

*Sławomir Bock**

KOMPLEKSOWA METODA INTERPRETACJI WYNIKÓW NIENISZCZĄCYCH BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI BETONU OBUDOWY SZYBOWEJ

Streszczenie

W badaniach jakości obudowy szybów, będących głównymi drogami komunikacyjnymi w kopalniach podziemnych, określenie parametrów mechanicznych i fizykochemicznych obmurza, a przede wszystkim wielkości ich zmian w stosunku do wartości początkowych, ma decydujące znaczenie dla prawidłowej oceny stanu technicznego całej konstrukcji. W artykule, który został opracowany na podstawie pracy doktorskiej, przedstawiono metodę pozwalającą na zminimalizowanie błędu oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu, powszechnie stosowanego jako materiał obudowy w czynnych szybach GZW. Efektem przeprowadzonych badań laboratoryjnych i dołowych było opracowanie wzorów oraz programu do obliczania wytrzymałości na ściskanie w zależności od liczby odbicia i prędkości fal ultradźwiękowych metodą łącznej interpretacji wyników. Opracowane wzory mogą być wykorzystane zarówno w przypadkach obudów betonowych, z których pobrano próbki rdzeniowe, jak i obudów, z których pobranie próbek było niemożliwe. W procesie weryfikacji wzorów wykazano, że ich zastosowanie do interpretacji wyników nieniszczących badań obudowy szybowej w zasadniczy sposób poprawiło wiarygodność oceny wytrzymałości betonu na ściskanie.

Complex method of interpreting results of non-destructive testing of shaft lining concrete strength

Abstract

In testing quality of shaft linings, which are main communication passages in underground mines, determining mechanical and physio-chemical parameters of a lining, and above all rate of their change in relation to initial values, has decisive meaning for the proper assessment of the technical state of the whole construction. In the article, which was drawn up on the basis of Doctoral Thesis, a method which allows to minimize estimation error of concrete compressive strength, widely used as a lining material in active GZW (Uppersilesian Coal Basin) shafts, was presented. The effect of conducted laboratory and underground testing was developing patterns and a programme to measure compressive strength, depending on number of rebounds and ultrasound waves speed with a method of combined interpretation of results. Developed patterns can be used both in case of concrete lining, from which core samples were collected, as well as linings, from which taking samples was impossible. In the process of their verification it was demonstrated, that their application in interpreting results of non-destructive testing of shaft lining has, in principle improved the credibility of assessment of concrete compressive strength.

WPROWADZENIE

Podstawowymi wyrobiskami struktury komunikacyjnej kopalni są szyby i podszybia, których obudowa powinna, oprócz izolacji od środowiska zewnętrznego, spełniać także rolę „fundamentu” dla specjalistycznych konstrukcji będących na ich

* Główny Instytut Górnictwa.

wyposażeniu (Stałęga i in. 1998). Z uwagi na czynniki fizykochemiczne środowiska bezpośredniego otoczenia szybu (wysokie i niskie temperatury, agresywne wody i gazy itp.), każdy materiał zastosowany do jego budowy ulega z czasem degradacji, zmieniają się jego parametry fizykochemiczne i mechaniczne, a co za tym idzie – zmniejsza się trwałość i stateczność (Majcherczyk i in. 2000; Witosiński 2002).

Metody stosowane do oceny jakości obudów betonowych szybów są w różnym stopniu zaawansowane pod względem technicznym. Pozwalają one na ocenę jakości szybu zarówno pod względem makroskopowym, struktury wewnętrznej betonu, jak i jego parametrów mechanicznych oraz fizykochemicznych. Każda z tych ocen ma wpływ na określenie jakości konstrukcji. Jakkolwiek wady makroskopowe – pęknięcia, szczeliny – są stosunkowo łatwe do identyfikacji, to stwierdzenie zmian właściwości fizykochemicznych betonu wymaga zastosowania specjalistycznych urządzeń.

W zależności od funkcji szybu (materiałowy, zjazdowy, wentylacyjny, z naczyniami wyciągowymi lub bez) różne są nakłady związane z jego renowacją, inaczej są interpretowane wyniki danego pomiaru i inny jest zakres metod badawczych możliwych do wykorzystania w ocenie jego obudowy. Zakres ten wynika z doboru badanych parametrów obudowy, a także jest uzależniony od możliwości poruszania się w szybie (obecności urządzeń wyciągowych lub przedziału drabinowego, dostępu do obmurza) oraz obecności przyłączy do mediów (elektrycznych, hydraulicznych lub pneumatycznych do zasilania aparatury badawczej).

Do określenia wytrzymałości na ściskanie obudów betonowych najczęściej wykorzystuje się metody nieniszczące sklerometryczną i ultradźwiękową. Innymi popularnymi metodami określania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie są pólniszczące metody *pull-off* i *pull-out* oraz badania wytrzymałościowe rdzeni pobranych bezpośrednio z obudowy szybowej (metoda niszcząca). Kontrola stanu technicznego polega przede wszystkim na identyfikacji pustek, spękań i szczelin, na przykład z wykorzystaniem metody makroskopowej, metody „Impact-Echo”, „Impulse-Response” i georadarowej. W szczególnych przypadkach określa się również takie parametry fizykochemiczne betonu, jak: dojrzałość, wodoszczelność, gazoszczelność, zawartość i rozkład chlorków w przekroju obudowy czy głębokość karbonatyzacji.

1. CEL I TEZA ROZPRAWY

Celem poznawczym rozprawy było określenie wiarygodności metod sklerometrycznej i ultradźwiękowej do oceny wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybu. Podstawę do jej określenia stanowiły:

- badania *in situ* i laboratoryjne wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybu metodami sklerometryczną, ultradźwiękową oraz próbek pobranych z obudowy szybowej w maszynie wytrzymałościowej typu MTS wraz z analizą porównawczą wyników,
- analiza błędów oznaczeń uzyskanych metodami sklerometryczną i ultradźwiękową w porównaniu z oznaczeniami uzyskanymi z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej typu MTS.

Celem utylitarnym było opracowanie metody łącznej interpretacji wyników badań wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybowej, uzyskanych powszechnie stosowanymi metodami sklerometryczną i ultradźwiękową, która pozwoliła na zminimalizowanie błędu oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybowej. Jej opracowanie było możliwe przy założeniu słuszności tezy, że:

Istnieje zależność zwiększająca dokładność oznaczenia metodami sklerometryczną i ultradźwiękową wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybowej.

Zależność taką określono na podstawie analizy porównawczej dużej liczby oznaczeń jednostkowych wytrzymałości na ściskanie betonu wykonanych bezpośrednio na obudowie szybu, z wyciętych jego fragmentów oraz próbek betonu przygotowanych w warunkach laboratoryjnych.

2. KOMPLEKSOWA METODA INTERPRETACJI WYNIKÓW NIENISZCZĄCYCH BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI BETONU OBUDOWY SZYBOWEJ

Podstawę metody sklerometrycznej stanowi zależność między powierzchniową twardością betonu a jego wytrzymałością na ściskanie (PN-74/B-06262; ITB nr 210). Wadami tej metody są przede wszystkim duży błąd oznaczania i konieczność każdorazowego wyznaczania krzywych skalowania dla poszczególnych konstrukcji. Obecnie obowiązująca norma (PN-EN 12504-2:2002) w większym zakresie dopuszcza indywidualne opracowanie sposobu prowadzenia pomiarów i interpretacji wyników, co umożliwia dostosowanie procesu badawczego do lokalnych warunków ich wykonywania.

Na dokładność oceny wytrzymałości na ściskanie betonu metodą sklerometryczną wpływa między innymi: skład zaprawy, technologia wykonania obudowy, jej wiek, wilgotność, stopień karbonatyzacji. W Polsce już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku były prowadzone badania nad wpływem tych czynników na wynik końcowy, na podstawie którego opracowano współczynniki poprawkowe oraz zależności empiryczne (Brukarski, Runkiewicz 1973; Flaga 1976; Runkiewicz 1991; Brunarski 1996; Runkiewicz 2002).

Kolejną metodą, powszechnie używaną do badań wytrzymałościowych betonu, jest metoda ultradźwiękowa. Zgodnie z tą metodą do pomiaru stosuje się różne aparaty ultradźwiękowe (betonoskopy), którymi na podstawie czasu przejścia fali przez badany ośrodek jest określana jego wytrzymałość na ściskanie (ITB nr 209; PN-74/B-06261; PN-EN 12504-4:2005). Pojedyncze miejsce pomiarowe stanowią dwa punkty leżące w dokładnie określonej odległości od siebie, w których umieszcza się głowice nadawczą i odbiorczą (Nagrodzka-Godycka 1999).

Podobnie, jak w przypadku metody sklerometrycznej, na dokładność oceny wytrzymałości na ściskanie wpływa wiele czynników. Są to między innymi: skład zaprawy, technologia wykonania, wiek obudowy, jej wilgotność. W analogiczny sposób, jak w przypadku metody sklerometrycznej, można uwzględnić wpływ tych czynników z wykorzystaniem dodatkowych współczynników poprawkowych, bądź określając nowe zależności empiryczne (ITB nr 209; Kozak i in. 1970; Nagrodzka-Godycka 1999; Runkiewicz 2002).

W celu określenia wytrzymałości betonu prowadzono także badania zależności prędkości propagacji fal ultradźwiękowych i liczby odbicia od wytrzymałości na ściskanie. W Polsce były podejmowane próby zastosowania zależności empirycznych dwóch zmiennych oraz analizy statystycznej wyników uzyskanych niezależnie poszczególnymi metodami (Brunarski 1996; Nagrodzka-Godycka 1999; Runkiewicz 2002). Takie łączenie metod ultradźwiękowej i sklerometrycznej pozwala na zmniejszenie średniego błędu względnej oceny wytrzymałości z około 33 do 25%, wymaga jednak każdorazowego opracowania, dla badanego betonu, nowych zależności empirycznych (Runkiewicz 2002). Brak współczynników korygujących dla opracowanych zależności ogranicza stosowalność metody, szczególnie w przypadku badań obudów szybowych, w których wytrzymałość betonu może być bardzo zmienna na poszczególnych głębokościach z uwagi na zróżnicowanie warunków środowiskowych (np. temperatury, wilgotności, agresywności wód).

Inny, stosowany w Polsce sposób łączenia metod ultradźwiękowej i sklerometrycznej do oceny wytrzymałości na ściskanie betonu, polega na analizie statystycznej wyników (ITB nr 210; Nagrodzka-Godycka 1999). Istotną wadą tego sposobu jest jednak brak analizy błędów oceny wytrzymałości na ściskanie w kolejnych punktach pomiarowych. Możliwe jest jedynie określenie przedziału prawdopodobnej wartości **średniej** wytrzymałości na ściskanie betonu. W przypadku, gdy w pojedynczych punktach pomiarowych, wytrzymałość znacząco odbiega od średniej, zwiększa się błąd końcowy oceny.

Wykonane przez autora badania wykazały, że istnieją metody pozwalające na zminimalizowanie błędów szacowania wynikającego z empirycznych zależności każdej z metod. Zastosowanie metod ultradźwiękowej i sklerometrycznej w tym samym punkcie pomiarowym oraz laboratoryjne badanie własności mechanicznych materiału pobranego z miejsca wykonywania pomiarów nieniszczących umożliwiły ocenę jakości wyników prowadzonych badań oraz opracowanie łączących je zależności w postaci wzorów matematycznych (Bock i in. 2005, 2006; Bock 2006).

2.1. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne wytrzymałości na ściskanie były prowadzone na sześciennych kostkach betonowych, o boku 150 mm. Próbkki betonowe zostały przygotowane w klasach C12/15–C30/37, a więc w przedziałach wytrzymałości na ściskanie $f_{ck,cube}$ od 15 do 37 N/mm² (MPa). Zmiana wytrzymałości próbek była realizowana przez zmiany receptury mieszanek betonowych. Próbkki wykonywano i dojrzewały zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie (PN-EN 206-1:2003), a badania laboratoryjne prowadzono po 28 dniach.

W pierwszym etapie badań laboratoryjnych, usztywniane w maszynie wytrzymałościowej typu MTS próbkki betonowe, badano za pomocą młotka Schmidta oraz aparatu TICO, a następnie obciążano w celu określenia siły niszczącej. Próbkki były sporządzane o odpowiednio gładkich powierzchniach, nie wymagały więc szlifowania. Pomiarów wykonywano na próbkkach w stanie suchym.

Każdorazowo przed i po serii badań metodą sklerometryczną wskazania młotka Schmidta były sprawdzane na kowadełku kalibracyjnym. Badania laboratoryjne były

prorowadzone w temperaturze około 293 K (20°C) na czterech powierzchniach próbek usztywnionych w maszynie wytrzymałościowej w położeniu prostopadłym do badanych powierzchni i równoległym do podłoża (fot. 1).



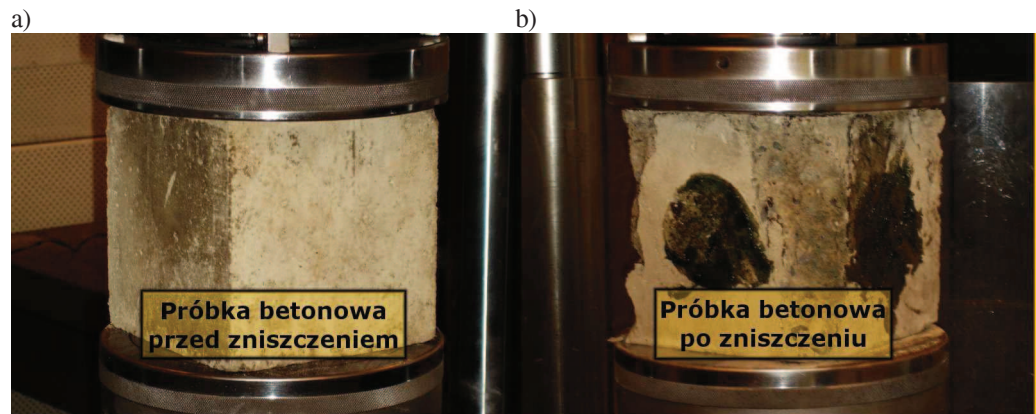
Fot. 1. Badania laboratoryjne kostkowych próbek betonowych – pomiar liczby odbicia za pomocą młotka Schmidta
Phot. 1. Laboratory testing of cube concrete samples – measurement of the number of rebounds using the Schmidt hammer

W badaniach ultradźwiękowych, w celu zapewnienia odpowiedniego sprzężenia akustycznego między betonem a powierzchnią głowic badawczych, zastosowano smar o konsystencji stałej. Pomiary metodą bezpośrednią prowadzono na przeciwległych powierzchniach usztywnionych próbek, aż do uzyskania wartości minimalnej czasu przejścia fali, świadczącej o zredukowaniu do minimum grubości ośrodka sprzęgającego – smaru (fot. 2).



Fot. 2. Badania laboratoryjne kostkowych próbek betonowych – pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej za pomocą aparatu ultradźwiękowego TICO
Phot. 2. Laboratory testing of cube concrete samples – measurement of ultrasound wave transition time using TICO Ultrasonic System

Cykl badań laboratoryjnych zakończono badaniami próbek w maszynie wytrzymałościowej MTS. Prędkość obciążania próbek wynosiła około 10 kN/s (0,4 MPa/s), co było zgodne z normą (PN-EN 12390-3:2002). Widok próbki betonowej przed i po badaniu w maszynie wytrzymałościowej MTS przedstawiono na zdjęciu 3. Łącznie, wyżej wymienionymi metodami, przebadano 135 próbek betonu.



Fot. 3. Laboratoryjne badania wytrzymałościowe kostkowych próbek betonowych – widok próbki przed (a) i po zniszczeniu (b) w sztywnej maszynie wytrzymałościowej typu MTS

Phot. 1. Laboratory testing of cube concrete samples strength – sample's view before (a) and after destruction (b) in stiff testing machine MTS

2.2 Badanie regresji liniowej

Do określenia wzajemnych zależności tego samego parametru mechanicznego, uzyskanego z trzech różnych metod badawczych, zastosowano analizę statystyczną. Cechą charakterystyczną opracowanej zależności aproksymującej jest wzajemne uzupełnianie się metod sklerometrycznej i ultradźwiękowej, a szczególnie możliwość zwiększania udziału w końcowym wyniku tej metody, której wiarygodność jest większa.

Do aproksymacji poszukiwanej funkcji wiążącej wytrzymałość na ściskanie, liczbę odbicia i prędkość fali ultradźwiękowej, zastosowano metodę sumy najmniejszych kwadratów, w następujących etapach:

- wyznaczenie i analiza porównawcza funkcji aproksymujących $f_{c.cube} = f_1(L)$; $f_{c.cube} = f_2(v)$,
- oznaczenie błędów d_1 i d_2 funkcji f_1 i f_2 ,
- wyznaczenie i analiza porównawcza funkcji aproksymującej $d_1 = f_3(L)$; $d_2 = f_4(v)$,
- wyznaczenie funkcji aproksymującej $f_{c.cube} = f_5(L, v)$, zakładającej różny udział funkcji f_1 i f_2 w wyniku końcowym w zależności od wartości funkcji błędów d_1 i d_2 .

Wyznaczenie i analizę porównawczą funkcji aproksymujących wyniki pomiarów przeprowadzono dla następujących wielomianów:

$$f(x) = ax + b \quad (1)$$

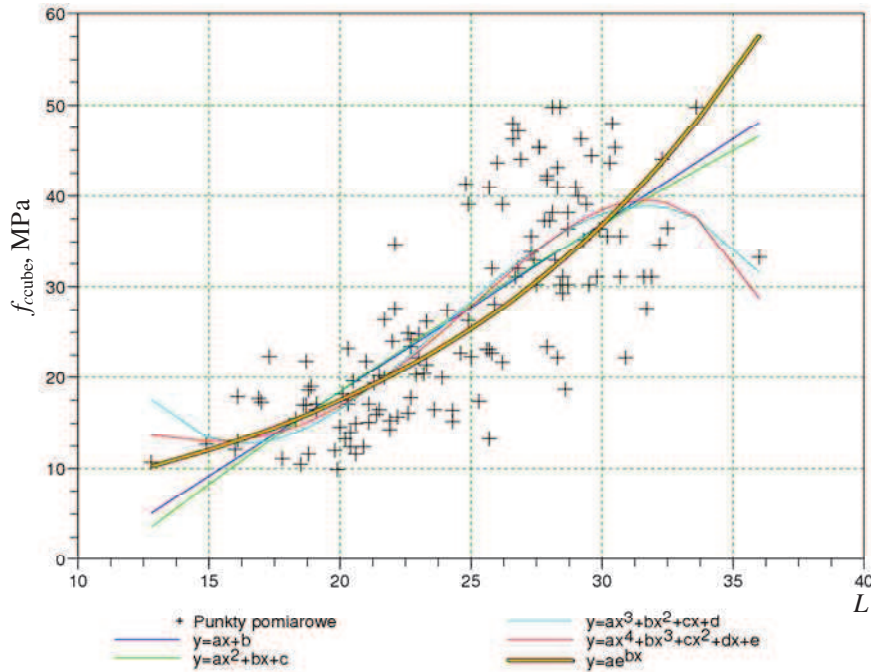
$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3)$$

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (4)$$

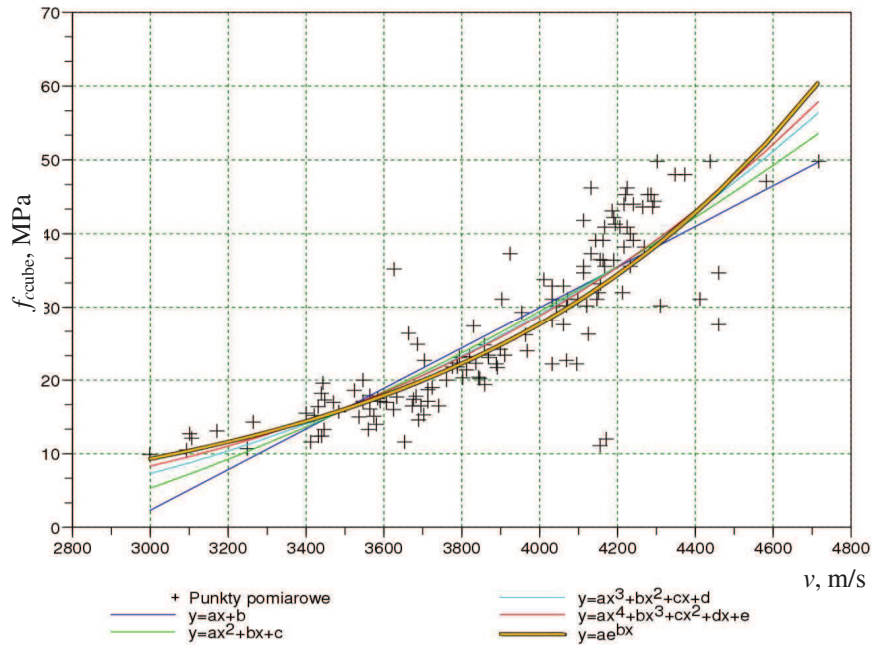
$$f(x) = ae^{bx} \quad (5)$$

Użycie opracowanego programu wsadowego, pracującego w środowisku Scilab (Scilab 2009), dla 135 oznaczeń jednostkowych wszystkich trzech metod pomiarowych doprowadziło do wyznaczenia wektorów współczynników kierunkowych dla poszczególnych wielomianów aproksymujących wytrzymałość na ściskanie w funkcji liczby odbicia oraz w funkcji prędkości fal ultradźwiękowych. Dane pomiarowe oraz wykresy otrzymanych funkcji aproksymujących przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Wykres funkcji aproksymującej wytrzymałość na ściskanie $f_{c\text{ cube}}$ w zależności od liczby odbicia L

Fig. 1. Graph of function approximating compressive strength $f_{c\text{ cube}}$ depending on number of rebounds L



Rys. 2. Wykres funkcji aproksymującej wytrzymałość na ściskanie $f_{c\ cube}$ w zależności od prędkości propagacji fal ultradźwiękowych v

Fig. 2. Graph of function approximating compressive strength $f_{c\ cube}$ depending on speed of propagation of ultrasound waves v

2.3. Analiza błędów i optymalizacja funkcji aproksymujących

W celu przeprowadzenia analizy błędów do programu wsadowego dodano komendy tworzące, dla poszczególnych funkcji, macierze odchyłeń standardowych reszt σ , obliczanych jako pierwiastek z wariancji reszt S^2 :

$$\sigma = \sqrt{S^2} \tag{6}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} \tag{7}$$

gdzie:

- σ – odchylenie standardowe reszt,
- S^2 – wariancja reszt,
- y_i – wartość empiryczna i -tej próbki,
- \hat{y}_i – wartość teoretyczna i -tej próbki.

Dodatkowo, aby ocenić jakość otrzymanych współczynników wielomianów, do programu wsadowego dodano funkcję *regresja*, umożliwiającą obliczanie współczynnika korelacji krzywoliniowej R jako:

$$\Phi_{y\hat{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

$$R = \sqrt{1 - \Phi_{y\hat{y}}^2} \quad (9)$$

gdzie:

y_i – wartość rzeczywista dla i -tego argumentu,

\hat{y}_i – wartość funkcji aproksymującej dla i -tego argumentu,

\bar{y} – średnia wartość rzeczywista.

Wszystkie wyznaczone funkcje zarówno dla badań sklerometrycznych, jak i ultradźwiękowych, cechowały się dużymi wartościami współczynników korelacji krzywoliniowej ($R > 0,7$), pomimo dużej zmienności wytrzymałości badanych próbek wynoszącej od 9,9 do 49,8 MPa. W niemal całym zakresie otrzymanych liczb odbicia L oraz prędkości fal ultradźwiękowych v wartości błędów nie wykazały wyraźnej tendencji spadkowej czy rosnącej. Pozwoliło to na stwierdzenie, że rozrzut punktów pomiarowych był spowodowany wyłącznie błędami własnymi metod pomiarowych.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że największymi wartościami współczynników korelacji krzywoliniowej charakteryzowały się wielomiany 3° i 4°.

W warunkach dołowych oznaczenia otrzymywane metodami sklerometryczną (liczba odbicia L) i ultradźwiękową (prędkość propagacji fal ultradźwiękowych v) niejednokrotnie charakteryzowały się mniejszymi bądź większymi wartościami, nieuwzględnionymi w badaniach laboratoryjnych. Z tego powodu, pomimo dużych współczynników korelacji, jako funkcji bazowych nie wybrano wielomianów trzeciego i czwartego stopnia, ponieważ kształt krzywych świadczył o możliwych zafałszowaniach przy skrajnych wartościach oznaczeń. Z uwagi na wartości maksymalne i średnie odchyłek teoretycznych i empirycznych wytrzymałości na ściskanie oraz kształt krzywych, do dalszych rozważań przyjęto w obu przypadkach funkcje wykładnicze:

$$f_{c,\text{cube}} = 3,95e^{0,0745 L} \quad (10)$$

$$f_{c,\text{cube}} = 0,355e^{0,00109 v} \quad (11)$$

W celu określenia końcowej wytrzymałości na ściskanie obudowy konkretnego szybu, opracowano następującą formułę sprzężoną

$$f_{c,\text{cube}} = W_L (3,95e^{0,0745 L} + c_L) + W_v (0,355e^{0,00109 v} + c_v) \quad (12)$$

gdzie:

$f_{c,\text{cube}}$ – wytrzymałość na ściskanie kostkowych próbek betonowych, MPa;

L – liczba odbicia;

- v – prędkość propagacji fal ultradźwiękowych, m/s;
 c_L – wartość przesunięcia krzywej teoretycznej metody sklerometrycznej wyznaczana na podstawie badań próbek kontrolnych (rdzeni), MPa;
 c_v – wartość przesunięcia krzywej teoretycznej metody ultradźwiękowej wyznaczana na podstawie badań próbek kontrolnych (rdzeni), MPa;
 W_L – waga decydująca o udziale w końcowym wyniku metody sklerometrycznej;
 W_v – waga decydująca o udziale w końcowym wyniku metody ultradźwiękowej.

W sytuacji, gdy nie jest możliwe pobranie dużej liczby próbek rdzeniowych, a więc w sytuacji, gdy do wykonania kalibracji dysponuje się jedynie kilkoma punktami pomiarowymi, zamiast sporządzania krzywych skalowania dla konkretnego szybu (bądź obszaru betonu o zróżnicowanych właściwościach) zaproponowano oznaczanie wartości przesunięcia krzywych teoretycznych oraz wyznaczanie funkcji błędu, opisującej poprawność wzorów (10, 11) w zależności od mierzonych liczb odbicia i prędkości fal ultradźwiękowych.

Określenie wielkości przesunięcia krzywych teoretycznych pozwala na dopasowanie ich do obszaru rzeczywistych pomiarów konkretnej konstrukcji – a więc uwzględnienie wpływu takich czynników, jak technologia wykonania obudowy, jej wiek, wilgotność czy stopień karbonatyzacji. Z kolei, wyznaczenie funkcji błędu dla każdej z metod pozwala na oszacowanie „dopasowania kształtu” przesuniętych krzywych teoretycznych w stosunku do punktów uzyskanych w badaniach kontrolnych obmurza i uwzględnienie w wyniku końcowym zwiększonego udziału (wag) tej metody, której błąd oznaczenia dla danych liczb odbicia L i prędkości fal ultradźwiękowych v jest mniejszy. W efekcie prowadzi to do znaczącego zmniejszenia błędu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie.

Wielkość przesunięcia krzywych teoretycznych obliczono następująco:

$$\sum (y_i - \hat{y}_i - c)^2 = \min \quad (13)$$

$$c = \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i) \quad (14)$$

W celu wyznaczenia funkcji błędu, kolejne zmierzone liczby odbicia i prędkości fal ultradźwiękowych, wstawiono do wzorów (10, 11) i uzyskany wynik porównano z wytrzymałością na ściskanie próbek rdzeniowych, określoną w sztywnej maszynie wytrzymałościowej. Z otrzymanych par punktów (błąd $df_{c,cube}$ i liczba odbicia L oraz błąd $df_{c,cube}$ i prędkość fal ultradźwiękowych v) wyznaczono funkcję błędu metody sklerometrycznej opisaną jako zależność między błędem a liczbą odbicia oraz funkcję błędu metody ultradźwiękowej opisaną jako zależność między błędem a prędkością fal ultradźwiękowych. Wagi W_L oraz W_v zdefiniowano jako stosunek wartości funkcji błędu metod sklerometrycznej i ultradźwiękowej w danych punkcie pomiarowym:

$$W_L = \frac{|df_{cv}|}{|df_{cv}| + |df_{cL}|} \quad (15)$$

$$W_v = \frac{|df_{cL}|}{|df_{cL}| + |df_{cv}|} = 1 - W_L \quad (16)$$

gdzie:

df_{cL} – funkcja aproksymująca zmiany wielkości błędu względnego oznaczenia wytrzymałości na ściskanie, obliczonego według (10), w zależności od liczby odbicia,

df_{cv} – funkcja aproksymująca zmiany wielkości błędu względnego oznaczenia wytrzymałości na ściskanie, obliczonego według (11), w zależności od wartości prędkości fal ultradźwiękowych.

Uwzględniając wagi metod, formuła sprzężona (12) przyjmuje następującą postać

$$f_{c,cube} = \frac{|df_{cv}|}{|df_{cv}| + |df_{cL}|} (3,95e^{0,0745L} + c_L) + \frac{|df_{cL}|}{|df_{cL}| + |df_{cv}|} (0,355e^{0,00109v} + c_v) \quad (17)$$

Z uwagi na stosunkowo złożony algorytm wyznaczania wytrzymałości na ściskanie opracowano program wsadowy pracujący w środowisku Scilab, do realizacji powyższych założeń. Schemat działania programu przedstawiono na rysunku 3.

W przypadku badań obudowy szybowej, z której z różnych względów nie pobrano próbek rdzeniowych, wagi W_L i W_v należy obliczać na podstawie wartości współczynników korelacji krzywoliniowej poszczególnych metod:

$$W_L = \frac{r_L}{r_L + r_v} \quad (18)$$

$$W_v = \frac{r_v}{r_L + r_v} = 1 - W_L \quad (19)$$

gdzie:

r_L – wartość współczynnika korelacji krzywoliniowej funkcji (10), $R_L = 0,72$,

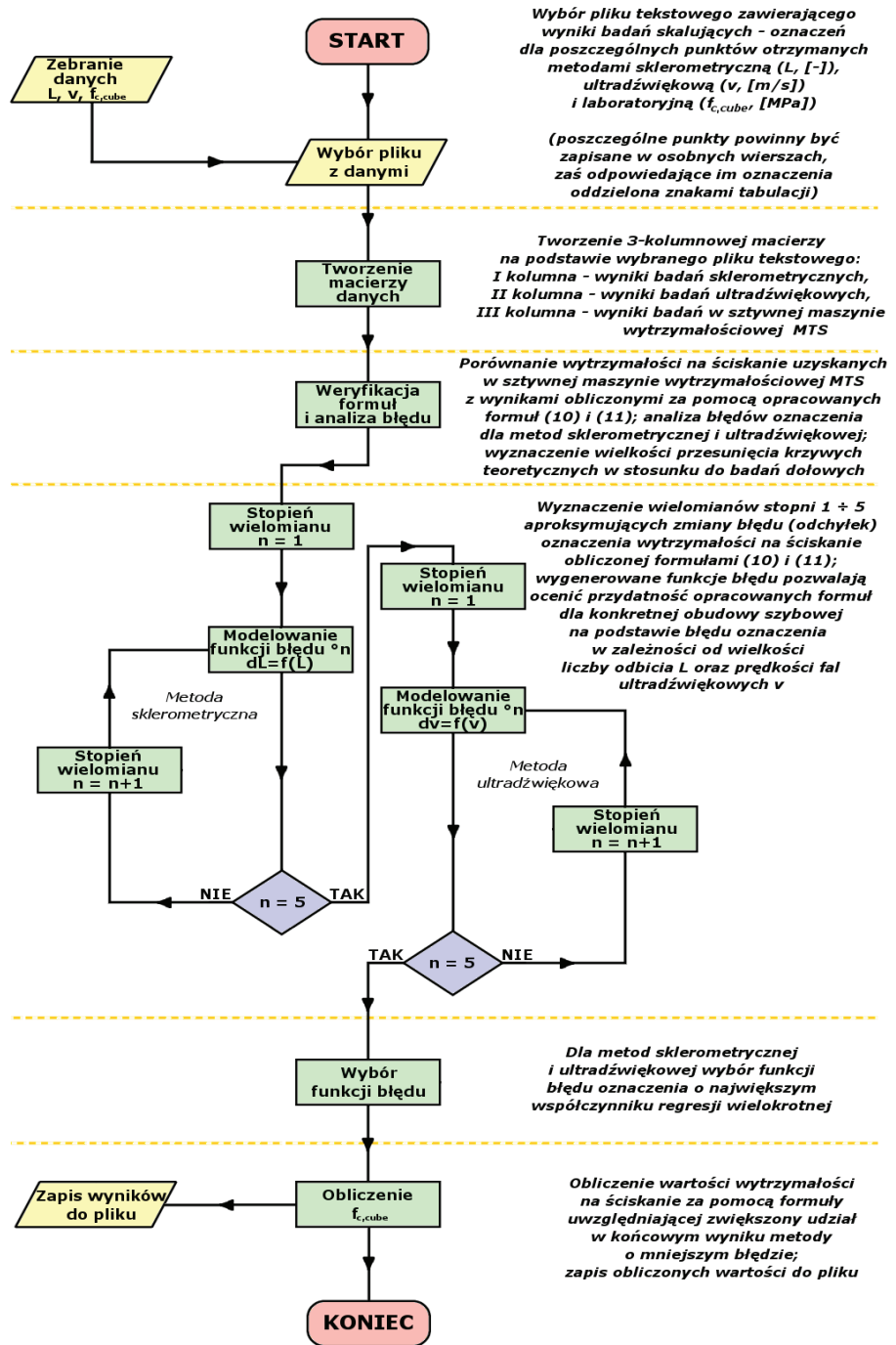
r_v – wartość współczynnika korelacji krzywoliniowej funkcji (11), $R_v = 0,85$.

Wzór sprzężony (12) przyjmie zatem w takich przypadkach następującą postać

$$f_{c,cube} = 1,81e^{0,0745L} + 0,192e^{0,00109v} \quad (20)$$

2.4. Badania *in situ*

Badania *in situ* betonowych obudów przeprowadzono w czterech szybach, oznaczonych umownie jako I, II, III oraz IV, zlokalizowanych na terenie trzech kopalń należących do Kompanii Węglowej SA oraz jednej należącej do Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA. Pomiaru nieniszczące, metodami sklerometryczną i ultradźwiękową, prowadzono w miejscach wyznaczonych do wykonania odwiertów, a następnie wyci-nano rdzenie przeznaczone do dalszych badań w sztywnej maszynie wytrzymałościowej typu MTS.



Rys. 3. Schemat programu wsadowego środowiska Scilab do obliczania wytrzymałości na ściskanie obudowy betonowej szybu

Fig. 3. Scheme of Scilab's script for concrete shaft lining compressive strength calculations

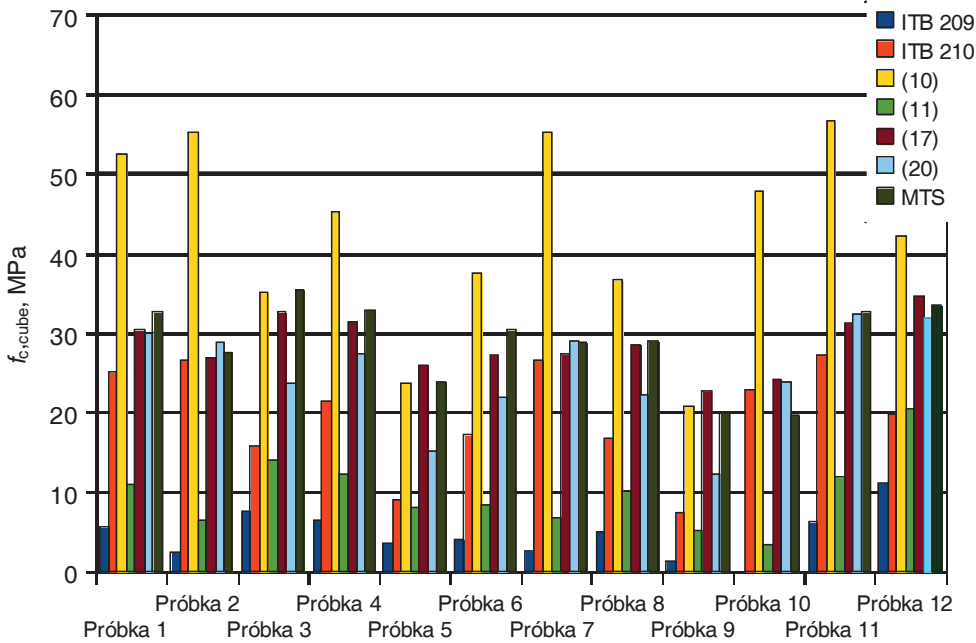
Analizę porównawczą wyników wytrzymałości na ściskanie, uzyskanych w maszynie wytrzymałościowej typu MTS, wykonano dla opracowanych wzorów:

- (10) – dla metody sklerometrycznej,
- (11) – dla metody ultradźwiękowej,
- (17) – dla metody sprężonej z rdzeniami kontrolnymi,
- (20) – dla metody sprężonej przy braku rdzeni kontrolnych.

Z uwagi na powszechność stosowania w Polsce metod sklerometrycznej i ultradźwiękowej według instrukcji opracowanych w Instytucie Techniki Budowlanej, przeprowadzono również analizę porównawczą oznaczeń wytrzymałości, uzyskanych zgodnie z (ITB nr 209) i (ITB nr 210). Na rysunku 4 przedstawiono przykład wyników badań kontrolnych dla jednego z szybów. W celu porównania otrzymanych wyników, obliczono współczynnik zmienności v_k

$$v_k = \frac{\sigma}{f_{c,cube_{MTS}}} \quad (21)$$

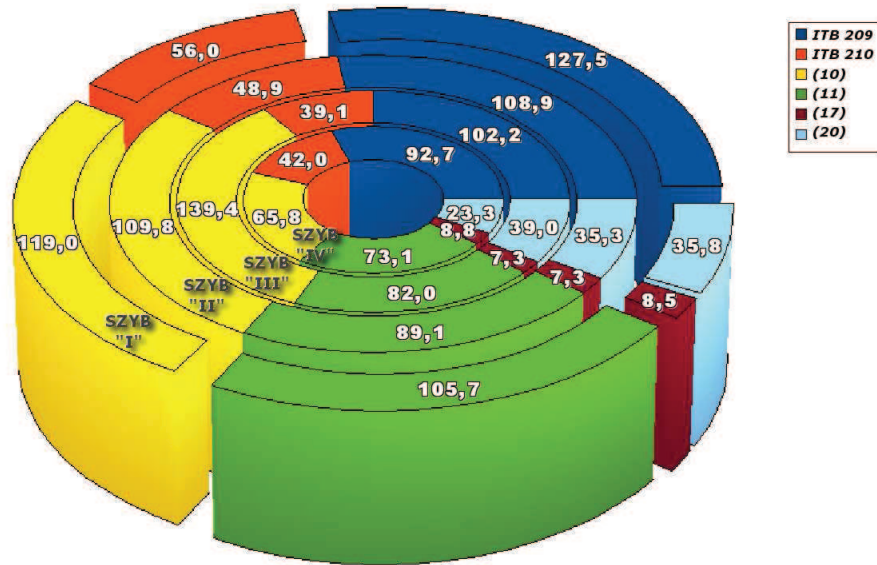
gdzie $f_{c,cube_{MTS}}$ – średnia wartość wytrzymałości na ściskanie normowych próbek kostkowych otrzymanych w maszynie wytrzymałościowej typu MTS, MPa.



Rys. 4. Przykład wyników badań kontrolnych rdzeni pobranych z obudowy szybowej (kolor ciemnozielony – MTS) oraz wytrzymałości na ściskanie wyznaczone poszczególnymi wzorami: 1–12 numery próbek

Fig. 4. Example of control testing results of core samples taken from shaft lining (dark green colour – MTS) as well as compressive strength designated by particular patterns: 1–12 sample numbers

Wartości współczynnika zmienności poszczególnych funkcji aproksymujących, uzyskane na podstawie badań kontrolnych w czterech szybach, przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Analiza wyników badań obudowy szybów I, II, III i IV – wartości współczynnika zmienności poszczególnych funkcji aproksymujących

Fig. 5. Results analysis of shaft lining testing I, II, III and IV – coefficient of variation of particular approximating functions

2.5. Analiza wyników

Badania laboratoryjne i *in situ* oraz analiza otrzymanych wyników wykazały słuszność przyjętego sposobu badań zmierzających do opracowania metody kompleksowej interpretacji wyników badań nieniszczących. W każdym z opisanych przypadków zastosowanie wzorów sprzężonych pozwoliło na znaczące zmniejszenie wartości współczynnika zmienności – a więc uzyskanie wartości wytrzymałości na ściskanie zbliżonych do wartości rzeczywistych. Przewaga funkcji sprzężonych była wyraźnie widoczna zarówno w przypadku wzoru (17) – uwzględniającego wpływ na końcowy wynik funkcji aproksymujących błędy poszczególnych składowych wzoru (części sklerometrycznej i ultradźwiękowej), a więc stosowanego w przypadku wykonywania odwiertów kontrolnych w obudowie szybowej, jak i w przypadku wzoru (20) – uwzględniającego wpływ na końcowy wynik stosunku wartości współczynników korelacji krzywoliniowej poszczególnych metod, a więc stosowanego w sytuacji braku dodatkowych odwiertów kontrolnych.

W przypadku sprzężonego wzoru (17) współczynnik zmienności we wszystkich przypadkach nie przekroczył 9%, co należy uznać za wynik bardzo dobry. Również w przypadku sprzężonego wzoru (20) uzyskano znaczną poprawę jakości oznaczeń

– współczynnik zmienności nie przekraczał 40%. Jednak w drugim przypadku o poprawie (zmniejszeniu) współczynnika zmienności zadecydowało zawyżanie otrzymanych wyników oznaczeń metodą sklerometryczną i zaniżanie metodą ultradźwiękową – w odniesieniu do wzorów opracowanych na podstawie próbek laboratoryjnych. W związku z tym, a także biorąc pod uwagę wciąż wysoką wartość współczynnika zmienności (prawie 40%), potwierdziła się konieczność wykonywania odwiertów kontrolnych obudowy w celu poprawnej oceny jej wytrzymałości na ściskanie.

PODSUMOWANIE

Badania oraz analiza ich wyników pozwoliły na zminimalizowanie błędu szacowania wytrzymałości na ściskanie betonu wynikającego z empirycznych zależności każdej z metod. Opracowane wzory mogą być zastosowane zarówno w przypadkach obudów betonowych, z których pobrano próbki rdzeniowe, jak i obudów, z których pobranie próbek było niemożliwe. W procesie weryfikacji opracowanych wzorów wykazano, że ich wykorzystanie do interpretacji wyników nieniszczących badań obudowy szybowej, w zasadniczy sposób poprawiło wiarygodność oceny wytrzymałości na ściskanie betonu. Potwierdziło to zasadność postawionej tezy, że:

Istnieje zależność zwiększająca dokładność oznaczenia wytrzymałości na ściskanie betonu obudowy szybowej metodami sklerometryczną i ultradźwiękową.

Dalszej analizie wymaga algorytm doboru funkcji błędu dla metod sklerometrycznej i ultradźwiękowej w opracowanym programie do obliczania wytrzymałości na ściskanie. Celem tej części programu jest analiza błędu krzywej bazowej w zależności od liczby odbicia L i prędkości propagacji fal ultradźwiękowych v , a więc analiza kształtu krzywych funkcji $f_{c,cube} = f(L, v)$ bazowej i wyznaczonej na podstawie próbek kontrolnych. Stosowanie wielomianów wyższych stopni, przy niewielkiej liczbie próbek rdzeniowych, powoduje zwiększenie wartości współczynnika korelacji krzywoliniowej, jednak jakość uzyskanego opisu zjawiska może budzić zastrzeżenia. Właściwa ocena zmian błędu oznaczenia dla krzywej bazowej (kształtu krzywej bazowej) zależy nie tylko od liczby próbek kontrolnych, lecz także od zakresu wartości ich parametrów ($L, v, f_{c,cube}$). Algorytm automatycznej oceny jakości próbek kontrolnych bazuje na porównaniu współczynnika regresji wielomianów kolejnych stopni dla poszczególnych funkcji błędów, jednak jego pełna implementacja jest przewidziana w następnych wersjach programu.

Należy podkreślić, że przedstawiona metoda kompleksowej interpretacji wyników nieniszczących badań wytrzymałości betonu obudowy szybowej może mieć zastosowanie również w przypadku tworzenia od podstaw nowych zależności między wytrzymałością na ściskanie a liczbą odbicia i prędkością fal ultradźwiękowych dla konkretnej obudowy szybowej, a także innych materiałów ceramicznych.

Literatura

1. Bock S. i in. (2005): Metodyka wyznaczania in situ wytrzymałości obudowy szybowej. Praca statutowa nr 11041605-153. Katowice, GIG (niepublikowana).
2. Bock S. i in. (2006): Analiza metod określających wytrzymałość materiałów stosowanych w obudowach murowych, betonowych i powłokowych. Praca statutowa nr 15020366-153. Katowice GIG (niepublikowana).
3. Bock S. (2006). Metody badań wytrzymałościowych obudowy szybów kopalnianych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 3.
4. Brunarski L., Runkiewicz L. (1973): O konieczności i zasadach skalowania w nieniszczących badaniach betonu. Biuletyn Informacyjny COIB nr 8.
5. Brunarski L. (1996): Nieniszczące badania betonu. Warszawa, Arkady.
6. Flaga K. (1976): Wpływ sposobu dojrzewania i warunków pielęgnacji na ocenę wytrzymałości betonu metodą sklerometryczną. Inżynieria i Budownictwo nr 11.
7. Instrukcja ITB nr 209 (1977): Instrukcja stosowania metody ultradźwiękowej do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji. Warszawa, ITB.
8. Instrukcja ITB nr 210 (1977): Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji. Warszawa, ITB.
9. Kozak R. i in. (1970): Budownictwo betonowe, Tom 8: Badanie materiałów, elementów i konstrukcji. Praca zbiorowa pod kierunkiem R. Kozaka. Warszawa, Arkady.
10. Majcherczyk T., Małkowski P., Witosiński J. (2000): Makroskopowa i laboratoryjna ocena stanu obudowy wyrobiska szybowego. Materiały Konferencyjne z XXIII Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej, Bukowina Tatrzańska, 13–17 marca.
11. Nagrodzka-Godycka K. (1999): Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych. Warszawa, Arkady.
12. PN-74/B-06261 Nieniszczące badania konstrukcji z betonu. Ultradźwiękowe badania wytrzymałości betonu na ściskanie.
13. PN-74/B-06262 Nieniszczące badania konstrukcji z betonu. Metoda sklerometryczna.
14. PN-EN 12390-3:2002 Badania betonu – część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
15. PN-EN 12504-2:2002 Badania betonu w konstrukcjach – część 2: Badania nieniszczące. Oznaczanie liczby odbicia.
16. PN-EN 12504-4:2005 Badania betonu – część 4: Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.
17. PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
18. Runkiewicz L. (1991): Wpływ wybranych czynników na wyniki badań sklerometrycznych betonu. Warszawa, ITB.
19. Runkiewicz L. (2002): Badania konstrukcji żelbetowych. Warszawa, Biuro Gamma.
20. Scilab – The open source platform for numerical computation (scilab.org).
21. Stałęga St. i in. (1998): Zasady likwidacji szybów i wyrobisk przyszybowych w kopalniach węgla kamiennego. Główny Instytut Górniczej Instrukcja nr 6.
22. Witosiński J. (2002): Uszkodzenia obudów szybowych oraz celowość ich defektoskopii metodami nieniszczącymi dla optymalizacji podstawowych technologii zabezpieczania. Budownictwo Górnicze i Tunelowe R. 8, nr 1.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Andrzej Kowalski