

*Andrzej Wichur**

ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA OBUDOWY DŁUGOTRWAŁYCH WYROBISK PODZIEMNYCH

1. Wstęp

Powołanie przedsiębiorstw górniczych specjalizujących się w budownictwie górniczym było konsekwencją programów rozbudowy bazy surowcowej i energetycznej, jako strategicznej gałęzi przemysłu określanej następnie przez długie lata mianem przemysłu narodowego [121]. W latach 1952–1994 wybudowano w Polsce [66] 24 kopalnie węgla kamiennego, kopalnie rud miedzi, kopalnie soli, tworząc od podstaw nowe regiony górnicze, takie jak np. Rybnicki Okręg Węglowy, Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy czy Zagłębie Lubelskie. Dla realizacji tych zadań inwestycyjnych stworzono odpowiednie zaplecze naukowo-badawcze, projektowe, a także powołano nowe kierunki studiów na uczelniach górniczych, kształcące słuchaczy w zakresie projektowania kopalń i budownictwa górniczego. Dzięki tym wszystkim działaniom możliwe było wykonanie olbrzymiego zakresu robót inwestycyjnych, często w bardzo trudnych warunkach geologiczno-górniczych. W latach 1945–89 ogółem zgłębiono ponad 260 km szybów i szybików, wydrążono ponad 9000 km wyrobisk korytarzowych i ponad 39 mln m³ wyrobisk komorowych. W okresie koniunktury na roboty górnicze, w latach 60. i 70. przedsiębiorstwa robót górniczych zatrudniały łącznie około 40 tys. osób, co stanowiło około 8–10% ogółu zatrudnionych w górnictwie podziemnym [121].

Pozyskane w czasie prowadzenia robót doświadczenia techniczne i technologiczne sprzyjały udoskonaleniu metod projektowania i unowocześnianiu technologii. W szczególności dotyczyło to metod projektowania obudowy długotrwałych wyrobisk podziemnych — wyrobisk korytarzowych i szybów. Celem nin. pracy jest przybliżenie tej tematyki specjalistom — projektantom, pokazanie, że projektowanie obudowy wyrobisk podziemnych stanowi pewien proces doskonalenia zasad towarzyszący pogłębianiu wiedzy o własnościach górotworu i materiałów obudowy. W podrozdziale 2 omówiono obecnie stosowane zasady

* Emerytowany profesor zwyczajny AGH, Kraków

projektowania, które poprzedzono krótkim rysem historycznym. Podrozdział 3 poświęcony jest omówieniu ważniejszych modeli obliczeniowych stosowanych obecnie w obliczeniach projektowych. Całość rozważań zakończona jest wnioskami, kreślącymi dalsze kierunki rozwoju metod projektowania obudowy.

2. Zasady projektowania obudowy długotrwałych wyrobisk podziemnych

2.1. Obudowa wyrobisk poziomych [117]

Uwagi ogólne

Znane uwarunkowania historyczne spowodowały, że rozwój budownictwa podziemnego w Polsce w latach powojennych był nierozdzielnie związany z rozwojem górnictwa [64, 66, 86, 119, 120, 125]. Konieczność udostępnienia złóż węgla i rud na coraz większych głębokościach oraz w coraz gorszych warunkach geologiczno-górnictwowych powodowała, że następował rozwój techniki drążenia i obudowy wyrobisk podziemnych, a w szczególności konstrukcji obudowy podziemnych wyrobisk korytarzowych. Występujące warunki naturalne (przede wszystkim zawadnienie i duże wartości obciążeń) wymusiły wprowadzenie do praktyki obudów zespolonych i wielowarstwowych podziemnych długotrwałych wyrobisk korytarzowych [16, 18, 29, 65, 79, 107]. Wykorzystanie korzystnych własności technologicznych betonu natryskowego spowodowało odstąpienie w takich przypadkach od ciężkich obudów sklepionych wykonanych z betonu lub żelbetu na rzecz tzw. obudowy kombinowanej stalowo-betonowej [16, 53, 56, 83, 86], składającej się z betonu natryskowego i łuków stalowych stosowanych powszechnie do obudowy kopalnianych wyrobisk korytarzowych.

Prawdziwa rewolucja w poglądach na pracę obudów zespolonych i wielowarstwowych została dokonana dzięki badaniom b. OBR BG „Budokop”, mającym swe inspiracje w analizie technologii i konstrukcji obudowy wyrobisk podziemnych stosowanych w Nowej Austriackiej Metodzie Budowy Tuneli (skrót niem. NÖT, skrót ang. NATM) [80]. Do praktyki polskiego budownictwa podziemnego wprowadzono tzw. obudowy powłokowe, definiowane jako obudowy złożone z cienkiej warstwy (lub kilku cienkich warstw) materiału konstrukcyjnego, ukształtowanej według powierzchni zakrzywionej i ściśle przylegającej do górotworu. Te cechy konstrukcyjne powodują, że w obudowie praktycznie nie pojawiają się momenty zginające i obudowa pracuje na ściskanie i ścinanie, co gwarantuje lepsze wykorzystanie własności wytrzymałościowych betonu, stanowiącego główną część obudowy powłokowej, a w konsekwencji umożliwia bardziej ekonomiczne wymiarowanie obudowy. Obudowy powłokowe stosowane są obecnie powszechnie do zabezpieczania podziemnych wyrobisk korytarzowych i komorowych o długim czasie eksploatacji w różnorodnych warunkach geologiczno-górnictwowych — od bardzo korzystnych (obudowa z betonu natryskowego) do skrajnie niekorzystnych (obudowa stalowo-betonowa i kotwiowo-betonowo-stalowa). W przypadku większych grubości (przekraczających 3–4% szerokości wyłomu wyrobiska) obudowa po-

włokowa traci swoje korzystne własności statyczne i przechodzi w obudowę sklepioną. Wodoszczelność obudów powłokowych osiąga się zwykle poprzez pozostawienie w betonie rurek iniekcyjnych, a następnie wykonanie iniekcji uszczelniającej [92] — najczęściej stosowanymi iniektami są zaczyny cementowe i żywice poliuretanowe. Tak wykonane obudowy powłokowe są szczególnie chętnie stosowane przy przechodzeniu zawodnionych uskoków [29]. W przypadku konieczności uzyskania lepszej wodoszczelności stosuje się obudowy wielowarstwowe — na ociosy wyrobiska nanosi się beton natryskowy, na którym układa przeponę hydroizolacyjną, a następnie, z użyciem stalowego deskowania przestawnego, wykonuje się żelbetową lub betonową obudowę ostateczną [91].

Do wymiarowania opisanych konstrukcji obudów opracowano nowe metody obliczeń. Stosowane w okresie powojennym [6, 8, 37, 78, 90] rozwiązania okazały się nieprzydatne w napotykanym coraz częściej trudnych warunkach geologiczno-górnictwowych (większe głębokości, zawodnienie, większe przekroje poprzeczne i in.). Konieczne stało się opracowanie nowych zasad uwzględniających te uwarunkowania, opartych na podstawach naukowych oraz ściśle powiązanych z systemem obowiązujących norm projektowych. Znaczącym krokiem w tym kierunku były badania przeprowadzone w b. OBR BG „Budokop” [52, 84, 87, 122]. Badania te zostały wykorzystane przy opracowywaniu norm branżowych [7, 9, 10]. Praktyczne użycie tych metod w projektowaniu stworzyło możliwość rozszerzenia ich zakresu stosowania do projektowania obudów długotrwałych wyrobisk podziemnych w budownictwie górnictwowych, hydrotechnicznym i komunikacyjnym [27, 28] objętego nowo opracowanymi normami [75, 76].

Dobór parametrów geomechanicznych górotworu

W projektowaniu budowli podziemnych warunki pracy konstrukcji zależą od rodzaju górotworu, który charakteryzuje jego parametry geomechaniczne. Parametry te określane są na drodze badań laboratoryjnych i oceny makroskopowej. Badaniami laboratoryjnymi obejmuje się próbki skał budujących górotwór, w którym projektowane jest wyrobisko. Omawiane normy [75, 76] przewidują wyznaczenie następujących parametrów skał: wytrzymałość na ściskanie R_{cs} , wytrzymałość na rozciąganie R_{rs} , liczba Poissona ν_s oraz współczynnik sprężystości E_s , graniczne jednostkowe odkształcenie podłużne ϵ_{ns} , gęstość objętościowa (gęstość pozorna) ρ , kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s i spójność c_s , pozorny kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s , wskaźnik zwięzłości według Protodiakonowa f , podzielność skał oraz liczba rozmakalności r według GIG.

Wyznaczone w ten sposób parametry opatrzone są wskaźnikiem s co oznacza, że dotyczą one skał czyli utworów budujących górotwór. Wieloletnie doświadczenia i obserwacje wykazały, że parametry geomechaniczne górotworu są wypadkową parametrów geomechanicznych budujących go skał oraz czynników strukturalnych takich jak podzielność, szczelinowatość, odporność na działanie wody itp. W normie [75] uwzględniono wpływ podzielności i rozmakalności. Parametry geomechaniczne utworów litologicznych dla górotworu wyznaczane są obliczeniowo przy zastosowaniu odpowiednich współczynników [75]. Określone w ten sposób, wyszczególnione wyżej parametry, oznacza się wskaźnikiem L_g i nazywa

parametrami geotechnicznymi górotworu. Dokładne określenie parametrów geomechanicznych jest istotne dla obliczeń wartości obciążeń, dlatego norma zaleca również określanie ich badaniami *in situ*.

Obciążenie obudowy powłokowej

Obciążenie charakterystyczne q_N obudowy powłokowej przyjmuje się równe ciśnieniu górotworu na obudowę określone według modelu fizycznego, odpowiednio dobranego do istniejących lub przewidywanych warunków górniczo-geologicznych. Wartość wymuszonego przemieszczenia obudowy u_w przyjmuje się równą końcowemu przemieszczeniu radialnemu konturu wyrobiska, określone dla dobrego modelu.

W normie [76] przewidziano dwa podstawowe modele obliczeniowe obciążeń:

- model ośrodka sprężystego,
- model ośrodka trójfazowego (sprężysto-plastyczno-spełanego).

Przy wyborze modelu ośrodka operuje się kryterium głębokości krytycznej H_{kr} . Jest to głębokość, do której, w określonych warunkach po wykonaniu wyrobiska, górotwór zachowuje własności ośrodka sprężystego; dla tych warunków ma zastosowanie model ośrodka sprężystego. W kryterium głębokości krytycznej przyjęto założenie, że górotwór zachowuje własności sprężyste, gdy ciśnienie pierwotne nie przekracza 50% wytrzymałości górotworu na jednoosiowe ściskanie R_{cg} (odpowiada to przyjęciu wartości współczynnika koncentracji naprężeń na ociosach wyrobiska równej 2,0). Poniżej tej głębokości zastosowanie ma model ośrodka trójfazowego — bliższe informacje o tym modelu zawarte są w podrozdziale 3 niniejszego artykułu.

Obciążenie obudowy sklepionej

Przyjmuje się następujące obciążenia obudowy sklepionej [75]:

- ciśnienie statyczne górotworu stropowe, ociosowe i spągowe,
- ciśnienie deformacyjne górotworu,
- ciężar własny obudowy,
- ciśnienie iniekcyjne,
- w przypadku sztolni hydrotechnicznych — dodatkowo ciśnienie wody wewnątrz wyrobiska.

Obciążenia mogą występować w następujących przypadkach:

- równoczesne działanie ciężaru własnego obudowy i ciśnienia statycznego górotworu,
- równoczesne działanie ciężaru własnego obudowy i ciśnienia deformacyjnego górotworu,
- równoczesne działanie ciężaru własnego obudowy i ciśnienia iniekcyjnego.

W przypadku sztolni hydrotechnicznych należy dodatkowo uwzględnić ciśnienie wody wypełniającej sztolnię.

Dla określenia ciśnienia statycznego górotworu w zależności od warunków lokalizacji wyrobiska przewidziano pięć modeli obliczeniowych:

- 1) dla wyrobisk zalegających płytko, gdy grubość górotworu nad stropem jest nie większa od dwukrotnego zasięgu strefy odprężonej obliczonej jak dla modelu ze sklepieniem odciążającym (tzw. model płytko zalegającego wyrobiska, w którym na obudowę działa pełny ciężar górotworu zalegającego nad obudową);
- 2) dla wyrobisk zalegających na niewielkiej głębokości w skałach luźnych (gruntach nieskalistych), w których występuje efekt sił tarcia na płaszczyznach pionowych według Bierbaumera;
- 3) dla górotworu, w którym po wykonaniu wyrobiska nad jego stropem wytwarza się sklepienie odciążające, natomiast ociosy nie przejmują w pełni ciężaru nadkładu i nie występuje ciśnienie deformacyjne (model Cymbariewicza);
- 4) dla górotworu jako ośrodka sprężystego, w którym po wykonaniu wyrobiska ustala się stan samonośności w obszarze o kształcie eliptycznym (model Protodiakonowa);
- 5) przypadek występowania ciśnień spągowych, rozpatrywany łącznie z modelami 1–4.

W przypadku górotworu o własnościach reologicznych, położonego poniżej głębokości krytycznej, ma zastosowanie model ciśnień deformacyjnych, uwzględniający powstanie strefy plastycznej i spękanaj.

Wartość obciążeń statycznych na obudowę pochodzi od objętości górotworu znajdującego się bezpośrednio pomiędzy stropem wyrobiska i naturalnym sklepieniem odciążającym; w przypadku wyrobisk zlokalizowanych w gruntach nieskalistych (skałach luźnych) dodatkowo uwzględnia się obciążenia poziome od strony ociosów. W przypadku występowania ciśnień deformacyjnych obciążenia przyjmuje się jak dla obudowy powłokowej, natomiast zakłada się, że wymuszone przemieszczenia górotworu przejmuje obudowa wstępna.

Sprawdzenie nośności obudowy powłokowej

Konstrukcyjne cechy obudowy powłokowej (kształt łukowy, mała grubość i powiązanie z górotworem) powodują, że w obudowie tej występują niewielkie momenty zginające i obudowę można obliczać na ściskanie i ścinanie [52]. Potwierdzają to obserwacje dokonane w tunelach drążonych przy użyciu NATM [80], zgodnie z którymi zniszczenie obudowy następuje na skutek osiągnięcia granicy wytrzymałości na ściskanie lub ścinanie w dwóch przekrojach symetrycznych względem pionowej osi wyrobiska. Wykorzystując to spostrzeżenie, konstruuje się warunki równowagi granicznej powłoki dla poszczególnych rodzajów obudowy:

- w przypadku obudowy z betonu natryskowego i obudowy stalowo-betonowej — na ścinanie (por. podrozdz. 3),
- w przypadku obudowy kotwiowo-betonowej i kotwiowo-betonowo-stalowej — na ściskanie i ścinanie.

W efekcie uzyskuje się bardzo proste wzory, w których unika się pracochłonnego obliczania sił wewnętrznych metodami statyki budowli.

We wzorach tych wykorzystane są pewne dodatkowe założenia związane z kształtowaniem się wartości parametrów materiałowych:

- w przypadku betonu natryskowego przyjmuje się, że jego wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie jest równa podwojonej wytrzymałości obliczeniowej betonu niezbrojonego na rozciąganie, a wczesna wytrzymałość jest równa 50% wytrzymałości po 28 dniach;
- w przypadku stali wartość wytrzymałości obliczeniowej na ścinanie przyjmuje się równą 0,6 wytrzymałości obliczeniowej na rozciąganie i ściskanie oraz, dodatkowo, ze względu na niepełne uplastycznienie stali w tych obudowach, że nośność elementów stalowych jest wykorzystana jedynie w 50%;
- wartość spójności resztkowej na płaszczyznach ścięcia skotwionego sklepienia skalnego jest równa $0,03 f$ (por. [124]).

Postać wzorów jest zgodna z metodą stanów granicznych, a podstawowe parametry wytrzymałościowe zawarte są w powszechnie stosowanych normach.

W skład obudowy powłokowej wchodzi również kotwie, dlatego w tym miejscu należy wspomnieć o obudowie kotwowej. Wdrożenie obudowy kotwowej w latach 70. było poważnym osiągnięciem polskiego budownictwa podziemnego [95]. Wdrożeniu temu towarzyszyło opracowanie, a następnie doskonalenie metodyki jej projektowania [31, 63, 77, 96, 123]. Osiągnięcia te zostały wzbogacone badaniami przedstawionymi m.in. w pracach [13–15, 25, 39, 47–50, 55, 61, 67]. W chwili obecnej procedury projektowania i wykonywania obudowy kotwowej są szczegółowo uregulowane górnictwymi przepisami bhp [82].

Przy omawianiu postępu w zakresie obudowy wyrobisk korytarzowych należy również wspomnieć o rozwoju stalowej obudowy łukowej podatnej ŁP [95]. Obudowa ta od lat stanowi przeważający typ obudowy wyrobisk korytarzowych, zatem zrozumiałe stało się podjęcie wysiłków w kierunku opracowania metody jej projektowania. Do najbardziej znanych prób rozwiązania tego zadania należy zaliczyć prace [1, 16, 32, 33, 54, 87]. Przełom przyniosła zmiana górnictwowych przepisów bhp [81], która stanowiła w § 197 ust. 1 p. 3), że *doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny należy dokonywać w oparciu o zasady określone przez rzeczoznawcę, wskazanego przez Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego*. Na podstawie upoważnienia Prezesa WUG zostały wykonane i uzyskały pozytywną opinię Komisji do spraw Obudowy Wyrobisk Korytarzowych i Komorowych trzy opracowania [17, 23, 85], które znane są pod nazwą „normatywnych” zasad projektowania obudowy stalowej łukowej podatnej stosowanej w podziemnych zakładach górniczych. Ustalenia § 197 nie znalazły odpowiednika w nowej wersji przepisów [82], w związku z tym opracowane *Zasady* straciły moc obowiązującą, ale są stosowane w zakładach górniczych — oczywiście na odpowiedzialność kierownika działu robót górniczych odpowiedzialnego za dobór obudowy oraz kierownika ruchu zakładu górniczego zatwierdzającego projekt techniczny eksploatacji lub drażenia wyrobiska. Obecnie obserwuje się tendencje do oparcia projektowania obudowy ŁP na badaniach doświadczalnych *in situ* [40–46, 51, 103] oraz na szerszym wykorzystaniu metod probabilistycznych [22, 24].

Sprawdzenie nośności obudowy sklepionej

Obudowy sklepione, ze względu na swoją grubość, tracą korzystne cechy obudów powłokowych — w tym przypadku pominięcie momentów zginających w obudowie jest niemożliwe. W związku z tym wymiarowanie obudowy przeprowadza się w dwóch zasadniczych etapach:

- obliczenie sił wewnętrznych,
- sprawdzenie nośności przekrojów.

Zgodnie z normą [75] obudowy sklepione należy obliczać jako konstrukcje łukowe, ramowo-łukowe lub pierścieniowe, współpracujące z otaczającym górotworem. Współpracę górotworu z obudową należy uwzględniać, przyjmując w schemacie statycznym ciągłe lub punktowe sprężyste rozparcia (wahacze), rozmieszczone w tych odcinkach obwodu obudowy, w których oś odkształcona ustroju podstawowego statycznie wyznaczalnego przemieszcza się na zewnątrz (tj. w stronę górotworu). Współpracę z górotworem można pominąć w skałach ciekłych (kurzawkowych) i mało spoiстых. Norma podaje proste wzory do wstępnego przyjmowania wymiarów obudowy.

Nośność obudowy należy sprawdzać w najbardziej wyężonych przekrojach obudowy. Sprawdzanie nośności należy wykonywać zgodnie z odpowiednimi normami [70–72], z uwzględnieniem pewnych specyficznych cech konstrukcji obudowy, np. związanie obudowy betonowej i żelbetowej z górotworem powoduje możliwość odstąpienia od uwzględniania w obliczeniach wpływu smukłości. W przypadku określania wartości długości obliczeniowych łuków sklepień wykorzystano rozwiązanie zadania utraty stateczności łuku dwuprzegubowego obciążonego ciśnieniem hydrostatycznym (por. [97]).

Cechy wytrzymałościowe materiałów obudowy sklepionej należy przyjmować zgodnie z odpowiednimi normami [70–72], przy czym również i w tym przypadku uwzględniono pewne dotychczasowe doświadczenia budownictwa podziemnego: wartość wytrzymałości obliczeniowej na ściskanie muru z cegły pozostawiono jak w normie [7] (osiągnięto to poprzez wprowadzenie dodatkowego współczynnika korekcyjnego m_c).

Dotychczasowa praktyka projektowa potwierdza słuszność przyjętych założeń obliczeniowych.

2.2. Obudowa szybów

Uwagi ogólne

Powstaniu zasad obliczania obudowy szybowej towarzyszyła podobna historia. W związku z głębszymi szybami w coraz trudniejszych warunkach hydrogeologicznych (duże grubości zawoźnionego nadkładu) powstała konieczność opracowania i wdrożenia nowych konstrukcji obudowy wodoszczelnej o dużej nośności [62]. Okazało się przy tym, że zastosowanie w tych warunkach klasycznych wzorów do obliczania grubości obudowy szybowej [34, 98] prowadziło do nadmiernych grubości obudowy. Wynikła stąd konieczność przepro-

wadzenia odpowiednich prac badawczych. Prace te podjęto w wielu ośrodkach naukowo-badawczych, a najbardziej znane rezultaty osiągnięto w b. Zakładzie Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego [103, 113–115]. Prace te zostały wdrożone w opracowanych projektach norm branżowych [2, 4]. W następnych latach metodyka ta ulegała praktycznej weryfikacji i niewielkim zmianom [105, 106], uwzględnionych w normach [3, 5]; obecnie zasady te zawarte są w normach [73, 74]. Wieloletni okres stosowania ww. norm potwierdził praktyczną przydatność opracowanej metodyki obliczeń.

Obliczanie obciążeń

Podstawowym zamierzeniem przy opracowywaniu projektów norm było niewprowadzanie zasadniczych zmian do praktyki obliczeniowej, tj. zachowanie stosowanych wzorów: Cymbariewicza (na obliczanie ciśnienia górotworu) oraz Hubera (na obliczanie grubości obudowy) [104]. Wzory te, stosowane od wielu lat, spowodowały wykształcenie się u projektantów pewnych nawyków, będących wynikiem praktyki projektowej; uznano zatem, że należy je jedynie dostosować do aktualnego poziomu wiedzy i techniki projektowania i głębienia szybów. Podstawowym założeniem było wprowadzenie, zaproponowanej przez autora w pracy [99], koncepcji obciążenia charakterystycznego (normowego) i obliczeniowego obudowy szybu.

Obciążenie charakterystyczne (normowe) obudowy szybu (na głębokości H) określono [2, 74, 99, 113–115] jako równomiernie rozłożone na obwodzie obciążenie przekroju poziomego obudowy szybu (na głębokości H), równoważne (oczywiście w sensie wyężenia tego przekroju obudowy) działaniu średniej wartości obciążenia w tym przekroju obudowy szybu w przeciętnych warunkach. Definicja ta pozwoliła na powiązanie postanowień opracowanych norm [2, 4, 73, 74] z systemem Polskich Norm [68, 69] oraz umożliwiła adaptację tradycyjnych wzorów do określania wymiarów obudowy [104]. Jednocześnie określenie to pozwala na wykorzystanie do celów projektowania wyników pomiarów obciążeń obudowy szybów, co będzie miało w przyszłości prawdopodobnie coraz większe znaczenie; sposób postępowania w takim przypadku omówiono szczegółowo w pracy [115].

Po wprowadzeniu pojęcia obciążenia charakterystycznego można było już łatwo, w ślad za normami [68, 69], zastosować do celów obliczania obudowy szybów pojęcie współczynnika obciążenia (przeciążenia) jako współczynnika uwzględniającego prawdopodobieństwo występowania wielkości obciążeń o wartościach niekorzystniejszych od obciążeń charakterystycznych. Podobnie postąpiono z wprowadzeniem pojęcia obciążenia obliczeniowego jako iloczynu obciążenia charakterystycznego przez współczynnik obciążenia (przeciążenia) [104].

Wprowadzenie pojęcia głębokości krytycznej [104] pozwoliło na uniknięcie przewymiarowań obudowy w skałach zwięzłych na niewielkich głębokościach, a zróżnicowanie wartości współczynnika obciążenia — na uwzględnienie w obliczeniach wpływu średnicy szybu, odległości przekroju szybu od wlotu do podszybia oraz odprężającego działania warstw mocnych na położoną między nimi warstwę słabą — czynniki te nie były dotychczas uwzględniane, a ich wpływ na wartości obciążenia obudowy szybowej stwierdzono w trakcie pomiarów obciążeń obudowy [113–115]. Należy podkreślić, że zaproponowane

pojęcie głębokości krytycznej zostało w późniejszym terminie zastosowane przy projektowaniu obudów sklepionych i powłokowych [7, 9]. Uwzględniono również zjawisko stabilizacji obciążenia obudowy na dużych głębokościach (tzw. głębokość graniczna, ważna zwłaszcza w pokładach węgla na dużych głębokościach) [3, 74, 106]. Przy obliczaniu obciążenia ze strony ciśnienia wody wprowadzono zasadę [3, 74], że wartość tego ciśnienia oblicza się w oparciu o prognozowane warunki hydrogeologiczne po zgłębieniu szybu, uwzględniając technologię jego głębenia (zamrażanie górotworu, wstępne uszczelnianie lub drenaż górotworu oraz zastosowanie obudowy betonowej w warstwach górotworu o niewielkiej przepuszczalności).

Obliczanie grubości obudowy

Do obliczania grubości obudowy betonowej pojedynczej zaproponowano poprawiony przez autora wzór Hubera [113–115]:

$$d_b = a \cdot \left(\sqrt{\frac{R_{bb}}{R_{bb} - m \cdot p \cdot \sqrt{3}}} - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie:

d_b — grubość obudowy betonowej pojedynczej szybu, m,

a — promień szybu w świetle obudowy, m,

p — obciążenie obliczeniowe obudowy szybu, MPa,

R_{bb} — wytrzymałość obliczeniowa betonu niezbrojonego na ściskanie, MPa — według normy [71] (obecnie: f_{cd}^* — według PN-B-03264:2002 [72], MPa),

m — współczynnik korekcyjny, uwzględniający nierównomierność obciążenia ($m = 0,95 \div 1,15$).

W przypadku szybów głębiionych z użyciem metody zamrażania górotworu przyjęta grubość obudowy betonowej nie powinna być mniejsza od wartości minimalnej $0,35 \div 0,50$ m, zależnej od temperatury zamrożonego ociosu.

Podobny wzór zastosowano do obliczania grubości obudowy z cegły i betonitów, przy czym grubość obudowy z betonitów zalecono obliczać metodą naprężeń dopuszczalnych. W ostatniej wersji normy [73] wprowadzono, w ślad za badaniami [118] wzór na wytrzymałość obliczeniową na ściskanie muru z paneli:

$$R_p = 0,5R_{bb} \quad (2)$$

w którym:

R_p — wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie muru z paneli, MPa,

R_{bb} — wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie betonu niezbrojonego, z którego wykonano panel, MPa – według normy [71] (obecnie: f_{cd}^* — według PN-B-03264: 2002 [72], MPa).

Przy obliczaniu grubości obudowy wielowarstwowej (rozdzielnej) przyjęto stosowany w praktyce projektowej rozdział obciążenia: obciążenie ze strony wody działa na wewnętrzny (wodoszczelny) pierścień obudowy (np. beton z warstwą folii hydroizolacyjnej), a obciążenie ze strony górotworu działa na zewnętrzny pierścień obudowy (obudowę wstępną). W pracy [20] przeprowadzono analizę nośności segmentowej obudowy szybu upodatkowanej materiałem nieliniowo sprężystym.

W przypadku obudowy zespolonej szybowej z materiałów niemetalicznych (np. mur z cegły, betonitów, beton, żelbet) zastosowano klasyczny wzór teorii sprężystości, a w przypadku obudowy zespolonej tubingowo-betonowej oraz stalowo-betonowej — zmodyfikowane przez krajowych projektantów wzory F. Mohra [58, 98]. Wartości parametrów mechanicznych obudowy dobierane są z odpowiednich Polskich Norm stosowanych w obliczeniach konstrukcji budowlanych (por. podrozdział 2.1).

Bardziej szczegółowe informacje dotyczące obliczania obudów szybowych można znaleźć w pracy [105]; opisowi niektórych modeli obliczeniowych jest poświęcony podrozdział 3.

3. Wybrane modele obliczeniowe

3.1. Model pracy obudów powłokowych na ścinanie

Jak już wspomniano, obudowy powłokowe odznaczają się trzema zasadniczymi cechami:

- są cienkie,
- są ukształtowane według powierzchni zakrzywionej,
- ściśle przylegają do górotworu.

Powoduje to, że w obudowach tych praktycznie zanikają momenty zginające, a co za tym idzie — nie powstają naprężenia rozciągające przy działaniu zwykle występujących obciążeń i obudowa, wykonana z materiału o niewielkiej wytrzymałości na rozciąganie (betonu), jest w mniejszym stopniu narażona na zniszczenie. Zjawisko zaniku momentów zginających w obudowach powłokowych wiąże się z występowaniem na kontakcie obudowy z górotworem naprężeń (obciążeń) stycznych, spowodowanych tarciem i przyczepnością [11, 12, 35, 36, 101, 112]. Jest rzeczą oczywistą, biorąc pod uwagę silnie rosnącą wraz z grubością sztywność zginania obudowy, że zjawisko to wystąpi wyraźnie w przypadku obudów cienkich. Doświadczenia i obserwacje obudowy z betonu natryskowego, przeprowadzone w trakcie wdrażania Nowej Austriackiej Metody Drażenia Tuneli (NATM) [80, 88] wykazały, że zniszczenie powłoki z betonu natryskowego jest spowodowane przekroczeniem jego wytrzymałości na ścinanie — wynik ten przyjęto jako podstawowe założenie przy opracowywaniu metodyki obliczeń statycznych obudów powłokowych [52, 122], co pozwoliło na wprowadzenie do praktyki projektowej prostych wzorów.

Biorąc to pod uwagę przyjęto (rys. 1), że ściecie powłoki następuje w dwóch przekrojach oddalonych od osi pionowej o kąt α warunek równowagi granicznej ma następującą postać:

$$2 \cdot \frac{g \cdot b}{\cos \alpha} \cdot R_{bt,t} \geq 2q_0 \cdot b \cdot r_0 \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

gdzie:

g — grubość powłoki, m,

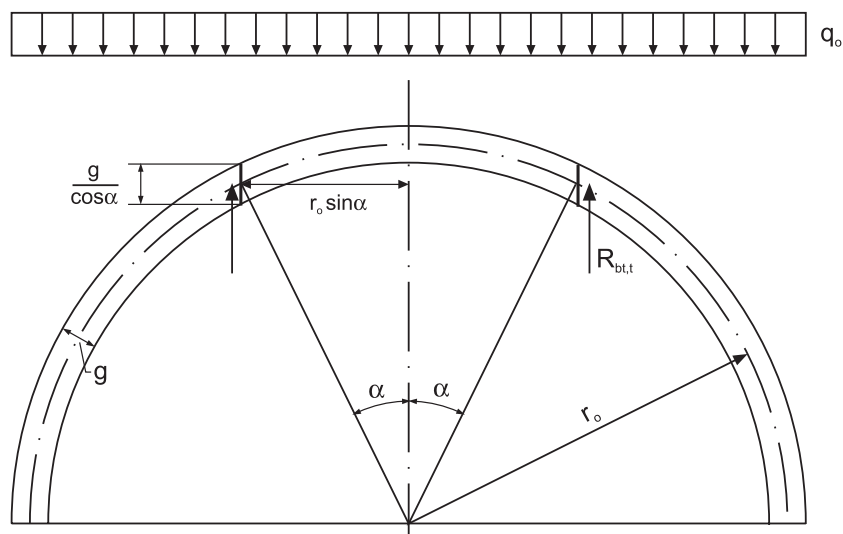
b — obliczeniowy wymiar wzdłuż osi wyrobiska, m ($b = 1,0$ m),

r_0 — promień środkowej powierzchni powłoki, m,

q_0 — obciążenie obliczeniowe powłoki, MPa,

α — azymut przekroju ścinanego,

$R_{bt,t}$ — wytrzymałość obliczeniowa betonu natryskowego na ścinanie w chwili t (tj. w chwili działania obciążenia obliczeniowego = wczesna wytrzymałość betonu natryskowego na ścinanie), MPa.



Rys. 1. Równowaga graniczna powłoki z betonu natryskowego (według normy [78])

Po uwzględnieniu, że zachodzi:

$$R_{bt,t} = \frac{1}{2} R_{bt} \quad (4)$$

oraz (z obwiedni kół Mohra):

$$R_{bt} = 2R_{bbz} \quad (5)$$

gdzie:

R_{bt} — wytrzymałość obliczeniowa betonu na ścinanie po 28 dniach, MPa.

R_{bbz} — wytrzymałość obliczeniowa betonu niezbrojonego na rozciąganie (według normy [71]), MPa;

otrzymuje się po przekształceniu wzór:

$$g \geq \frac{q_o \cdot r_o}{2R_{bbz}} \cdot \sin 2\alpha \quad (6)$$

z którego wynika, że w najbardziej niebezpiecznym przekroju ($\alpha = 45^\circ$) powinien być spełniony warunek:

$$g \geq \frac{q_o \cdot r_o}{2R_{bbz}} \quad (7)$$

Wzór (7) stanowi podstawę do sprawdzenia grubości obudowy z betonu natryskowego [76].

3.2. Ośrodek trójfazowy w projektowaniu obudów powłokowych i sklepionych

Poważnym osiągnięciem polskiego budownictwa podziemnego było opracowanie i wdrożenie w projektowaniu [52, 75, 76, 122] trójfazowego modelu górotworu, wykazującego własności ośrodka sprężysto-plastyczno-spekąnego. W zależności od stanu wyężenia ośrodek ten może znajdować się w stanie sprężystym, plastycznym lub spekąnym, przy czym warunek plastyczności na granicy strefy sprężystej i plastycznej wokół wyrobiska o przekroju kołowym dany jest znanym wzorem mechaniki gruntów (napężenia ściskające dodatnie):

$$\sigma_t = \frac{1 + \sin \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \cdot \sigma_r + \frac{2c_g \cdot \cos \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \quad (8)$$

w którym:

σ_t — napężenie obwodowe, MPa,

σ_r — napężenie radialne, MPa,

Φ_g — kąt tarcia wewnętrznego górotworu (masywu górotworu),

c_g — spójność (kohezja) górotworu (masywu górotworu), MPa.

Równość (8) można przekształcić do postaci bardziej przydatnej w projektowaniu:

$$\begin{aligned}
 \sigma_t &= \frac{1 + \sin \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \cdot \sigma_r + \frac{2c_g \cdot \cos \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} = \\
 &= \frac{1 - \sin \Phi_g + 2 \sin \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \cdot \sigma_r + \frac{2c_g \cdot \cos \Phi_g}{(1 - \sin \Phi_g)} \cdot \frac{\operatorname{tg} \Phi_g}{\operatorname{tg} \Phi_g} = \\
 &= \left(1 + \frac{2 \sin \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \right) \cdot \sigma_r + c_g \cdot \frac{2 \sin \Phi_g}{(1 - \sin \Phi_g) \cdot \operatorname{tg} \Phi_g} = \\
 &= (1 + \beta_g) \cdot \sigma_r + c_g \cdot \frac{\beta_g}{\operatorname{tg} \Phi_g}
 \end{aligned} \tag{9}$$

przy czym:

$$\beta_g = \frac{2 \sin \Phi_g}{1 - \sin \Phi_g} \tag{10}$$

W stanie jednoosiowego ściskania zachodzi:

$$\sigma_t = R_{cg}$$

oraz

$$\sigma_r = 0$$

(gdzie R_{cg} oznacza wytrzymałość na ściskanie górotworu), a zatem musi być:

$$c_g \cdot \frac{\beta_g}{\operatorname{tg} \Phi_g} = R_{cg} \tag{11}$$

Prowadzi to do warunku plastyczności stosowanego w normach [75, 76] (por. [122, 38]:

$$\sigma_t = (1 + \beta_g) \cdot \sigma_r + R_{cg} \tag{12}$$

Właściwości deformacyjne ośrodka trójfazowego opisuje linia łamana (rys. 2):

- w fazie sprężystej (1): linia prosta nachylona pod kątem $\operatorname{arctg} E_g$, gdzie E_g — oznacza współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) górotworu;

— w fazie plastycznej (2):

$$\frac{R_{cg}}{E_g} < \varepsilon_t < \varepsilon_{ng} \quad (13)$$

gdzie:

- ε_t — odkształcenie względne obwodowe górotworu,
- ε_{ng} — graniczna wartość odkształcenia względnego górotworu przy ścisaniu jednoosiowym (określona z badań jednoosiowego ścisania).

W fazie plastycznej następuje spadek wytrzymałości na ścisanie do wartości:

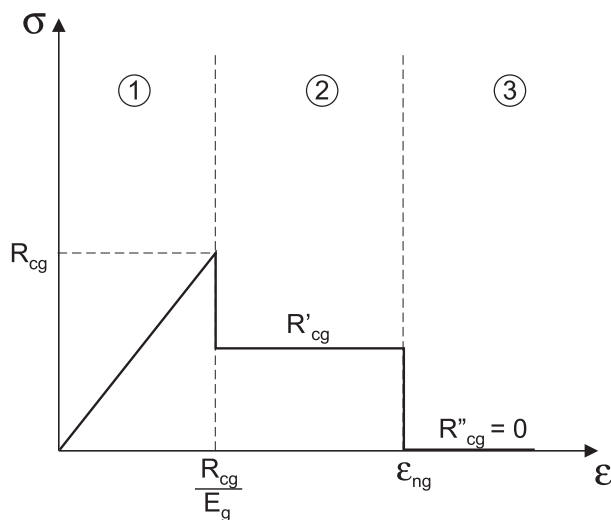
$$R'_{cg} = (0,4 \div 0,6) \cdot R_{cg} \quad (14)$$

gdzie R'_{cg} oznacza wytrzymałość na ścisanie górotworu w fazie plastycznej;

— w fazie spękań (3):

$$\varepsilon_t > \varepsilon_{ng} \quad (15)$$

$$R''_{cg} = 0 \quad (16)$$



Rys. 2. Zależność $\sigma(\varepsilon)$ dla ośrodka trójfazowego:
1 — faza sprężysta; 2 — faza plastyczna; 3 — faza spękań

Właściwości wytrzymałościowe ośrodka trójfazowego opisują trzy prostoliniowe obwiednie kół Mohra (rys. 3):

— w fazie sprężystej (1)

$$\sigma_t = (1 + \beta_g) \cdot \sigma_r + R_{cg} \quad (17)$$

— w fazie plastycznej (2)

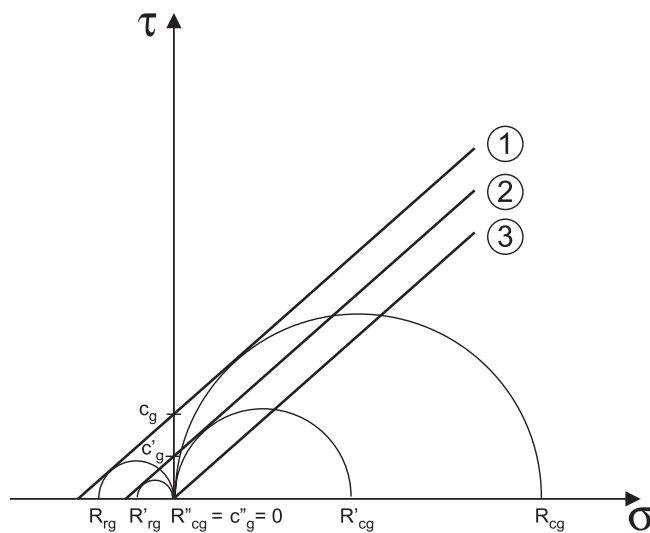
$$\sigma_t = (1 + \beta_g) \cdot \sigma_r + R'_g \quad (18)$$

— w fazie spękań (3)

$$\sigma_t = (1 + \beta_g) \cdot \sigma_r \quad (19)$$

przy czym wartość kąta tarcia wewnętrznej górotworu jest stała we wszystkich fazach:

$$\Phi_g = \text{const} \quad (20)$$



Rys. 3. Obwiednie kół Mohra dla ośrodka trójfazowego:
1 — faza sprężysta; 2 — faza plastyczna; 3 — faza spękań

a w fazie plastycznej i fazie spękań górotwór jest nieściśliwy:

$$u \cdot r = \text{const} \quad (21)$$

gdzie:

- u — przemieszczenie radialne górotworu (funkcja od promienia bieżącego r), m,
- r — promień bieżący punktu, m, przy czym:

$$r_w \leq r \leq r_L \quad (22)$$

- r_w — promień wyrobiska w wyłomie, m,
- r_L — promień strefy plastycznej, m.

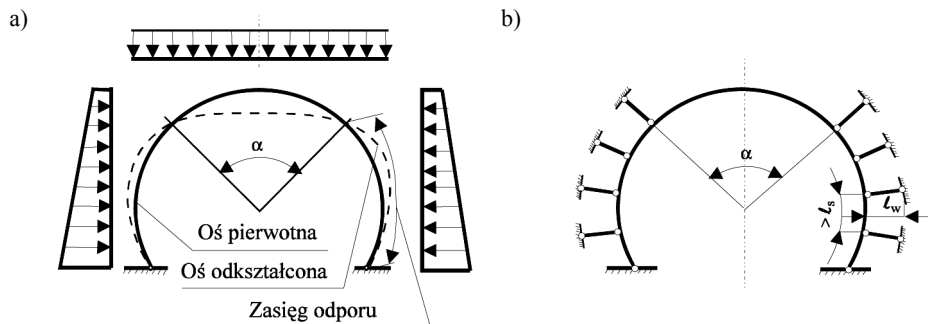
Zastosowanie modelu ośrodka trójfazowego w równaniach teorii plastyczności (zadanie o centralnej symetrii) prowadzi do wzorów ujętych w normach [75, 76], stosowanych z powodzeniem w polskich kopalniach węgla kamiennego od kilkunastu lat.

3.3. Odpór sprężysty górotworu

W wyniku współpracy obudowy z górotworem, w tych miejscach przekroju obudowy, w których obudowa pod wpływem obciążenia czynnego przemieszcza się w stronę górotworu, powstaje dodatkowe obciążenie obudowy w postaci reakcji górotworu, zwane odporem (lub odporem sprężystym górotworu). Odpór ten został wprowadzony do praktyki polskiego budownictwa podziemnego w r. 1973 wraz z ustanowieniem normy branżowej [6] i jest stosowany, pomimo zmieniających się norm [7, 75]. Odpór ten zwiększa poważnie nośność obudowy: przykładowo według b. OBR BG „Budokop” [87] w przypadku obciążenia pionowego równomiernie rozłożonego nośność obudowy stalowej łukowej podatnej V29 (ze względu na kształtownik) o odstępach drzwi 1,0 m, szerokości wyrobiska w świetle obudowy 5,0 m — w zależności od rodzaju wykładki wynosi:

- w przypadku niestarannej wykładki kamiennej (współczynnik ściśliwości podłoża $E_z = 1,5$ MPa): ok. 0,07 MPa;
- w przypadku dobrej wykładki kamiennej ($E_z = 7,0$ MPa): ok. 0,11 MPa;
- w przypadku wykładki scalonej zaprawą cementową ($E_z = 40$ MPa): ok. 0,18 MPa.

Przytoczone liczby stanowią wystarczające uzasadnienie poglądu, że przy projektowaniu obudowy należy uwzględnić odpór sprężysty górotworu. Zgodnie z normą [75] odpór ten należy lokalizować w tej części obwodu obudowy, w której oś odkształcona ustroju podstawowego (bez uwzględnienia odporu sprężystego) przemieszcza się w kierunku górotworu (rys. 4), przy czym wartość tego odporu jest wyznaczana z wykorzystaniem koncepcji podłoża sprężystego wg Winklera.



Rys. 4. Zakres odporu sprężystego górotworu wg normy [75]

W praktyce projektowej stosuje się dwa podejścia do zagadnienia wyznaczania odporu sprężystego górotworu:

- w przypadku obliczeń ręcznych stosuje się metodę podaną przez Dawydowa [21] z tym, że nie uwzględnia się jego koncepcji tzw. warstwy sprężystej, a wartość współczynnika podatności podłoża jest wyznaczana w oparciu o rozważania tarczy sprężystej z otworem kołowym;
- w przypadku obliczeń komputerowych odkształcalny górotwór zastępuje się słupkami (wahaczami) posadowionymi w nieodkształcalnym górotworze.

Rozważenie płaskiego zadania teorii sprężystości dla tarczy z otworem kołowym prowadzi do następującego wzoru na wartość współczynnika podatności podłoża według Winklera:

$$C = \frac{E_g}{(1 + \nu_g) \cdot r_w} \quad (23)$$

gdzie:

- C — współczynnik podatności podłoża wg Winklera, MPa/m,
- E_g — współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) górotworu, MPa,
- ν_g — liczba Poissona górotworu,
- r_w — promień wyrobiska w wyłomie, m.

W obliczeniach komputerowych zwykle przyjmuje się długość wahaczy l_{wah} oraz ich odległość S , a oblicza się wartość współczynnika sprężystości materiału wahacza E_{wah} . Zakłada się przy tym równość przemieszczeń osiowych wahacza i podłoża, równość sił działających na podłożu i w wahaczu oraz równość pola przekroju wahacza i powierzchni podstawy przekroju wywierającego odpór sprężysty.

Wykorzystanie prawa Hooke'a w tym przypadku prowadzi do następującego wzoru:

$$E_{wah} = C \cdot l_{wah} \quad (24)$$

gdzie:

E_{wah} — współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) materiału wahacza, MPa,

C — współczynnik podatności podłoża wg Winklera, MPa/m,

l_{wah} — długość wahacza, m.

Nowsze badania wskazują na konieczność uwzględnienia w obliczeniach zmienności wartości współczynnika podatności podłoża na obwodzie obudowy [26].

3.4. Model skotwionej belki skalnej i skotwionego sklepienia skalnego

Już w pierwszym okresie wdrażania w kraju obudowy kotwowej [96] uwzględniano dwa schematy pracy obudowy kotwowej (por. [77]):

- 1) schemat pracy przypinającej, polegający na przypinaniu odprężonej (rozluźowanej) części górotworu lub stropu bezpośredniego do nienaruszonej części górotworu (stropu zasadniczego),
- 2) schemat pracy spinającej, polegający na utworzeniu przez obudowę kotwową konstrukcji ze zbrojonego górotworu przenoszącej obciążenie.

Schemat pracy spinającej był wówczas nowością w polskim budownictwie podziemnym i do dnia dzisiejszego stanowi wartościowe wyjaśnienie współpracy obudowy kotwowej z górotworem na dużych głębokościach. W przypadku chodników o przekroju prostokątnym przybiera on postać schematu skotwionej belki skalnej (rys. 5).

Średnia wartość siły poprzecznej (bez uwzględnienia znaku) jest wyrażona wzorem:

$$T_{sr} = \frac{1}{4} \cdot q_0 \cdot l \cdot b \quad (25)$$

gdzie:

T_{sr} — średnia wartość siły poprzecznej na długości belki (bez uwzględnienia znaku), MN,

q_0 — obciążenie obliczeniowe skotwionej belki skalnej, MPa,

l — długość skotwionej belki skalnej (szerokość chodnika), m,

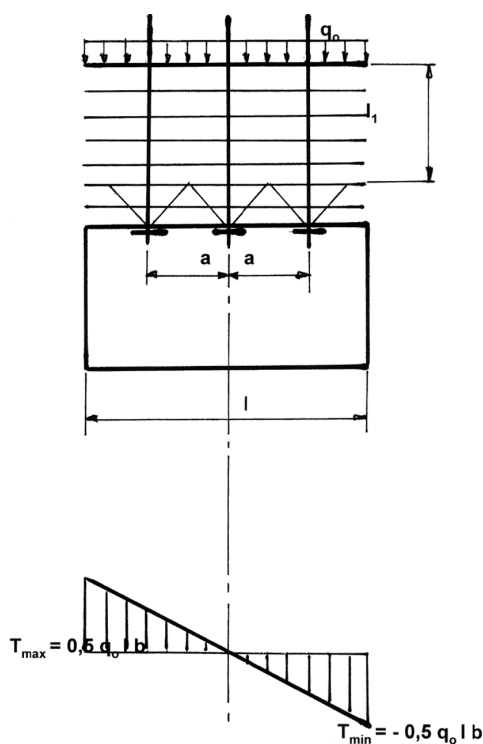
b — szerokość skotwionej belki skalnej (odległość między rzędami kotwi), m.

Uwzględniając znany wzór na maksymalne naprężenie styczne w osi obojętnej belki o przekroju prostokątnym:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{b \cdot l_1} \quad (26)$$

gdzie:

- τ_{\max} — maksymalna wartość naprężenia stycznego w osi obojętnej belki, MN,
- T — siła poprzeczna w przekroju belki, MN,
- l_1 — wysokość użytkowa skotwionej belki skalnej, m,
- b — szerokość skotwionej belki skalnej (odległość między rzędami kotwi), m,



Rys. 5. Schemat skotwionej belki skalnej [96]

uzyskuje się średnią wartość naprężenia stycznego w osi obojętnej na całej długości belki:

$$\tau_{\max \text{ śr}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{b \cdot l_1} \cdot \frac{1}{4} \cdot q_0 \cdot l \cdot b = \frac{3}{8} \cdot \frac{q_0 \cdot l}{l_1} \quad (27)$$

a następnie, po pomnożeniu przez powierzchnię ścinania $b \cdot l$, wartość obliczeniowej siły ścinającej kotwy:

$$P_o = \frac{3}{8} \cdot \frac{q_o \cdot l}{l_1} \cdot b \cdot l = \frac{3}{8} \cdot \frac{q_o \cdot b \cdot l^2}{l_1} \quad (28)$$

Warunek równowagi sił ma postać:

$$n \cdot N_{śc} \geq P_o \quad (29)$$

gdzie:

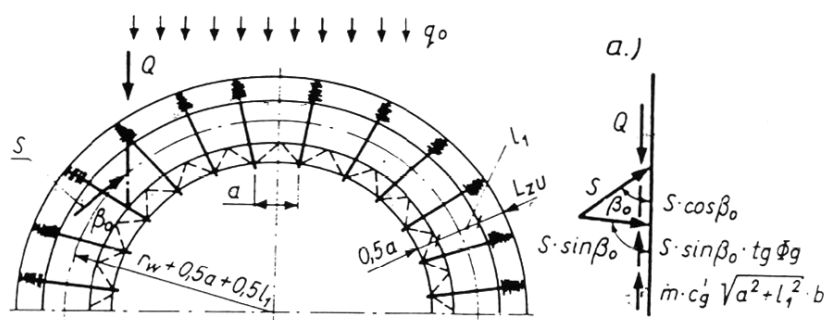
n — liczba kotwi wzdłuż skotwionej belki skalnej,

$N_{śc}$ — siła ścinająca kotew (cecha konstrukcyjna kotwi), MN,

P_o — obliczeniowa siła ścinająca kotwie wzdłuż skotwionej belki skalnej, MN.

Z warunku (29) można w prosty sposób obliczyć potrzebną liczbę kotwi n .

W przypadku wyrobiska o przekroju łukowym mamy do czynienia ze skotwionym sklepieniem skalnym (rys. 6).



Rys. 6. Schemat skotwionego sklepienia skalnego [55]

Rozważania prowadzi się dla wyodrębnionego najbardziej niekorzystnego przekroju ścinania przechodzącego przez dwie kotwie ograniczające segment sklepienia (najbardziej niekorzystny przypadek związany jest z maksymalnym rozrzedzeniem kotwi) [55, 122].

Warunek równowagi granicznej w przekroju ścinania ma postać

$$Q = q_o \cdot r_w \cdot b < S \cdot \sin \beta_o \cdot \text{tg } \Phi'_g + c'_g \cdot \sqrt{a^2 + l_1^2} \cdot b \quad (30)$$

gdzie:

Q — maksymalna siła ścinająca w przekroju sklepienia skalnego, MN,

q_o — obciążenie skotwionego sklepienia skalnego, MPa,

- r_w — promień wyrobiska w wyłomie, m,
 b — odległość między rzędami kotwi, m,
 S — siła osiowa (podłużna) w skotwionym sklepieniu skalnym, MN,
 β_0 — kąt nachylenia osi sklepienia do płaszczyzny ścięcia,
 a — odległość kotwi wzdłuż konturu wyrobiska, m,
 l_1 — wysokość użytkowa skotwionego sklepienia skalnego, m,
 Φ'_g — kąt tarcia wewnętrznego górotworu skotwionego sklepienia skalnego,
 c'_g — spójność górotworu skotwionego sklepienia skalnego (tzw. spójność resztkowa), MPa.

Przyjmuje się niezmiennosć kąta tarcia wewnętrznego górotworu w procesie jego pęknięcia:

$$\Phi'_g = \Phi_g \quad (31)$$

oraz [124]

$$c'_g = 0,03f \quad (32)$$

gdzie f oznacza wskaźnik zwięzłości według Protodiakonowa.

Pierwszy składnik po prawej stronie nierówności (30) oznacza składową siły tarcia ślizgowego w płaszczyźnie ścinania, a drugi składnik — składową tarcia pochodzącą od przyczepności; składową $S \cos \beta_0$ pomija się ze względu na jej małą wartość (zwykle $\beta_0 > 45^\circ$) — zwiększa to rezerwę bezpieczeństwa.

Po uwzględnieniu, że:

$$\sin \beta_0 = \frac{l_1}{\sqrt{a^2 + l_1^2}} \quad (33)$$

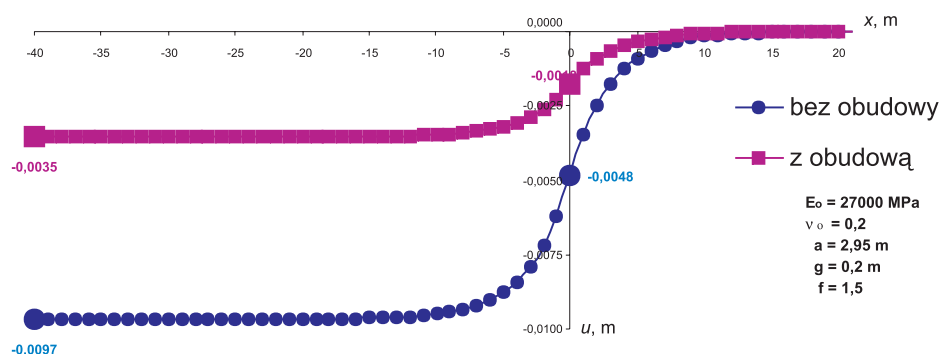
i po podstawieniu do (30) otrzymuje się warunek równowagi granicznej:

$$\frac{S \cdot l_1}{\sqrt{a^2 + l_1^2}} \cdot \operatorname{tg} \Phi_g + 0,03f \sqrt{a^2 + l_1^2} \cdot b > q_o \cdot r_w \cdot b \quad (34)$$

wykorzystywany w projektowaniu obudowy kotwowej i obudów powłokowych [76].

3.5. Przesunięcie początkowe górotworu w projektowaniu obudowy powłokowej

Przy projektowaniu obudowy z konstrukcyjną podatnością/sztywnością duże znaczenie posiada fakt, że przesunięcia górotworu spowodowane wykonaniem wyrobiska powstają już przed czołem przodku, a w pewnej odległości od niego osiągną wartość końcową (rys. 7).



Rys. 7. Przykładowy przebieg przesunięć na konturze wyrobiska ($r = a$) oraz na jego przedłużeniu w górotworze o wskaźniku zwięzłości według Protodiakonowa $f = 1,5$ [116]

Należy podkreślić, że zjawisko to jest obserwowane również w skałach o własnościach sprężystych, a własności reologiczne górotworu powodują jego nasilenie. Przykładowo w pracy [30] Autorzy podają, że strefa przesunięć górotworu występuje w odległości ok. jednej średnicy tunelu przed czołem przodku, a kończy się w odległości ok. 1,5 średnicy tunelu za czołem przodku, przy czym przesunięcia w czole przodku osiągają wartość równą ok. 1/3 wartości końcowej. Problem ten jest również zauważany przez praktyków — postawienie bezpośrednio w przodku wyrobiska korytarzowego obudowy sztywnej prowadzi nieuchronnie do jej uszkodzeń, a nawet zniszczenia — po oddaleniu się czoła przodku.

W roku 1982 do kolejnej wersji normy na obliczanie obudów powłokowych [10] wprowadzono obowiązek sprawdzania podatności obudowy — według wzoru:

$$u^{ob} \geq 0,9u_w \quad (35)$$

gdzie:

u^{ob} — konstrukcyjna podatność obudowy (tj. wartość przesunięcia radialnego, którą obudowa może przenieść bez osiągnięcia stanu granicznego nośności lub użyteczności), m,

u_w — wymuszone przesunięcie obudowy (jak wynika ze wzoru (12) normy [76] jest to wartość końcowa przesunięcia górotworu na konturze wyrobiska, m.

Ze wzoru (35) można wyciągnąć wniosek, że autorzy projektu normy założyli wartość przemieszczenia górotworu w czole wyrobiska równą 10% wartości końcowej — z badań opublikowanych w pracach [110, 116] wynika, że wartość ta nie jest stała i zależy od podatności/sztywności obudowy i górotworu. Podana w normie [76] wartość 0,9 odpowiada przypadkowi, gdy wartość współczynnika podatności obudowy [MPa/m] wynosi w przybliżeniu ok. 60% wartości współczynnika podatności górotworu. W świetle wykonanych obliczeń wartości przemieszczeń w odsłoniętym przodku wynoszą 50% wartości przemieszczeń granicznych u_w wyrobiska bez obudowy (por. [19]).

3.6. Modele probabilistyczne w projektowaniu obudowy

W projektowaniu obudowy wyrobisk dużą rolę odgrywa przyjęcie odpowiedniej konfiguracji obciążenia (np. obciążenie równomiernie rozłożone na obwodzie obudowy szybu) oraz jego odpowiedniej wartości. W ubiegłym stuleciu rozpoczęto w wielu ośrodkach prowadzenie pomiarów obciążenia obudowy *in situ*. Pomiarów te wykazały, że obciążenie obudowy wyrobiska podziemnego charakteryzuje się swoistą nierównomiernością (por. [36]), której nie można ująć przy użyciu stosowanych powszechnie funkcji matematycznych (np. model obciążenia nierównomiernego zaproponowany przez F. Mohra [57]).

Obudowy wyrobisk podziemnych pracują w górotworze, ośrodku, którego budowa i parametry są *par excellence* zmienne i przypadkowe, toteż podjęto próby zastosowania, do ujęcia nierównomierności tego obciążenia, modelu probabilistycznego, tzn. modelu uwzględniającego losową zmienność parametrów wejściowych do obliczeń statycznych.

Praktyka wykazała przydatność dwóch modeli probabilistycznych:

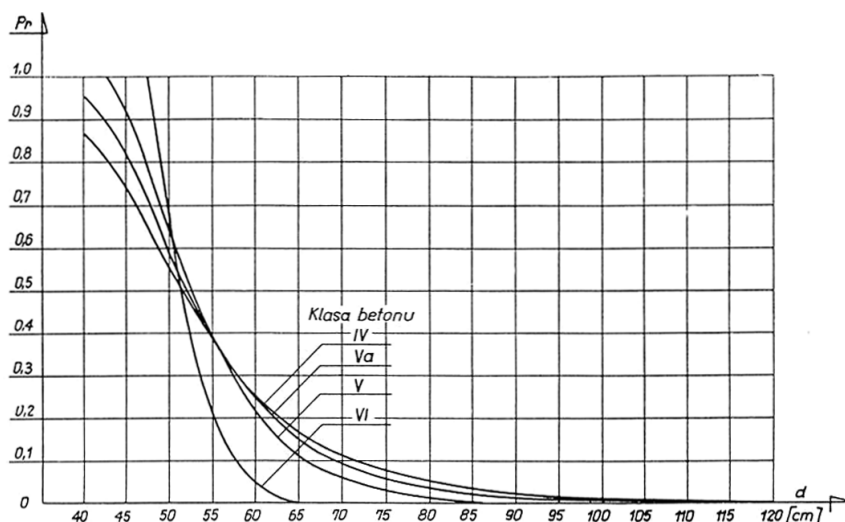
- model zmiennej losowej,
- model funkcji losowej (procesu stochastycznego).

Teorię i zastosowanie modeli probabilistycznych w projektowaniu konstrukcji inżynierskich przedstawiono w pracy [59]. Nie wchodząc w szczegóły matematycznej budowy tych modeli (por. np. [89, 93, 100, 102]) można stwierdzić, że zmiennymi losowymi są pewne funkcje określone na tzw. przestrzeni probabilistycznej, których realizacjami są liczby (np. wyniki oznaczeń parametrów geotechnicznych, wyniki oznaczeń parametrów wytrzymałościowych materiałów budowlanych itp.), a funkcjami losowymi jednej zmiennej niezależnej (w rozważanym przypadku to ograniczenie jest zasadne) są pewne zbiory zmiennych losowych określone w przestrzeni probabilistycznej — realizacjami funkcji losowej są w tym przypadku funkcje liczbowo-liczbowe jednej zmiennej niezależnej. Wynikają stąd oczywiście możliwości zastosowań tych modeli — model zmiennej losowej może mieć zastosowanie do opisu właściwości materiału, które można ująć liczbowo oraz do opisu obciążenia konstrukcji, które posiada stałą konfigurację, a model funkcji losowej może być użyty np. do opisu obciążenia obudowy, zmiennego w przestrzeni (np. na obwodzie obudowy szybu) i w czasie (uzyskane w trakcie pomiarów przebiegi obciążenia mogą być potraktowane jako realizacje określonej funkcji losowej).

Model funkcji losowej posiada bardziej skomplikowaną budowę i znacznie większe możliwości użytkowe. W Polsce został wykorzystany przy opracowywaniu metody obliczania obudowy szybów [103]. Wymagało to rozwiązania następujących zagadnień:

- pole naprężeń i wyężenie przekroju obudowy szybu obciążonej stacjonarną funkcją losową obciążenia [108, 111],
- prawdopodobieństwo zniszczenia obudowy szybowej obciążonej stacjonarną funkcją losową ciśnienia górotworu [109].

Analiza materiału obserwacyjnego uzyskanego z pomiarów obciążeń obudowy szybów, przeprowadzona przy użyciu przedstawionego modelu, pozwoliła na sformułowanie nowego wzoru na grubość obudowy szybu, opartego na rozważeniu prawdopodobieństwa zniszczenia obudowy (rys. 8) [113–115], który został wprowadzony do projektu normy branżowej [4] i jest stosowany do chwili obecnej [73]. Zastosowany model został rozwinięty w pracy [101]. Zagadnienie zastosowania modelu funkcji losowej do obliczania obudowy tuneli zostało omówione w pracy [94].



Rys. 8. Zależność prawdopodobieństwa zniszczenia obudowy betonowej szybu od grubości obudowy (przykład liczbowy) [103]

Drugi model probabilistyczny (tzn. model zmiennej losowej) został użyty w pracy [24] do oceny współpracy obudowy stalowej łukowej wyrobiska korytarzowego z górotworem. W pracy tej przeanalizowano m.in. parametry rozkładów prawdopodobieństwa dwóch zmiennych losowych: obciążenia obudowy oraz jej nośności jako funkcji od zmiennych losowych (parametrów geotechnicznych, górniczych i materiałowych). Wyniki analizy posłużyły do opracowania klasyfikacji warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych.

Model zmiennej losowej został również wykorzystany w pracy [60] do konstrukcji zależności między momentem zginającym niszczącym i siłą podłużną niszczącą przy mimośrodowym ściskaniu, uwzględniającej losową zmienność wytrzymałości betonu.

W pracy [22] przy użyciu podobnego modelu przeanalizowano wpływ losowej zmienności parametrów wytrzymałościowych stali na nośność stalowej obudowy łukowej z kształtownika V.

4. Podsumowanie i wnioski

Długotrwały okres koniunktury w górnictwie w latach powojennych zaowocował intensywnym rozwojem budownictwa podziemnego kopalń. Przed budownictwem tym postawiono zadanie budowy i rozbudowy kopalń w stale pogarszających się warunkach geologiczno-górnictwowych związanych ze zwiększającą się grubością zawadzonego nadkładu oraz wzrostem głębokości kopalń. Zadanie to mogło być wykonane tylko pod warunkiem rozwoju technologii, w tym — rozwoju technologii nowych obudów górniczych i metod ich projektowania. Opracowano wiele nowych konstrukcji obudów długotrwałych wyrobisk podziemnych i metod projektowania (podrozdz. 2), a w procesie projektowania zastosowano wiele nowych modeli obliczeniowych (podrozdz. 3). Długi okres stosowania tych metod potwierdził ich przydatność nie tylko w warunkach budownictwa podziemnego górniczego, ale również w warunkach budownictwa podziemnego niezwiązanego z górnictwem. Dalszy rozwój metodyki projektowania obudów długotrwałych wyrobisk podziemnych powinien iść w kierunku szerszego wykorzystania pomiarów geotechnicznych *in situ*.

LITERATURA

- [1] Biliński A., Perek J., Stałęga S., Chudek M., Zorychta A., Stępień A., Kowina W., Malesza A.: Zasady doboru obudowy łukowej podatnej wyrobisk chodnikowych wykonywanych w pokładzie węgla i pozostających poza wpływem ciśnienia eksploatacyjnego. Katowice, Wyższy Urząd Górniczy, Główny Instytut Górnictwa, 1996
- [2] BN-71/0434-02: Szyby górnicze — Obudowa — Obciążenia
- [3] BN-83/0434-02: Szyby górnicze — Obudowa — Obciążenia
- [4] BN-72/0434-03: Szyby górnicze — Obudowa — Zasady projektowania
- [5] BN-79/0434-03: Szyby górnicze — Obudowa — Zasady projektowania
- [6] BN-73/0434-04: Wyrobiska korytarzowe poziome i pochyłe w kopalniach — Obudowa murowa sklepią — Wytoczne projektowania i obliczeń statycznych
- [7] BN-79/0434-04: Wyrobiska korytarzowe w kopalniach — Obudowa sklepią — Wytoczne projektowania i obliczeń statycznych
- [8] BN-75/0434-05: Wyrobiska komorowe — Obudowa — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [9] BN-78/0434-07: Wyrobiska korytarzowe i komorowe w kopalniach — Obudowa powłokowa — Wytoczne projektowania i obliczeń statycznych
- [10] BN-82/0434-07: Wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa powłokowa — Wytoczne projektowania i obliczeń statycznych
- [11] Булычев N.S.: Механика подземных сооружений. Москва, Недра, 1982
- [12] Булычев N.S., Амузин B.Z., Оловянный A.G.: Расчет крепи капитальных горных выработок. Москва, Недра, 1974

- [13] *Cala M.*: Możliwości określenia parametrów obudowy kotwiowej dla wyrobisk umiejscowionych w górotworze spękanym. [w:] Geotechnika w górnictwie i budownictwie specjalnym, Konferencja naukowo-techniczna poświęcona 50-leciu pracy Prof. zw. dr hab. inż. Henryka Filcka. Kraków, 9–10 grudnia 1999 r. Kraków, Wydawnictwo „SCRIPTUM”, 1999
- [14] *Cala M., Flisiak J., Tajduś A.*: Mechanizm współpracy kotwi z górotworem o zróżnicowanej budowie. Kraków, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN Polskiej Akademii Nauk, 2001
- [15] *Cala M., Tajduś A.*: The influence of roof bolts location on its interaction with the rock mass. [w:] Geo-Eng2000, An international conference on geotechnical & geological engineering, 19–24 November 2000, Melbourne. Vol. 2: Extended abstracts. Technomic Publishing, Lancaster, 2000
- [16] *Chudek M.*: Obudowa wyrobisk górniczych. Cz. 1. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Śląsk, 1986
- [17] *Chudek M., Duży S., Kleta H., Kleczek Z., Stoiński K., Zorychta A.*: Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Gliwice — Kraków — Katowice, Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, 2000
- [18] *Chudek M., Gluch P., Szczepaniak Z.*: Drażenie wyrobisk korytarzowych. Gliwice, Politechnika Śląska, 1985 (skrypt)
- [19] *Czaja P.*: Analiza metod określania wielkości przemieszczeń wstępnych ociosów wyrobiska przed założeniem obudowy. [w:] Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Podziemne '96, Kraków, 26–27 września 1996 r., Wyd. Scriptum, 1996
- [20] *Czaja P.*: Analiza nośności segmentowej obudowy szybów upodatnionej materiałem nieliniowo sprężystym. Kraków, Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2002
- [21] *Dawydow S.S.*: Obliczanie i projektowanie konstrukcji podziemnych. Warszawa, Wyd. MON, 1954
- [22] *Domańska D.*: Nowa metoda szacowania nośności odrzwi obudowy stalowej łukowej oparta na teorii nośności granicznej. Archiwum Górnictwa, 1, 2003
- [23] *Drzęzła B., Mendera Z., Barchan A., Głąb L., Schinohl J.*: Obudowa górnicza. Zasady projektowania i doboru obudowy wyrobisk korytarzowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny. Katowice, Politechnika Śląska Instytut Eksploatacji Złóż, Wydawnictwo Górnicze, 2000
- [24] *Duży S.*: Studium niezawodności konstrukcji obudowy i stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego z uwzględnieniem niepewności informacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1750, 2007
- [25] *Filcek H., Tajduś A.*: Wpływ obudowy kotwiowej na zachowanie się górotworu w otoczeniu wyrobiska chodnikowego. Wiadomości Górnicze, 1, 1992
- [26] *Frydrych K.*: Wpływ konstrukcji obudowy tunelu o przekroju kołowym na wartość współczynnika podatności podłoża. Górnictwo i Geoinżynieria, 29, 3/1, 2005
- [27] *Furtak K., Kędracki M.*: Podstawy budowy tuneli. Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2005
- [28] *Galczyński S.*: Podstawy budownictwa podziemnego. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001
- [29] *Godziek J., Stapor W.*: Technologie drażenia wyrobisk korytarzowych w strefach uskokowych. Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 4, 1978
- [30] *Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F.*: Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam — Brookfield, A.A. Balkema, 1995
- [31] *Konopa W., Twardokęs K.*: Principles of roof bolting in roadways. Central Mining Institute Ann. Report 1977. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 1978
- [32] *Konopko W., Drzewiecki J., Kabiesz J., Kidybiński A., Kowalski E., Perek J., Rulka K., Skrzyński K.*: Zasady doboru obudowy wyrobisk korytarzowych, cz. II. Zasady doboru obudowy chodnikowej w warunkach zagrożenia tąpnięciami. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 1998 (praca niepublikowana)
- [33] *Konopko W., Mateja J., Perek J., Rulka K., Sawka B., Stałęga S.*: Zasady doboru obudowy wyrobisk korytarzowych, cz. I. Wytyczne projektowania, wykonywania i kontroli obudowy odrzwiowej łukowej podatnej (LP) wyrobisk korytarzowych w pokładzie węgla. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 1998 (praca niepublikowana)
- [34] *Kostrz J.*: Głębianie szybów specjalnymi metodami. Katowice, Śląsk, 1964
- [35] *Kozel A.M.*: Znaczenie kasatel'nych sil na vnešnej poverchnosti kol'cevoj monolitnoj krep'i i vybor tołščiny krep'i po zadannym neravnornym nagruzkam. Trudy VNIMI, 46, Leningrad, 1962
- [36] *Krupennikov G.A., Bulyčev N.S., Kozel A.M., Filatov N.A.*: Vzaimodejstvie massivov gornych porod s krep'ju vertikal'nych vyrabotok. Moskva, Nedra, 1966

- [37] *Krupiński B.*: Zasady projektowania kopalń, cz. 1. Katowice, Śląsk, 1963
- [38] *Lüttendorf H.O.*: Quantitative Gebirgsmechanik der Unterbauten im geklüfteten Gebirge. Essen, Glückauf, 1971
- [39] *Majcherczyk T.*: Influence of rock bolts on the rock mass parameters. Archives of Mining Sciences, 4, 1995
- [40] *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Badania in situ dla oceny doboru obudowy wyrobisk korytarzowych. [w:] Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2004, Szczyrk, 23–27 lutego 2004. Kraków, IGSMiE PAN, 2004
- [41] *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Badania obciążeń obudowy w wybranych wyrobiskach korytarzowych. Górnictwo i Geoinżynieria, 3/1, 2005
- [42] *Majcherczyk T., Niedbalski Z., Malkowski P.*: Measurements of roof support load in headings: in situ research. [w:] Technical, technological and economic aspects of thin-seams coal mining, International Mining Forum 2007. London, Taylor & Francis, 2007
- [43] *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Ocena przemieszczeń górotworu wokół wyrobiska korytarzowego z wykorzystaniem parametrów empirycznych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6, 2006
- [44] *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań „in situ”. Kraków, AGH, WGiG, 2006
- [45] *Majcherczyk T., Niedbalski Z.*: Badania zasięgu strefy spękań wokół wyrobiska korytarzowego. Przegląd Górniczy, 2, 2004
- [46] *Majcherczyk T., Niedbalski Z.*: Wpływ czasu na rozwarstwienia skał stropowych w wybranych wyrobiskach korytarzowych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 7, 2005
- [47] *Majcherczyk T., Niedbalski Z., Malkowski P.*: Pomiary sił osiowych w kotwiach oprzyrządowanych w wyrobiskach w obudowie podporowo-kotwiowej. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 2, 2004
- [48] *Majcherczyk T., Tajduś A.*: Numeryczny model dynamicznego obciążenia obudowy kotwiowej. Prace Naukowe GIG, Seria Konf., 1, 1995
- [49] *Majcherczyk T., Tajduś A.*: Ocena stateczności górotworu dla potrzeb stosowania obudowy kotwiowej w wyrobiskach górniczych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 2, 1994
- [50] *Majcherczyk T., Tajduś A., Cala M.*: Zastosowanie kotwi do obudowy przecinek ścianowych, rozruchowych i likwidacyjnych. Przegląd Górniczy, 3, 1995
- [51] *Malkowski P., Niedbalski Z., Majcherczyk T.*: Konwergencja wyrobisk chodnikowych na podstawie wyników obliczeń numerycznych i ich weryfikacja pomiarami in situ. Górnictwo i Geoinżynieria, 1, 2008
- [52] *Maloszewski J., Mateja J., Rulka K., Wypchol N.*: Podstawy teoretyczne projektowania obudów powłokowych dla wyrobisk korytarzowych i komorowych. Zeszyty Problemowe Górnictwa, 1, 1977. PWN, Warszawa — Kraków
- [53] *Mateja J.*: Beton natryskowy o wysokich parametrach technicznych jako tworzywo do obudowy wyrobisk górniczych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3, 1996
- [54] *Mateja J.*: Studium nad ustaleniem nośności stalowych odrzwi obudowy łukowej w wyrobiskach udostępniających nienarażonych na bezpośredni wpływ ciśnienia eksploatacyjnych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG, Mysłowice, 1982
- [55] *Mateja J., Dynowska M.*: Kotwienie w wyrobiskach kapitalnych. Wiadomości Górnicze, 8–9, 1993
- [56] *Matysik A.*: Beton natryskowy zbrojony włóknem stalowym w budownictwie podziemnym. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3, 1996
- [57] *Mohr F.*: Die Beanspruchungen und Berechnungen des Schachtausbaus. Glückauf, 23/24, 1950
- [58] *Mohr F.*: Grundlagen der Berechnung des Ausbaues von Schächten unter besonderer Berücksichtigung von Gefrierschächten. Bergbau — Archiv, 2, 1946
- [59] *Murzewski J.*: Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Warszawa, Arkady, 1989
- [60] *Nguyen H.B., Wichur A.*: Model losowej zmienności wytrzymałości betonu przy ściskaniu mimośrodowym. Archiwum Górnictwa, 2, 1985
- [61] *Niedbalski Z., Majcherczyk T.*: Badania nad zachowaniem się wyrobisk korytarzowych w obudowie podporowo-kotwiowej. Przegląd Górniczy, 11, 2005
- [62] *Olszewski J., Kostrz J.A.*: Udział Przedsiębiorstwa Budowy Szybów S.A. w rozwoju budownictwa szybowego w Polsce. Sympozjum z okazji 50-lecia Przedsiębiorstwa Budowy Szybów w Bytomiu. Bytom, Przedsiębiorstwo Budowy Szybów SA, 1995
- [63] *Palucki T.*: Praktyczne wskazówki stosowania obudowy kotwiowej. Budownictwo Górnicze, 2, 1973

- [64] Perspektywy rozwoju budownictwa podziemnego w Polsce a jego rozwój w świecie: Konferencja naukowo-techniczna, Warszawa, 18–20 marca 1998 r. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, numer specjalny, 1998
- [65] *Pękacki W.*: Budownictwo górnicze podziemne. Cz. I. Wykonywanie wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Śląsk, 1971
- [66] *Pękacki W., Rycman S., Tokarz A.*: Polskie budownictwo górnicze — doświadczenia i przyszłość. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 2, 1996
- [67] *Piechota S., Korzeniowski W.*: Współczynnik wzmocnienia górotworu w obudowie podporowo-kotwiowej w wyrobiskach korytarzowych. Przegląd Górniczy, 6, 2002
- [68] PN-64/B-03001: Konstrukcje i podłoża budowli — Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [69] PN-76/B-03001: Konstrukcje i podłoża budowli — Ogólne zasady obliczeń
- [70] PN-87/B-03002: Konstrukcje murowe — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [71] PN-84/B-03264: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [72] PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone — Obliczenia statyczne i projektowanie
- [73] PN-G-05015:1997: Szyby górnicze — Obudowa — Zasady projektowania
- [74] PN-G-05016:1997: Szyby górnicze — Obudowa — Obciążenia
- [75] PN-G-05020:1997: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa sklepiąca — Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [76] PN-G-05600:1998: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe — Obudowa powłokowa — Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [77] *Podgórski K., Podgórski W.*: Obudowa kotwiowa wyrobisk górniczych. Katowice, Śląsk, 1969
- [78] Poradnik górnika, t. II, cz. 1. Katowice, WGH, 1959
- [79] Poradnik górnika, t. 2. Katowice, Śląsk, 1975
- [80] *Rabcewicz L., Sattler K.*: Die neue Österreichische Tunnelbauweise. Der Bauingenieur, 8, 1965
- [81] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 1 grudnia 1997 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. z 1998 r. Nr 3 poz. 6)
- [82] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. Nr 139 poz. 1169 z późn. zm.)
- [83] *Rulka K.*: Obudowa stalowo-betonowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Śląsk, 1972
- [84] *Rulka K., Mateja J., Jasnowski M.*: Wytyczne doboru konstrukcji i określania parametrów obudowy komór i połączeń wyrobisk korytarzowych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG „Budokop”, Mysłowice, 1984
- [85] *Rulka K., Mateja J., Kowalski E., Skrzyński K., Stalega S., Wojtusiak A., Schinohl J.*: Uproszczone zasady doboru obudowy odrzwiowej wyrobisk korytarzowych w zakładach wydobywających węgiel kamienny. Katowice, Główny Instytut Górnictwa Zakład Technologii Eksploatacji i Obudów Górniczych, 2001
- [86] *Rulka K., Wojtusiak A., Pękacki W., Stochel D.*: Doświadczenia krajowego zaplecza projektowo-badawczego i przedsiębiorstw w realizacji wyrobisk tunelowych i budowli podziemnych metodami górnictwymi. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 1996
- [87] *Rulka K., Wypchol N., Mateja J., Gruszka R.*: Zasady projektowania, obliczania i doboru obudów dla długotrwałych wyrobisk korytarzowych i komorowych. OBR BG „Budokop”, Prace Naukowo-Badawcze, Mysłowice, 1983
- [88] *Sattler K.*: Neuartige Tunnelmodellversuche — Ergebnisse und Folgerungen. Felsmechanik und Ingenieurgeol. Suppl., IV, 1968
- [89] *Smirnow N.W., Dunin-Barkowski I.W.*: Krótki kurs statystyki matematycznej dla zastosowań technicznych. PWN, Warszawa, 1966
- [90] *Stamatello H.*: Tunele i miejskie budowle podziemne. Warszawa, Arkady, 1970
- [91] *Stańczyk A.*: Projektowanie i budowa pierwszych odcinków metra w Algierze. Część II. Obudowa ostateczna tuneli. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3, 1996
- [92] *Staszewski S., Śliwa S.*: Budowa sztolni hydrotechnicznych w Świnnej Porębie. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 4, 1996
- [93] *Szczepankiewicz E.*: Zastosowania pól losowych. Warszawa, PWN, 1985
- [94] *Šejnin V.I., Ruppenajt K.V.*: Nekotorye statističeskie zadači rasčeta podzemnych sooruzenij. Moskwa, 1969
- [95] *Tajduś A., Wichur A.*: Budownictwo podziemne w Polsce — nauka i praktyka (na 90-lecie powstania AGH). Przegląd Górniczy, 5–6, 2009

- [96] Tymczasowe wytyczne stosowania obudowy kotwiowej, kotwiowo-podporowej i prostej podporowej w kopalniach węgla kamiennego. Katowice, Ministerstwo Górnictwa Departament Górnicy, wrzesień 1976
- [97] *Umanskij A. A. (red.): Spravočnik proektirovščika promyšlennych, žilych i obščestvennych zdaniy i sooruženij.* Kn. 2. Moskva, Izd. lit. po stroitel'stvu, 1973
- [98] *Walewski J.: Projektowanie szybów i szybków.* Katowice, Wyd. Śląsk, 1965
- [99] *Wichur A.: Analiza matematyczna obserwacji i materiałów z pomiarów odkształceń obudowy szybów w warunkach ROW i LGOM. Zakład Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego, temat nr 7/66, etap XIV. Mysłowice, listopad 1970 (praca niepublikowana)*
- [100] *Wichur A.: Ciśnienie górotworu na obwodzie obudowy szybu jako stacjonarna funkcja losowa. Archiwum Górnictwa, 1, 1970*
- [101] *Wichur A.: Dwuwymiarowy model obciążenia obudowy szybu jako wektorowej funkcji losowej. Zeszyty Naukowe AGH, 584, Górnictwo 88, Kraków, 1976*
- [102] *Wichur A.: Możliwość prognozowania kształtu i wartości obciążenia obudowy szybu w zagadnieniach projektowych przy wykorzystaniu modelu probabilistycznego. Zeszyty Naukowe AGH, 374, zeszyt specjalny 36, Kraków, 1972*
- [103] *Wichur A.: Możliwość wykorzystania do zagadnień projektowych matematycznego modelu ciśnienia górotworu na obudowę szybu jako funkcji losowej. Projekty — Problemy, 10, 1971*
- [104] *Wichur A.: Nowa metodyka obliczania obudowy szybowej w świetle opracowanych nowych norm branżowych. Budownictwo Górniczne, 2, 1972*
- [105] *Wichur A.: Nowe normy projektowania obudowy szybów górniczych. Budownictwo Górniczne i Tunelowe, 4, 1996*
- [106] *Wichur A.: Nowe poglądy na temat obliczania obciążeń obudowy szybowej. PAN Oddz. w Krakowie, Prace Komisji Górnictwo-Geodezyjnej, Górnictwo 24, Wybrane zagadnienia z budownictwa podziemnego, Wrocław — Warszawa — Kraków — Gdańsk — Łódź, 1986*
- [107] *Wichur A.: Obudowy zespolone i wielowarstwowe w budownictwie podziemnym. [w:] V Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespolone, T. I, Referaty, Część problemowa. Sekcja Konstrukcji Betonowych Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, Sekcja Konstrukcji Metalowych Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, Wydział Budownictwa i Inżynierii Sanitarnej Politechniki Zielonogórskiej w Zielonej Górze, Komisja Nauki Oddziału PZITB w Zielonej Górze, Zielona Góra, 22–23 czerwca 1999*
- [108] *Wichur A.: Pole naprężeń w sprężystym pierścieniu kolistym obciążonym stacjonarną funkcją losową. Archiwum Górnictwa, 2, 1970*
- [109] *Wichur A.: Prawdopodobieństwo przekroczenia wytrzymałości materiału sprężystego pierścienia kolistego obciążonego stacjonarną funkcją losową. Archiwum Górnictwa, 2, 1972*
- [110] *Wichur A.: The state of stress and displacement in the face area of a shaft sunk in a rockmass with elastic properties. Archives of Mining Sciences, 3, 1998*
- [111] *Wichur A.: Wytyżenie sprężystego pierścienia kolistego obciążonego stacjonarną funkcją losową. Archiwum Górnictwa, 1, 1971*
- [112] *Wichur A.: Zagadnienie obciążeń stycznych obudowy szybowej w świetle analizy sprężystego modelu tarczy i pierścienia. Górnictwo, 1, 1978*
- [113] *Wichur A.: Z prac nad nową metodyką obliczania obudowy szybowej (część I). Budownictwo Górniczne, 2, 1971*
- [114] *Wichur A.: Z prac nad nową metodyką obliczania obudowy szybowej (część II). Budownictwo Górniczne, 3, 1971*
- [115] *Wichur A.: Z prac nad nową metodyką obliczania obudowy szybowej (część III). Budownictwo Górniczne, 1, 1972*
- [116] *Wichur A., Bajorek M., Frydrych K.: Metoda sprawdzania podatności obudowy powłokowej. Górnictwo i Geoinżynieria, 3, 2007*
- [117] *Wichur A., Gruszka R.: Nowe normy projektowania obudowy długotrwałych podziemnych wyrobisk korytarzowych. [w:] Budownictwo podziemne 2000, Konferencja naukowo-techniczna, Kraków, 25–27 września 2000. Kraków, UWND AGH, 2000*
- [118] *Wichur A., Krywult J., Stapor J., Domańska D.: Zasady projektowania obudowy wstępnej szybów głębinowych z użyciem metody zamrażania górotworu. [w:] OBR BG Budokop w Mysłowicach, Konferencja naukowo-techniczna Budownictwo górnicze i podziemne w nowych warunkach gospodarowania, Kokotek/Lublińca, 16–17.IX.1991*
- [119] *Wichur A., Tokarz A., Pękacki W.: Zastosowanie technologii górniczych w budownictwie podziemnym. Budownictwo Górniczne i Tunelowe, 2, 1995*
- [120] *Wichur A., Żyliński R.: Osiągnięcia i perspektywy rozwoju polskiego budownictwa podziemnego. [w:] International Scientific Conference University of Mining and Metallurgy up to Challenges of the XXI-st*

Century in Education, Scientific Research and Industrial Cooperation. Faculty of Mining. Mining — Practice and Science — Look into XXI-st Century. Kraków, 24–25 czerwca 1999

- [121] *Wichur A., Żyliński R.*: Underground construction in Poland — achievements and perspectives of development. [w:] Konferencja Nauk.-Techn. Budownictwo podziemne 2000, Kraków, 25–27 września 2000, UWND AGH, 2000
- [122] *Wypchol N., Mateja J., Rulka K., Lachman K., Jasnowski M.*: Projektowanie i obliczenia statyczne obudów kapitalnych wyrobisk korytarzowych i komorowych. Prace Naukowo-Badawcze OBR BG „Budokop”, Mysłowice, 1978
- [123] *Wypchol N., Pałucki T.*: Metodyka projektowania obudowy kotwiowej. Projekty — Problemy, 12, 1976
- [124] *Zaslavskij Ju.Z., Mostkov V.M.*: Kreplenie podzemnych sooruzhenij. Moskva, Nedra, 1979
- [125] *Żyliński R.*: Budownictwo górnicze w Polsce — szanse i zagrożenia. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3, 1998