębokości oddziaływanie wyrobiska obejmuje pewną część masywu skalnego, poza którą naprężenia w górotworze odpowiadają naprężeniom pierwotnym.

Wykorzystując założenia omawianej metody, wartość średnią i odchylenie standardowe obciążenia statycznego obudowy definiowanego jako ciężar skał zawartych w obrębie strefy odprężonej, strefy plastycznej lub strefy spękań ogólnie można zapisać w postaci:

$$\overline{q_0} = \int_{\Omega} q_0\left(S_W, W_W, H, R_c, E, \nu, \varphi, \varepsilon_g, \gamma\right) \cdot d\mu \tag{5.22}$$

$$s_{q_0} = \sqrt{\int_{\Omega} \left[q_0\left(S_W, W_W, H, R_c, E, \nu, \varphi, \varepsilon_g, \gamma\right) - \overline{q_0}\right] \cdot d\mu} \tag{5.23}$$

$$d\mu = dS_W \cdot dW_W \cdot dH \cdot dR_C \cdot dE \cdot d\nu \cdot d\varphi \cdot d\varepsilon_g \cdot d\gamma \ , \qquad \Omega = R^9 \tag{5.24}$$

gdzie:

$q_0(S_W, W_W, H, R_c, E, \nu, \varphi, \varepsilon_g, \gamma)$ – funkcja wyrażająca obciążenie statyczne obudowy,

$g(S_W, W_W, H, R_c, E, \nu, \varphi, \varepsilon_g, \gamma)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa,

$S_W, W_W, H, R_c, E, \nu, \varphi, \varepsilon_g, \gamma$ – jw.

Rozwiązanie równań (5.22) i (5.23) ze względu złożoność równań opisujących zjawiska zachodzące w modelu, brak funkcji rozkładu prawdopodobieństwa lub ich opis równaniami różnych rozkładów jest możliwe tylko przez zastosowanie metody symulacyjnej. Zakładając przedziały zmienności poszczególnych danych w określonych poziomem prawdopodobieństwa wystąpienia

$$S_{W\min} \le S_W \le S_{W\max}, \tag{5.25}$$

$$W_{W\min} \le W_W \le W_{W\max}, \tag{5.26}$$

$$H_{\min} \le H \le H_{\max}, \tag{5.27}$$

$$R_{c\min} \le R_c \le R_{c\max}, \tag{5.28}$$

$$E_{\min} \le E \le E_{\max}, \tag{5.29}$$

$$\nu_{\min} \le \nu \le \nu_{\max}, \tag{5.30}$$

$$\varphi_{\min} \le \varphi \le \varphi_{\max}, \tag{5.31}$$

$$\varepsilon_{g\min} \le \varepsilon_g \le \varepsilon_{g\max}, \tag{5.32}$$

$$\gamma_{\min} \le \gamma \le \gamma_{\max} \tag{5.33}$$

zadanie można rozwiązać metodą Monte Carlo. Ogólny schemat algorytmu tej metody zaprezentowano na rys. 5.3.

Oznaczenia użyte we wzorach przedstawionych na rys. 5.3.:

k – współczynnik koncentracji naprężeń,

R_{cg} – wytrzymałość obliczeniowa górotworu na ściskanie,

γ_i – wartość ciężaru objętościowego i-tej warstwy górotworu,

h_i – grubość i-tej warstwy górotworu,

h_s – zasięg spękań powstałych w wyniku prowadzenia robót strzałowych,

h_0 – strzałka sklepienia ciśnień,

u_w – wymuszone przemieszczenia obudowy wyrobiska,

r_w – promień zastępczy wyrobiska,

σ_g – naprężenie radialne występujące na granicy strefy sprężystej i plastycznej,

σ_z – ciśnienie pionowe panujące w górotworze w rejonie projektowanego wyrobiska,

β_g – parametr zależny od kąta tarcia wewnętrznego skał w masywie,

φ_g – obliczeniowa wartość kąta tarcia wewnętrznego skał budujących górotwór,

E_g – obliczeniowa wartość modułu sprężystości skał budujących górotwór,

ν_g – obliczeniowa wartość współczynnika Poissona skał budujących górotwór,

ε_g – obliczeniowa wartość granicznego odkształcenia sprężystego skał budujących górotwór,

r_L – promień strefy plastycznej,

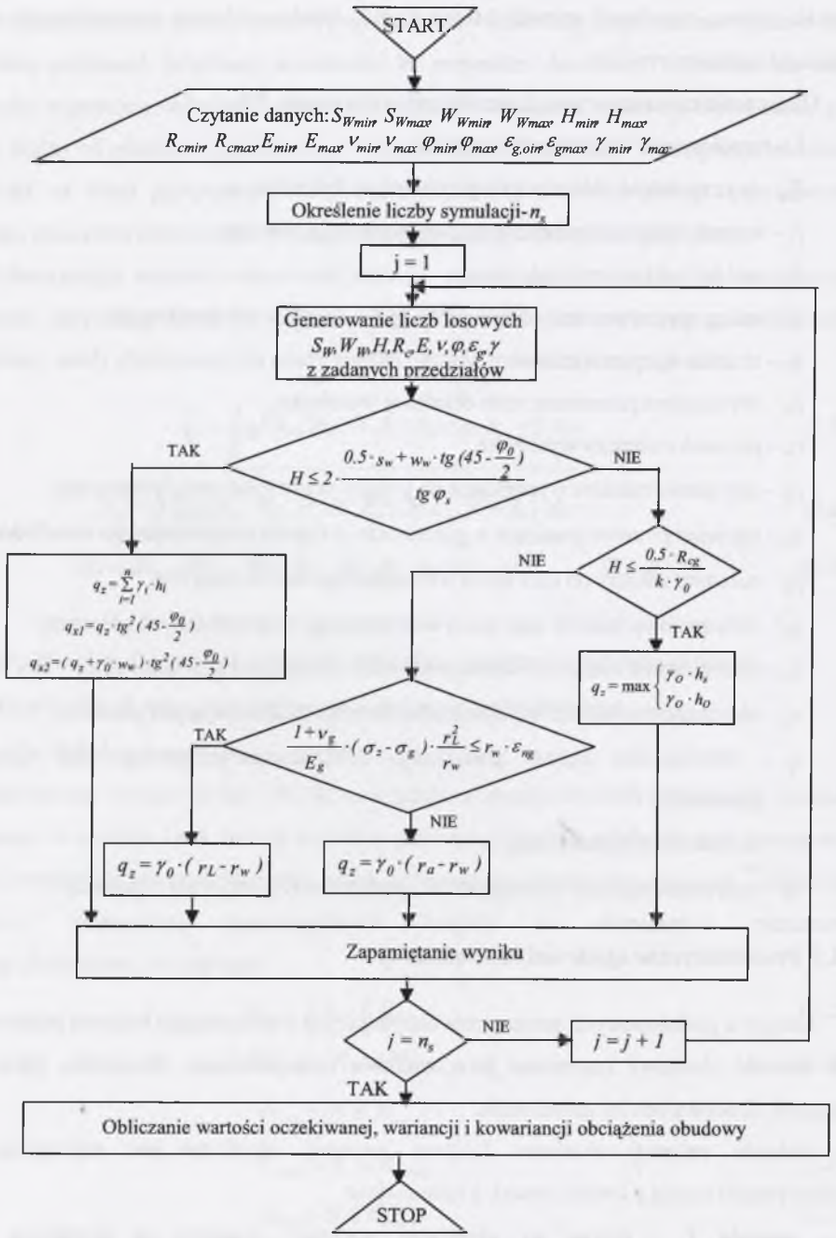
σ_0 – naprężenie radialne występujące na granicy strefy plastycznej i spękanej.

5.3.3. Probabilistyczne ujęcie nośności obudowy

Jednym z podstawowych parametrów decydujących o stateczności budowli podziemnych jest nośność obudowy rozumiana jako wielkość maksymalnego obciążenia, jakie może przenieść obudowa bez jej zniszczenia.

Nośność stalowej obudowy łukowej podatnej określana jest najczęściej przy wykorzystaniu jednej z dwóch metod, a mianowicie:

- **metoda I** – polega na określaniu nośności obudowy na podstawie badań laboratoryjnych,
- **metoda II** – łączy elementy badań stanowiskowych i obliczeń numerycznych, opierając się na analizie rozkładu i wielkości sił wewnętrznych oraz naprężeń w obudowie pod wpływem działającego obciążenia.



Rys. 5.3. Ogólny schemat blokowy algorytmu obliczania obciążenia obudowy wykorzystującego równania ośrodka złożonego metodą Monte Carlo

Fig. 5.3. Main block diagram of support load calculation algorithm using the complex medium equation using the Monte Carlo method

Wymienione powyżej metody polegają na określaniu nośności konstrukcji przy uwzględnieniu dwóch kryteriów, a mianowicie:

- kryterium wytrzymałości kształtownika,
- kryterium nośności zamków obudowy.

Określenie nośności odrzwiowej obudowy podatnej na podstawie badań stanowiskowych polega na badaniu odrzwi usztywnionych w złączach oraz odrzwi podatnych [134]. Do badań każdego kryterium przyjmuje się n odrzwi tej samej serii (rozmiar, konstrukcja, rodzaj materiału itp.) obudowy.

Badania odrzwi usztywnionych w złączach pozwalają na określenie nośności odrzwi ze względu na wytrzymałość kształtownika, a badania odrzwi podatnych pozwalają na określenie nośności ze względu na kryterium nośności zamka obudowy (nośność zsuwna).

Badania odrzwi w stanie usztywnionym polegają na rejestracji deformacji plastycznych odrzwi pod wpływem ich obciążenia. Nośność i–tych odrzwi ze względu na wytrzymałość kształtownika jest to suma maksymalnych wartości sił czynnych zarejestrowanych w czasie badania określona ze wzoru:

$$F_{\max\, i} = \left(\sum_{j=1}^{k} F_j \right)_{\max} \tag{5.34}$$

gdzie:

F_j – wartość j-tej siły czynnej zarejestrowanej w czasie badania,

k – liczba czynnych sił działających na odrzwia w czasie badania.

Wartość średnią oraz odchylenie standardowe nośności odrzwi obudowy ze względu na wytrzymałość kształtownika dla n prób można określić ze wzorów:

$$\overline{P}_{01} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{\max\, i}}{n} \tag{5.35}$$

$$s_{P_{01}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(F_{\max\, i} - \overline{P}_{01} \right)^2}{n-1}} \tag{5.36}$$

gdzie:

$F_{max\, i}$ – maksymalna nośność i-tych odrzwi badanych w stanie usztywnionym,

n – liczba odrzwi danej serii poddanej badaniom w stanie usztywnionym.

Badania odrzwi ze względu na nośność zamków prowadzone są w podobny sposób, jednak rejestracji podlegają wielkości zsuwu w zamkach oraz sił obciążających odrzwia bezpośrednio przed zsuwem. Nośność roboczą i-tych odrzwi określa się ze wzoru:

$$F_{N\,i} = \frac{\sum_{j=1}^{k} F_{z\,j}}{k} \tag{5.37}$$

gdzie:

$F_{z\,j}$ – nośność odrzwi (suma maksymalnych wartości sił czynnych) bezpośrednio przed j-tym zsuwem,

k – liczba zsuwów i-tych odrzwi w złączu w trakcie badań.

Wartość średnią oraz odchylenie standardowe nośności roboczej odrzwi obudowy ze względu na nośność zamka dla n prób można określić ze wzorów:

$$\overline{P}_{02} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_{N\,i}}{n} \tag{5.38}$$

$$s_{P_{02}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(F_{N\,i} - \overline{P}_{02}\right)^2}{n-1}} \tag{5.39}$$

gdzie:

$F_{N\,i}$ – maksymalna nośność i-tych odrzwi badanych w stanie podatnym,

n – liczba odrzwi danej serii poddanej badaniom w stanie podatnym.

Metoda druga polega na obliczeniu sił wewnętrznych i naprężeń w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi obudowy oraz obliczeniu siły osiowej w zamkach odrzwi pod wpływem działającego obciążenia obudowy o równomiernym rozkładzie na całej szerokości wyrobiska. Odrzwia obudowy modeluje się w postaci łuku na sztywnych podporach. Wartości ekstremalne sił wewnętrznych oblicza się na podstawie modelu sprężystego. Nośność obudowy określić można opierając się na przekształconym wzorze na odległość pomiędzy odrzwiami podanym m.in. w pracy [152], traktującym nośność obudowy jako mniejszą wartość obliczaną z kryterium wytrzymałości profilu oraz kryterium nośności zamka. Obliczenia wykonuje się przyjmując następujące założenia:

- odrzwia obudowy poddane są procesowi mimośrodowego ściskania,
- w obliczeniach nośności obudowy pomija się wpływ zwichrzenia profilu łuku oraz współczynnik warunków pracy obudowy,
- rozpatrywany łuk jest statystycznie jednorodny (w każdym punkcie jednakowy przekrój poprzeczny, wskaźnik wytrzymałości na zginanie oraz moment bezwładności przekroju są zmiennymi losowymi o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa),
- materiał łuku jest statystycznie jednorodny,

- odrzwia obciążone są równomiernie na całej szerokości wyrobiska,
- siły wewnętrzne w odrzwiach oblicza się metodą elementów skończonych, przyjmując model sprężysty w postaci łuku na podporach sztywnych.

Traktując obciążenie obudowy oraz parametry charakteryzujące jej konstrukcję i materiał, z którego została wykonana, jako zmienne losowe, nośność obudowy również uznaje się za zmienną losową.

Wykorzystując tak sformułowane założenia, losową nośność obudowy stalowej podatnej określić można ze wzoru :

$$P(\omega) = \min \begin{cases} \dfrac{10^3 \cdot f_d(\omega)(m+n_1)}{d \cdot \left[\dfrac{M_{\max}(\omega)}{W(\omega)} + \dfrac{N_0(\omega)}{\varphi(\omega) \cdot A(\omega)}\right]} \cdot 1m \\ \dfrac{N_Z(\omega)}{d \cdot N(\omega)} \cdot 1m \end{cases} \text{, [kPa],} \tag{5.40}$$

gdzie:

$M_{max}(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmienne j losowej) ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla obciążenia wynoszącego 1 kPa równomiernie rozłożonego na całej szerokości wyrobiska, [kN·m/kPa],

$N_0(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) siły osiowej w miejscu ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla obciążenia wynoszącego 1 kPa równomiernie rozłożonego na całej szerokości wyrobiska, [kN/kPa],

$W(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) wskaźnika zginania przekroju odrzwi obudowy, [m^3],

$\varphi(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) współczynnika wyboczenia,

$A(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) przekroju poprzecznego kształtownika odrzwi obudowy, [m^2],

$N_Z(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) nośności zsuwnej odrzwi obudowy ŁP, [kN],

$N(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) siły osiowej w miejscu zamka odrzwi obudowy dla obciążenia wynoszącego 1 kPa równomiernie rozłożonego na całej szerokości wyrobiska, [kN/kPa],

$f_d(\omega)$ – losowa wartość (wartość zmiennej losowej) wytrzymałości materiału obudowy, [MPa],

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P.3351 07/277
Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 50