

*Andrzej Wichur**, *Kornel Frydrych**, *Daniel Strojek**

ZASADY DOBORU OBUDOWY POWŁOKOWEJ**

1. Wprowadzenie

Znane uwarunkowania historyczne spowodowały, że rozwój budownictwa podziemnego w Polsce w latach powojennych był nierozdzielnie związany z rozwojem górnictwa [8, 15, 16, 17]. Konieczność udostępnienia złóż węgla na coraz większych głębokościach oraz w coraz gorszych warunkach geologiczno-górnicznych powodowała, że następował rozwój techniki drążenia i wykonywania obudowy wyrobisk podziemnych, a w szczególności konstrukcji obudowy podziemnych wyrobisk korytarzowych. Występujące warunki naturalne (przede wszystkim zawodnienie i duże wartości obciążeń) wymusiły wprowadzenie do praktyki obudów zespolonych i wielowarstwowych podziemnych długotrwałych wyrobisk korytarzowych.

Wykorzystanie korzystnych własności technologicznych betonu natryskowego spowodowało odstępianie w takich przypadkach od ciężkich obudów sklepionych wykonanych z betonu lub żelbetu na rzecz tzw. obudowy kombinowanej stalowo-betonowej, składającej się z betonu natryskowego i łuków stalowych stosowanych powszechnie do obudowy kopalnianych wyrobisk korytarzowych [4, 5, 6, 9, 14, 16]. Prawdziwa rewolucja w poglądach na pracę obudów zespolonych i wielowarstwowych została dokonana dzięki badaniom OBR BG „Budokop”, mającym swe inspiracje w analizie technologii i konstrukcji obudowy wyrobisk podziemnych stosowanych w Nowej Austriackiej Metodzie Budowy Tuneli (skrót ang. NATM). 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

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł oparty na wynikach pracy wykonanej w ramach badań własnych AGH nr 10.10.100.31

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 powłokowa traci swoje korzystne własności statyczne i przechodzi w obudowę sklepioną.

Do wymiarowania opisanych konstrukcji obudów opracowano nowe metody obliczeń [16]. Stosowane w okresie powojennym 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 OBR BG „Budokop”. Badania te zostały wykorzystane przy opracowywaniu norm branżowych [1, 2, 3]. Praktyczne użycie tych metod w projektowaniu stworzyło możliwość rozszerzenia zakresu ich stosowania do projektowania obudów długotrwałych wyrobisk podziemnych w budownictwie górnictwowym, hydrotechnicznym i komunikacyjnym, objętego nowo opracowanymi normami [10, 11].

Jednak normy te bardzo ogólnie przedstawiają zakres stosowania obudowy powłokowej. Ograniczają się jedynie do kilku najważniejszych warunków technicznych, jakie muszą być spełnione, aby móc ten typ obudowy zastosować. Celem niniejszej pracy jest uzupełnienie tego zakresu kryterium ekonomicznym, które umożliwi dobór optymalnej konstrukcji obudowy.

2. Zakres stosowania obudowy powłokowej wg normy [11]

Obudowy powłokowe zaleca się stosować jako obudowy samodzielne w długotrwałych wyrobiskach podziemnych, zlokalizowanych w niezawodnionych skałach o wskaźniku zwięzłości $f \geq 1,5$. Obudowy powłokowe mogą stanowić obudowę wstępną obudów sklepionych, szczególnie w niekorzystnych warunkach geologicznych.

Norma [11] następująco określa zakres stosowania obudów powłokowych.

Obudowa z betonu natryskowego **Bn** może być stosowana w następujących warunkach:

- skały otaczające wyrobisko mają współczynnik zwięzłości $f \geq 1,5$,
- odstęp między powierzchniami spękań i warstwowania są większe od 2,0 m,
- wyrobisko zlokalizowane powyżej głębokości krytycznej, $H < H_{kr}$.

Obudowę kotwiowo-betonową **KB** oraz kotwiowo-betonowo-stalową **KBS** stosuje się, gdy:

- skały otaczające wyrobisko mają współczynnik zwięzłości $f \geq 1,5$,
- odstęp między powierzchniami spękań i warstwowania są większe od 0,5 m,
- górotwór nie jest zawodniony (otwory kotwiowe są suche lub woda sączy się z nich kroplami).

Obudowę stalowo-betonową **SB** stosuje się, gdy skały otaczające wyrobisko mają współczynnik zwięzłości $f > 1,0$.

3. Zasady projektowania obudowy powłokowej [16]

3.1. Dobór parametrów geotechnicznych górotworu

Dokładne określenie wartości parametrów geotechnicznych górotworu, w którym ma być zlokalizowane wyrobisko górnicze, umożliwia zaprojektowanie optymalnej konstrukcji obudowy oraz przyjęcie właściwej technologii drążenia. Z tego względu uznaje się za konieczne przeprowadzanie szczegółowego rozeznania warunków geotechnicznych i hydrogeologicznych oraz badania cech geotechnicznych górotworu, przede wszystkim dla potrzeb projektowania długotrwałych wyrobisk górniczych.

Znajomość parametrów geotechnicznych górotworu jest konieczna do oszacowania ciśnień górotworu, do określenia sił wewnętrznych w obudowach współpracujących z górotworem oraz ich wymiarowania.

Parametry geotechniczne górotworu nie są wielkościami stałymi i ulegają obniżeniu, zwłaszcza na konturze wyrobiska. Wpływ drążenia (urabianie MW), rozwarstwienia górotworu, wypływu wody do wyrobisk, atmosfery kopalnianej, a także płaszczyzn osłabienia, spękań i rodzaju materiału wypełniającego szczeliny na wartość parametrów wytrzymałościowych i cechy sprężyste górotworu uwzględnia się przez wprowadzenie współczynników zmniejszających odpowiednie wartości parametrów.

3.2. Dobór modeli obliczeniowych

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 [11] przewidziano trzy modele obliczeniowe obciążeń:

- 1) model ośrodka sprężystego,
- 2) model ośrodka sprężysto-plastycznego,
- 3) model ośrodka sprężysto-plastyczno-spękanego.

Przy wyborze modelu ośrodka operuje się kryterium głębokości krytycznej H_{kr}

$$H_{kr} = \frac{R_{cg}}{2\gamma_0},$$

gdzie:

- R_{cg} — wytrzymałość górotworu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia,
 γ_0 — ciężar objętościowy górotworu nadległego.

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 mają pozostałe modele. Sprawdzenia, jaki typ modelu ma zastosowanie w danych warunkach, dokonuje się przyjętymi w normie zależnościami obliczeniowymi.

Poniżej głębokości krytycznej warunki naprężeniowo-odkształceniowe, będące konsekwencją wykonania wyrobiska przy istniejącym ciśnieniu pierwotnym, powodują powstanie, w zależności od własności geomechanicznych górotworu, stref górotworu plastycznego lub spękanego i plastycznego, co wynika z wyteżenia materiału skalnego budującego górotwór. Jako kryterium przejścia górotworu w stan plastyczny przyjmuje się spełnienie warunku plastyczności w postaci prostoliniowej obwiedni kół Mohra, a przejścia w stan spękany — dodatkowo osiągnięcie przez odkształcenie względne obwodowe wartości granicznego jednostkowego odkształcenia podłużnego. Przyjmuje się, że obciążenie statyczne pionowe na obudowę wywiera objętość materiału skalnego z przestrzeni o szerokości wyłomu w zasięgu strefy plastycznej. Utrata własności sprężystych górotworu powoduje powstanie określonych przemieszczeń, które konstrukcja obudowy musi przejąć.

4. Badania nad sprecyzowaniem zasad doboru obudów powłokowych

4.1. Dane wejściowe do obliczeń

W etapie dokonywania założeń projektowych przyjęto:

— głębokość lokalizacji wyrobiska H równą:

$$H = 500, 600, 700, 800, 900, 1000 \text{ m};$$

— wyrobisko o przekroju łukowym z zastosowaniem odrzwi [12]:

- trzyczęściowych ŁP8/V29/A posadowionych na stalowych stopach podporowych;
- czteroczęściowych: ŁP10/V36/A, ŁP12/V36/A posadowionych na stalowych stopach podporowych (rys. 1), których wymiary poprzeczne przekroju umieszczone są w tabeli 1;

— wskaźnik zwięzłości skał wg Protodiakonowa f wynoszący:

$$f = 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0.$$

Wartości wskaźnika zwięzłości przyporządkowano rodzaj skały, jej podzielność i rozmakalność (tab. 2) oraz obliczeniowe wartości parametrów geotechnicznych skał (tab. 3–5).

TABELA 1
Wytypowane przekroje wyrobisk korytarzowych łukowych z odrzwi trzyczęściowych i czteroczęściowych [12]

Wielkość odrzwi	Szerokość użyteczna	Szerokość wyrobiska przy spągu	Wysokość wyrobiska	Wysokość obudowy	Promień łuku ociosowego	Promień łuku stropnicowego	Położenie środka okręgu		Powierzchnia przekroju poprzecznego wyrobiska
	<i>A</i>	<i>s</i>	<i>h</i>	<i>w</i>	<i>R₁</i>	<i>R₂</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>F</i>
	cm								
ŁP8/N29/A	408	470	305,0	330,0	262,5	225,0	76	27,5	11,89
ŁP10/N36/A	507	550	355,0	380,0	307,5	272,5	87	32,5	16,40
ŁP12/N36/A	578	610	397,5	422,5	342,5	300,0	96	37,5	20,30

TABELA 2

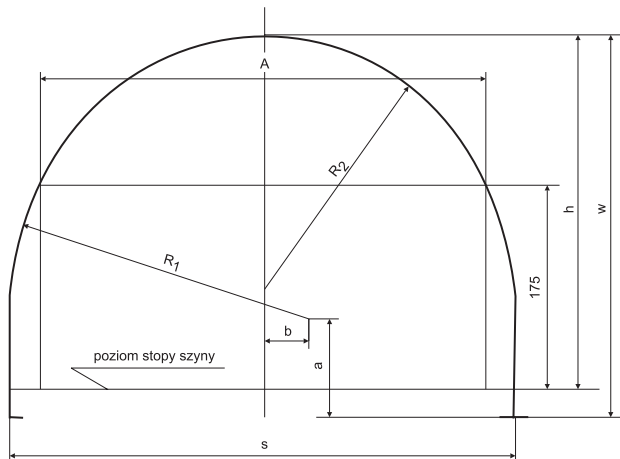
Przyporządkowanie wskaźnikowi zwięzłości rodzaju, podzielności oraz rozmakalności skały

Wskaźnik zwięzłości f	Nazwa skały	Podzielność skały	Rozmakalność skały r
5,0	piaskowiec	masywna	0,8
4,5			0,75
4,0			0,7
3,5	mułowiec	blokowa	0,65
3,0			0,6
2,5			0,55
2,0	iłowiec	płytowa	0,53
1,5			0,5

TABELA 3

Przyporządkowanie wartości obliczeniowych parametrów geotechnicznych skał wartościom wskaźnika zwięzłości [3]

Wskaźnik zwięzłości f	$\rho_o^{(r)}$	$R_{cs}^{(r)}$	$R_{rs}^{(r)}$	$\Phi_s^{(r)}$	$c_s^{(r)}$	$v_s^{(r)}$	$E_s^{(r)}$	$\epsilon_{ns}^{(r)}$	$\phi_{\sigma}^{(r)}$
	kg/m ³	MPa	MPa	...°	MPa	–	MPa	–	...°
1,5	2,750	10,5	0,72	33,3	3,9	0,25	3150	0,0037	46,4
2,0	2,750	14,0	0,96	33,7	5,3	0,24	3850	0,0036	54,5
2,5	2,750	17,5	1,14	34,0	6,5	0,23	4550	0,0035	60,3
3,0	2,750	21,0	1,32	36,7	6,3	0,22	5250	0,0034	64,5
3,5	2,750	24,5	1,50	37,1	7,4	0,22	5950	0,0034	67,8
4,0	2,750	28,0	1,68	40,0	5,7	0,21	6650	0,0033	70,3
4,5	2,750	31,5	1,80	40,3	6,4	0,20	7350	0,0032	72,4
5,0	2,750	35,0	1,98	40,6	7,1	0,19	8050	0,0031	74,1



Rys. 1. Przekrój wyrobiska korytarzowego łukowego z odrzwi trzyczęściowych i czteroczęściowych posadowionych na stopach podporowych (objaśnienia — por. tab. 1) [12]

TABELA 4

Wartości współczynników k_0 i k_1 w zależności od podzielności i rozmakalności skał [10]

Podzielność skał	Odstępy powierzchni spękań i warstwowania, m	k_0		k_1		
		$r \geq 0,8$	$0,5 \leq r \leq 0,8$	$r \geq 0,8$	$0,5 \leq r \leq 0,8$	
masywna	powyżej 2,0	1,0	0,5	1,05	ił. muł. ł.w.	1,10
					piask. zlep.	1,05
blokowa	od 0,5 do 2,0	0,9	0,5	1,05	ił. ł.w. muł.	1,15
					piask. zlep.	1,10
płytkowa	od 1 do 0,5	0,7	0,5	1,05	ił. ł.w. muł.	1,20
					piask. zlep.	1,10
kostkowa	do 0,1	0,5	0,5	1,05	ił. ł.w. muł.	1,25
					piask. zlep.	1,10

ił. — iłowiec, ł.w. — łupek węglowy, muł. — mułowiec, piask. — piaskowiec, zlep. — zlepienie

TABELA 5

Klasyfikacja podzielności skal [10]

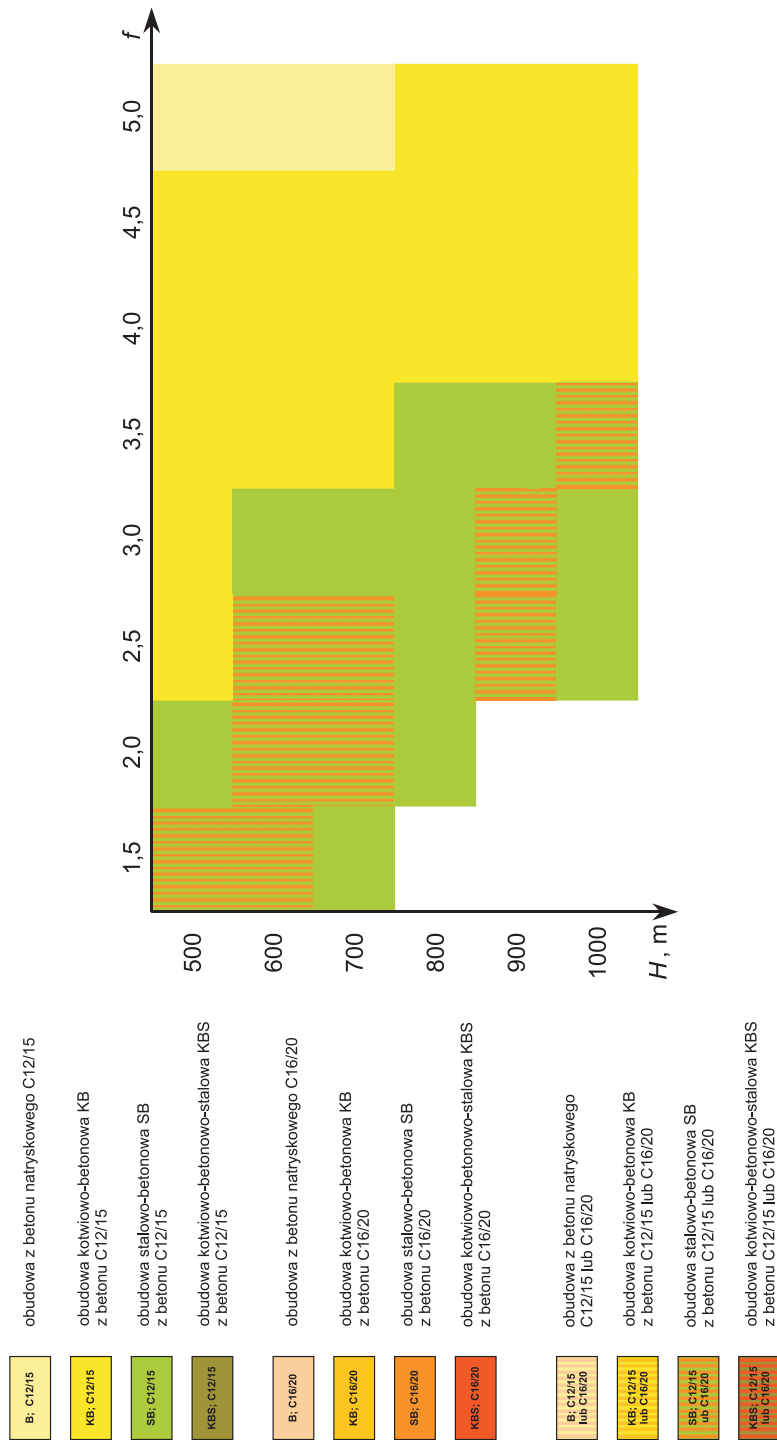
Nazwa klasy	Symbol klasy	Cechy rozpoznawcze klasy
		Odstępy powierzchni spękań i warstwowania
masywna	MW	powyżej 2,0 m
blokowa	BL	od 0,5 m do 2,0 m
plytowa	PL	od 0,1 m do 0,5 m
kostkowa	K	poniżej 0,1 m

W obliczeniach przyjęto, że obudowy zostaną zaprojektowane z następujących materiałów:

- beton **C12/15** i **C16/20**, przy czym beton **C16/20** zostanie użyty w sytuacji pozwalającej na zmniejszenie grubości powłoki betonowej lub kiedy możliwość stosowania betonu **C12/15** zostanie wyczerpana;
- kotwie spoiwowe o utwierdzeniu ciągłym charakteryzujące się następującymi parametrami [13]:
 - średnica kotwi $d_k = 0,022$ m;
 - średnica otworu $d_o = 0,036$ m;
 - długość całkowita kotwi $l_c = 3,1$ m;
 - granica plastyczności na rozciąganie stali kotwi $R_e = 309$ MPa;
 - wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie spoiwa kotwiowego $R_{tz} = 5,9$ MPa;
 - odległość kotwi po obrysie wyrobiska $a = 1,3$ m;
 - odległość rzędów kotwi $b = 1,1$ m;
- łuki stropnicowe i ociosowe z kształtowników korytkowych V29 i V36 wykonane ze stali 34GJ:
 - pole przekroju łuku $A = \begin{cases} 0,00370 \text{ m}^2 & \text{dla V29,} \\ 0,00457 \text{ m}^2 & \text{dla V36,} \end{cases}$
 - rozstaw odrzwi $d = 1$ m,
 - granica plastyczności na rozciąganie stali łuków $R_e = 340$ MPa,
 - wytrzymałość na rozciąganie stali łuków $R_m = 550$ MPa.

Ponadto przyjęto:

- przemieszczenie obwodowe obudowy na odcinku dylatacji podłużnej $d_p = 0,5$ m,
- liczbę dylatacji podłużnych w obudowie $t = 3$.



Rys. 2. Zakres stosowania obudowy powłokowej z techniczno-ekonomicznego punktu widzenia (przykładowo dla odrzwi ŁP12/V36/A)

4.2. Wyniki obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla zadanych warunków górnictwo-geologicznych (ogółem 144 zestawów danych). Wyznaczono optymalne konstrukcje obudowy, tzn. spełniające warunek nośności oraz ekonomicznej opłacalności. Na ich podstawie sporządzono graficzną prezentację zasad doboru konstrukcji obudowy powłokowej (rys. 2).

5. Podsumowanie

Celem analizy było doprecyzowanie zakresu stosowania obudów powłokowych z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych. Przeprowadzoną analizę zasad doboru obudowy powłokowej oparto na wykonaniu 144 projektów dla szeregu danych, z wykorzystaniem m.in. różnych wartości parametrów geotechnicznych skał, głębokości lokalizacji wyrobiska, trzech typów odrzwi. Otrzymane wyniki pozwoliły na określenie rodzaju obudowy stosowanej w konkretnych warunkach oraz wykazały, która z obudów powłokowych jest optymalnym rozwiązaniem zarówno z technicznego, jak i ekonomicznego punktu widzenia. Opracowana graficzna prezentacja (rys. 2) może stanowić pomoc dla projektanta przy doborze optymalnej konstrukcji obudowy powłokowej dla zadanych warunków geologiczno-górnictwo-geologicznych.

LITERATURA

- [1] BN-78/0434-07: Wyrobiska korytarzowe i komorowe w kopalniach. Obudowa powłokowa. Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych
- [2] BN-79/0434-04: Wyrobiska korytarzowe w kopalniach. Obudowa sklepiena. Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych
- [3] BN-82/0434-07: Wyrobiska korytarzowe i komorowe w kopalniach. Obudowa powłokowa. Wytyczne projektowania i obliczeń statycznych
- [4] *Chudek M., Gluch P., Szczepaniak Z.*: Drażenie wyrobisk korytarzowych. Gliwice, Politechnika Śląska 1985
- [5] *Chudek M.*: Obudowa wyrobisk górniczych. Cz. 1. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Wyd. Śląsk 1986
- [6] *Godziek J., Stapor W.*: Technologie drażenia wyrobisk korytarzowych w strefach uskokowych. Projekty — Problemy, *Budownictwo Węglowe*, r. XXIII, nr 4, 1978, 1–11
- [7] Perspektywy rozwoju budownictwa podziemnego w Polsce a jego rozwój w świecie: Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa 18–20 marca 1998, *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, numer specjalny 1998
- [8] *Pękacki W., Rycman S., Tokarz A.*: Polskie budownictwo górnicze — doświadczenia i przyszłość. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, r. II, nr 2, 1996, 2–5
- [9] *Pękacki W.*: Budownictwo górnicze podziemne. Cz. I. Wykonywanie wyrobisk korytarzowych i komorowych. Katowice, Wyd. Śląsk 1971
- [10] PN-G-05020:1997: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa sklepiena. Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [11] PN-G-05600:1998: Podziemne wyrobiska korytarzowe i komorowe. Obudowa powłokowa. Zasady projektowania i obliczeń statycznych
- [12] PN-G-06010:1998: Wyrobiska korytarzowe poziome i pochyle w zakładach górniczych. Przekroje poprzeczne symetryczne
- [13] PN-G-15091:1998: Kotwie górnicze. Wymagania
- [14] *Poradnik górnika*, t. 2. Katowice, Wyd. Śląsk 1975

- [15] *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
- [16] *Wichur A., Gruszka R.*: Nowe normy projektowania obudowy długotrwałych podziemnych wyrobisk korytarzowych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Budownictwo Podziemne 2000”, Kraków 25–27 września 2000, 595–604
- [17] *Żyliński R.*: Budownictwo górnictwa w Polsce — szanse i zagrożenia. Budownictwo Górnictwa i Tunelowe, r. IV, nr 3, 1998, 1–5