



**KRZYSZTOF  
ŚLEDZIEWSKI**

Politechnika Lubelska  
k.sledziwski@pollub.pl

---

## Nieniszczące badania wytrzymałości betonu w konstrukcjach mostowych – metoda sklerometryczna

Wytrzymałość na ściskanie jest podstawową cechą mechaniczną charakteryzującą materiał budowlany. Właściwość ta jest ściśle związana z mikrostrukturą stwardniałego zaczynu cementowego oraz wytrzymałością kruszywa i strefy kontaktowej kruszywo – zaczyn [13]. Przez wytrzymałość na ściskanie rozumie się maksymalne naprężenie, które jest w stanie wytrzymać obciążana próbka (w maszynie wytrzymałościowej do ściskania [20]) badanego materiału, aż do momentu jej zniszczenia [6, 19].

Beton jest materiałem powszechnie stosowanym w budownictwie. W związku z tym bardzo istotnym zagadnieniem w dziedzinie konstrukcji mostowych jest zastosowanie

odpowiednio miarodajnych sposobów oceny jego cech wytrzymałościowych. Nabiera to szczególnego znaczenia w momencie, gdy trzeba określić wytrzymałość betonu w istniejącej konstrukcji. Najbardziej rzetelną analizą przedstawiającą jakość betonu są tzw. metody badań niszczących, czyli diagnostyka próbek przygotowanych podczas realizacji obiektu bądź też odwiertów rdzeniowych [3]. W tym ostatnim przypadku pobieranie próbek może być utrudnione, a czasem niemożliwe (np. wycinanie brył z belek). Ponadto reprezentatywność pobranych próbek jest często wątpliwa, gdyż w trakcie wykonywania odwiertów beton może ulec rozluźnieniu.

Według [8] miarodajną ocenę stanu granicznego nośności obiektów mostowych lub poszczególnych elementów przed-

stawiają wyniki obciążeń próbnych. Prezentują one rzeczywiste przemieszczenia, odkształcenia i w konsekwencji powstałe naprężenia. Niewątpliwą wadą tej metody jest konieczność ograniczenia, a czasem również całkowitego wyłączenia obiektu z eksploatacji.

W sytuacji, gdy nie ma możliwości przeprowadzenia pełnych badań niszczących, alternatywą są pomiary metodami nieniszczącymi. Na podstawie badań nieniszczących można uzyskać informacje o cechach wytrzymałościowych, jednorodności i wilgotności betonu wbudowanego w badany obiekt, bez naruszania jego struktury lub dalszej przydatności użytkowej. Oprócz tego badania te znalazły szerokie zastosowanie do:

- kontroli jakości i wykrywania wad wyrobów z betonu w trakcie ich produkcji,
- badań doświadczalnych, takich jak np. ocena zmian właściwości betonu w funkcji czasu bądź też pod wpływem określonych czynników zewnętrznych.

Wyżej wymienione zastosowania są dokładnie opisane w Pracach Naukowych Instytutu Techniki Budowlanej [2].

Najczęściej stosowane nieniszczące metody badań wytrzymałości betonu na ściskanie można najogólniej podzielić na dwie grupy:

- metody sklerometryczne (pomiar odcisku, pomiar odskoku),
- metody akustyczne (ultradźwiękowe, rezonansowe).

Należy w tym miejscu wspomnieć, że do badań nieniszczących zalicza się również:

- ocenę wizualną stanu konstrukcji,
- inwentaryzację obszarów skorodowanych oraz miejsc gdzie znajdują się rysy i pęknięcia,
- metody radiologiczne,
- metody elektryczne i magnetyczne [2,8].

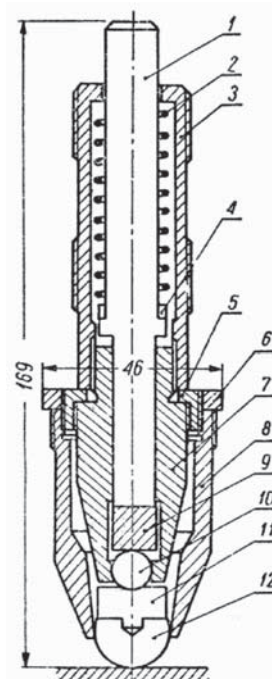
Metody nieniszczące oparte są na stwierdzonej korelacji między parametrem określonym daną metodą (twardość, prędkość fali akustycznej itp.) a interesującą nas cechą betonu (np. wytrzymałość) określoną metodami niszczącymi. W przypadku istniejących konstrukcji, krzywe korelacyjne przyjmuje się przez analogię do podobnych betonów, do których współzależność jest już znana.

W artykule podjęto się zadania przybliżenia jednej z najstarszych prób nieniszczących i przy tym nadal szeroko stosowanej – metody sklerometrycznej.

## Ogólna charakterystyka metody sklerometrycznej

Istotą metody sklerometrycznej jest pośrednie określenie właściwości materiału na podstawie pomiaru twardości powierzchniowej. Jeżeli twardość zdefiniujemy (wg F. Osmonda, 1895) jako odporność materiału na odkształcenia wywołane siłami skupionymi, to wyróżniamy wówczas dwie metody jej pomiaru, które są zależne od sposobu wywołania nacisku oraz przyjętej miary odporności. Dodatkowo zakładając, że siły przykładane są w sposób dynamiczny, za pomocą różnych kształtów ciała wywołującego bezpośredni nacisk na powierzchnię badanego materiału. Możemy wówczas metody sklerometryczne, w zależności od działania wgłębnika, podzielić na metody odskoku i odcisku [2].

- 1 – trzpień główny,
- 2 – sprężyna,
- 3 – obudowa przyrządu,
- 4 – podkładka,
- 5 i 6 – pierścienie mocujące dodatkową nasadkę,
- 7 – obudowa kulki  $\varnothing 10$  mm,
- 8 – dodatkowa nasadka,
- 9 – sztabka wzorcowa,
- 10 – kulka  $\varnothing 10$  mm,
- 11 – płytka centrująca,
- 12 – wgłębnik dodatkowy  $\varnothing 20$  mm



Rys. 1. Ulepszony młotek Poldiego [11]

## Wyznaczenie twardości przez pomiar odcisku

W metodach odcisku najczęstsze zastosowanie znalazł ulepszony przez K. Waitzmanna młotek Poldiego. Zasada pomiaru polega na ocenie wytrzymałości betonu według średnicy odcisku kulki stalowej, uzyskanego pod wpływem uderzenia wywołanego młotkiem (rys. 1, [11]). Adaptacja młotka Poldiego polega na umieszczeniu dodatkowego wgłębnika o średnicy 20 mm. Nieodłącznym wyposażeniem tego urządzenia jest stalowa płytka wzorcowa o znanej twardości.

Samo badanie polega na uderzeniu zwykłym młotkiem w trzpień przyrządu z siłą potrzebną do wykonania dwóch zagłębień: jednego od kulki o średnicy 10 mm w sztabce wzorcowej oraz drugiego na betonie od wgłębnika dodatkowego. Siłę uderzenia wyznacza się każdorazowo na podstawie uzyskanego odcisku na stalowej sztabce wzorcowej. Następne pomiary wykonuje się w analogiczny sposób po przesunięciu sztabki o 5 mm.

## Wyznaczenie twardości przez pomiar odskoku

Twardość betonu można również określić na podstawie pomiaru sprężystego odskoku od powierzchni betonu masy uderzającej z określoną energią. Do tego celu służą udarowe młotki sprężynowe. Najbardziej rozpowszechnionym twardościomierzem dynamicznym jest młotek Schmidta, w którym uderzenie jest wywoływane układem sprężynowym.

Literatura z zakresu metod nieniszczących [2, 11, 12, 18] przedstawia cztery podstawowe typy sklerometrów Schmidta:

N – normalny, o energii uderzenia 2,21 Nm, który znajduje zastosowanie w badaniu betonu zwykłego w elementach prefabrykowanych i konstrukcjach z betonu;

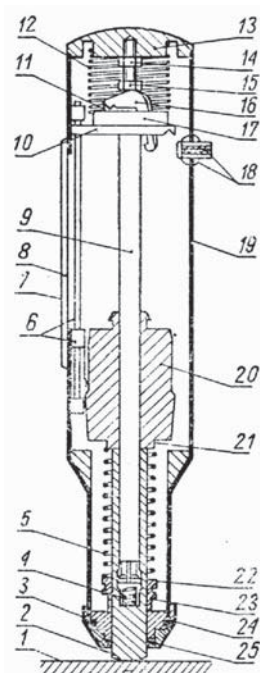
L – lekki, o energii uderzenia 0,74 Nm, stosowany do badania betonu lekkiego, zapraw i elementów cienkościennych;

M – ciężki, masywny, o energii uderzenia 29,5 Nm, stosowany do badania konstrukcji masywnych;

P – wahadłowy, energia uderzenia wynosi 0,88 Nm, przeznaczony do badania betonów o bardzo małej wytrzymałości na ściskanie.

Zgodnie z [1] w badaniach mostów znalazły zastosowanie dwa rodzaje z przedstawionej grupy przyrządów – młotek typu M i N. Pierwszy służy do badania betonowych konstrukcji masywnych, m.in. korpusów, skrzydeł przyczółków, fundamentów itp. Natomiast drugi jest stosowany do badania prefabrykatów oraz konstrukcji monolitycznych betonowych, żelbetowych i sprężonych. Na rysunku 2 [11] pokazano przekrój podłużny młotka typu N z wyszczególnieniem części składowych.

- 1 – powierzchnia badanego betonu,
- 2 – trzpień uderzeniowy,
- 3 – przykrywka przednia,
- 4 – sprężyna amortyzująca,
- 5 – sprężyna uderzeniowa,
- 6 – wskaźnik liczby odbicia,
- 7 – szkiełko ochronne wskaźnika,
- 8 – skala,
- 9 – prowadnica,
- 10 – talerz wodzący,
- 11 – sprężyna spustu,
- 12 – sprężyna dociskowa,
- 13 – przykrywka tylna,
- 14 – przeciwnakrętka śruby regulacyjnej,
- 15 – śruba regulacyjna,
- 16 – spust,
- 17 – sworzeń spustu,
- 18 – przycisk,
- 19 – obudowa młotka,
- 20 – masa uderzeniowa,
- 21 i 22 – zaczepy sprężyny uderzeniowej,
- 23 – tuleja,
- 24 – pierścień,
- 25 – uszczelka z filcu



Rys. 2. Najczęściej stosowany młotek Schmidta – typu N [11]

W trakcie pomiarów należy ustawić młotek Schmidta prostopadle do powierzchni betonu i powoli naciskać, co powoduje cofanie się masy uderzeniowej i tym samym naciągnięcie sprężyny uderzeniowej. W momencie, gdy masa cofnie się aż do urządzenia spustowego, następuje jej automatyczne zwolnienie i uderzenie w trzpień. Po uderzeniu w trzpień masa uderzeniowa odskakuje o pewien odcinek, który jest rejestrowany za pomocą wskaźnika na skali. Skala ma długość 75 mm i jest podzielona na 100 części. Odczyt na skali nazywa się liczbą odbicia (oznacza się ją literą  $L$ ).

Po odjęciu młotka od powierzchni betonu wskaźnik wraca do zera i młotek jest przygotowany do kolejnego pomiaru. W przypadku, gdy odczytanie wartości  $L$  jest utrudnione (np. niewygodna pozycja badającego), można zatrzymać wskaźnik na danym odczycie przyciskiem. Do następnego pomiaru młotek będzie przygotowany po zwolnieniu przycisku przez lekkie naciśnięcie trzpienia.

W badaniach młotkiem Schmidta typu N, twardość dynamiczną można wyrazić funkcją liczby odbicia ( $L$ ). Dzięki temu

w praktyce, przy stałych parametrach przyrządu, możemy znaleźć zależność empiryczną między wytrzymałością betonu ( $f$ ) a liczbą odbicia ( $L$ ) w postaci:

$$f = f(L) \quad (2)$$

Najnowocześniejsze urządzenia pomiarowe jak np. młotek typu Silver Schmidt, pozwalają na zapis cyfrowy. Zastosowano w nim technologię pomiaru optycznego prędkości bijaka przed i po odbiciu. Pozwala to uniknąć błędów związanych z tarciem mechanizmów wewnątrz przyrządu oraz nieodpowiednim ustawieniem młotka. Wartości wytrzymałości na ściskanie mogą być odczytywane bezpośrednio z urządzenia, gdyż po wprowadzeniu skorygowanej krzywej korelacji, cyfrowy rejestrator zapisuje i prowadzi od razu analizę wyników.

## Wpływ wybranych czynników na wyniki badań sklerometrycznych

Liczne badania, np. wg [16] wykazały wpływ wielu czynników na związki korelacyjne między wytrzymałością betonu a mierzoną liczbą odbić. Według [3] do najważniejszych z nich można zaliczyć:

**wilgotność betonu.** Wspomniane wyżej badania wykazały, że obecność wody w porach betonu ma zasadniczy wpływ na pogorszenie się jego dynamicznych właściwości a tym samym na zmniejszenie liczby odbicia. Analizując beton mokry lub znacznie zawilgocony o niskiej wytrzymałości, otrzymuje się wyniki zaniżone. Z kolei przy betonach o wysokich wytrzymałościach wyniki są nieco zawyżone. Wynika stąd, że w betonach o wytrzymałości poniżej 30 MPa i powyżej 40 MPa, ocena obarczona jest znacznym błędem. W celu przeprowadzenia prawidłowej oceny wytrzymałości mokrego betonu, za pomocą młotka Schmidta należy zastosować poprawki korygujące w postaci współczynników korekcyjnych do zależności ustalonych do betonu w stanie powietrzno-suchym [15].

W pracy [3] autorzy podali szacunkowe korelacje wytrzymałości w zależności od wilgotności:

- beton mokry

$$f_c^m = f_1(L) \quad (3)$$

- beton powietrzno-suchy

$$f_c^{ps} = f_2(L) \quad (4)$$

- beton wysuszony

$$f_c^s = f_3(L) \quad (5)$$

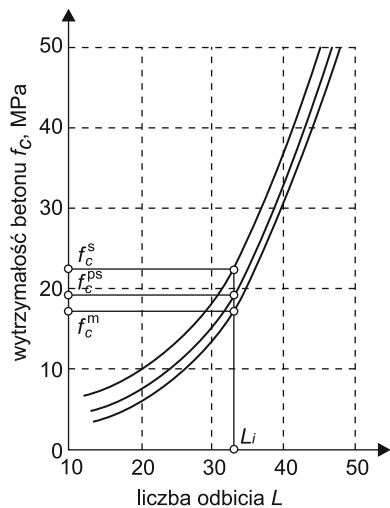
Między zależnościami empirycznymi (3), (4) i (5) zachodzą relacje przedstawione na rysunku 3 [16].

Ostateczną korelację można więc określić jako:

$$f_c^{ps} = 1,2 f_c^m = 0,96 f_c^s \quad (6)$$

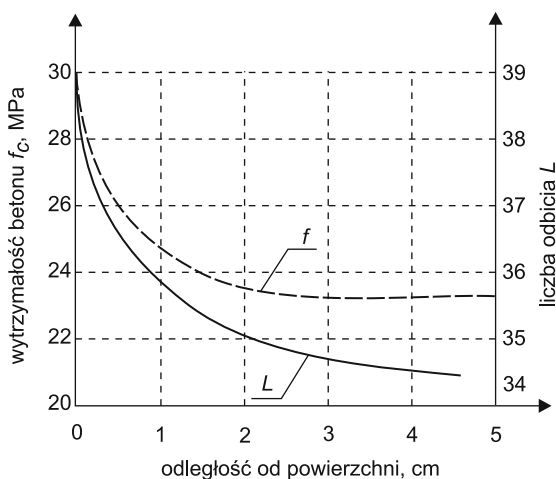
**wiek betonu.** Warstwa przypowierzchniowa betonu jest przedmiotem oceny twardości, a zatem i wytrzymałości betonu. Wraz z upływem czasu zachodzi w niej zjawisko karbonatyzacji, które przedstawia wzór [7]:





Rys. 3. Zależności empiryczne w badaniach betonu zwykłego o różnej wilgotności, wg [16]

Węglan wapnia, produkt reakcji, wzmacnia badaną warstwę betonu. Powoduje to nierównomierny rozkład wytrzymałości betonu, na pewnej głębokości od powierzchni elementu. W analizie badań sklerometrycznych następuje również zmiana zależności pomiędzy liczbą odbicia, a wytrzymałością elementu. Badania [16, 17] wykazały, że wraz ze zwiększaniem odległości od powierzchni elementu, w większym stopniu zmniejsza się liczba odbicia niż wytrzymałość na ściskanie (rys. 4). Wiek betonu, przy ocenie jego właściwości, należy określić przez skalowanie za pomocą odpowiednich współczynników. Wytrzymałość w danym wieku zależy od rodzaju cementu, temperatury i warunków pielęgnacji.



Rys. 4. Zależności empiryczne w badaniach betonu zwykłego o różnej wilgotności wg [16, 17]

**naprężenia w betonie.** W wyniku przeprowadzonych badań, zawartych w pracy [14] stwierdzono, że na wyniki pomiarów wytrzymałości wpływ ma wielkość i rozkład naprężeń ściskających. Złożona postać rozkładu naprężeń w betonie ma wpływ na statystyczne rozłożenie wskaźników liczb odbi-

cia, takich jak średnia wartość, odchylenie standardowe, a także współczynnik zmienności. Ta zależność ma zasadnicze znaczenie przy analizie betonu w istniejących i użytkowanych konstrukcjach żelbetowych i sprężonych.

**wpływ procesów nagrzewania w betonie.** Zastosowanie obróbki termicznej jest procesem przyspieszającym twardnienie, co w konsekwencji umożliwia zwiększenie liczby produkowanych elementów betonowych. Badania, o których mowa była wcześniej [15] wykazały, że produkty hydratacji cementu, które powstały w temperaturze powyżej 50°C, znacznie różnią się od produktów powstałych w normalnych warunkach twardnienia. Przy temperaturze obróbki 50°C i 80°C krzywe korelacji wytrzymałości i liczby odbicia są zbliżone, natomiast w temperaturze 95°C mają inny przebieg. Obróbka termiczna wywiera znaczący wpływ na właściwości sprężyste i wytrzymałościowe materiału, a krzywe korelacji opracowane do betonów poddanych obróbce termicznej znacznie odbiegają od krzywych uzyskanych do betonów wykonywanych w normalnych warunkach. Posługując się młotkiem Schmidta (typu N lub P) jesteśmy w stanie dokonać zadowalającej oceny wytrzymałości betonu wyłącznie w przypadku betonów obrabianych w temperaturze do 80°C.

**wpływ dodatków chemicznych.** Rozwój technologii betonu pozwolił na stosowanie różnego rodzaju dodatków chemicznych, mających istotny wpływ na zwiększenie efektywności tworzenia kamienia betonowego. Obecnie stosuje się między innymi: dodatki obniżające temperaturę wiązania betonu (chlorek wapnia), dodatki uplastyczniające (np. Klutan), dodatki przyspieszające twardnienie oraz dodatki specjalne. Na zależność empiryczną  $f_c - L$  wg przeprowadzonych przez autora pracy badań [16] istotny wpływ miała zawartość środka uplastyczniającego, po zastosowaniu którego zaobserwowano zmniejszenie się liczby odbicia. Podobną zależność uzyskano przy zastosowaniu chlorku wapnia.

**położenie przyrządu.** Zależnie od położenia młotka i badanej powierzchni, uzyskujemy inne liczby odbicia. Instrukcja ITB nr 210/1977 [25] informuje, że wykonany pomiar nie wymaga korekty w przypadku, gdy badana powierzchnia jest pionowa i podłużna oś młotka jest usytuowana pod kątem 0° do poziomu. W przypadku innego ułożenia, należy skorygować liczbę odbicia uwzględniając zmianę jego położenia:

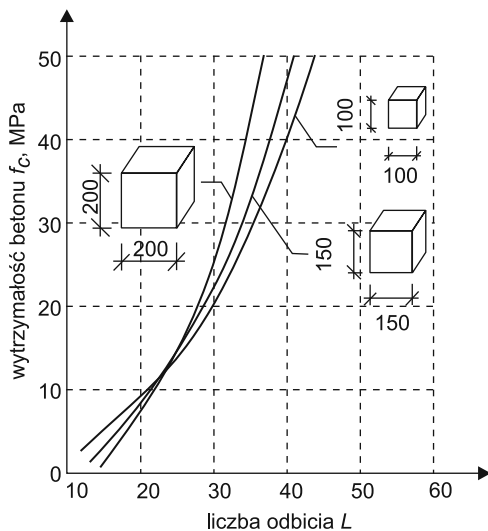
$$L = L_\alpha + \Delta L \quad (8)$$

przy czym:

$L_\alpha$  – odczyt przy nachyleniu młotka pod kątem  $\alpha$  do poziomu,  
 $\Delta L$  – poprawka.

Z reguły poprawki są podawane przez producentów przyrządów i zależą od jego położenia, a także masy i energii uderzenia elementu pomiarowego. W stosunku do poziomego położenia sklerometru, przy zmianie kąta  $0 < \alpha < -90^\circ$  (pionowe położenie – przyrząd skierowany w dół) wartości liczby odbicia maleją, tak więc wartość poprawki  $\Delta L < 0$ . Natomiast przy zmianie kąta  $0 < \alpha < 90^\circ$  (pionowe położenie – przyrząd skierowany w górę) uzyskane liczby odbicia mają wartości większe,  $\Delta L > 0$ .

**wpływ wielkości i geometrii ciał próbnych.** Wpływ na wartość liczby odbicia ma również geometria i kształt ciał stosowanych do skalowania [4]. Efekt skali występujący



Rys. 5. Zależności empiryczne dla młotka Schmidta typu N i różnych wymiarów elementów próbnych wg [4]

w badaniach sklerometrycznych jest zależny od wytrzymałości betonu. Stąd też empiryczna zależność  $f_c - L$  może mieć różny przebieg w przypadku różnych wymiarów próbek – rys. 5 [4].

Przedstawione czynniki należy uwzględniać podczas oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji za pomocą sklerometrów Schmidta przez:

- ocenę betonu na podstawie zależności empirycznych wyznaczonych w stosunku do określonych wielkości i jakości czynników charakteryzujących beton,
- stosowanie poprawek  $\Delta L$  lub współczynników korekcyjnych do liczb odbicia ewentualnie do wytrzymałości betonu.

## Warunki przeprowadzania pomiarów

Do określenia metodą sklerometryczną miarodajnej wytrzymałości betonu na ściskanie w danym elemencie lub fragmencie konstrukcji (wykonanym z jednej partii betonu) wymagana jest odpowiednia liczba miejsc pomiarowych.

Miejsca pomiarowe powinny być wyznaczone w odpowiedniej liczbie, w zależności od wymaganej dokładności pomiaru przy możliwie równomiernym ich rozłożeniu na całej powierzchni danego fragmentu lub elementu odcinka konstrukcji w całym przekroju. Norma PN-74/B-06262 [24] określa minimalną liczbę miejsc do badań jako równą  $n = 12$ . W przypadku, gdy współczynnik zmienności analizowanego obszaru jest niewielki, dopuszcza się zmniejszenie ich liczby do  $n = 6$ . Do takich miejsc należą punkty maksymalnych naprężeń ściskających, a zatem największego wyężenia betonu w słupach, ścianach oporowych, płytach oraz obszary przypodporowe w belkach obciążonych siłami skupionymi. Dopuszczalne jest również zmniejszenie liczby badanych miejsc przy seryjnej kontroli elementów prefabrykowanych wykonywanych w warunkach przemysłowych, gdyż w takim przypadku beton jest bardzo jednorodny. Jak wiadomo ta cecha ma decydujący wpływ na rzeczywistą liczbę odbicia.

W każdym miejscu badanym na elemencie powinno być wykonanych co najmniej 5 odczytów liczby odbicia. Odczyty różniące się od wartości średniej, w danym miejscu pomiarowym, o więcej niż 5 jednostek na skali młotka należy odrzucić. Odchylenia tego rodzaju mogą powstać na skutek natrafienia trzpieniem na bardzo twarde kruszywo betonu lub w pory przypowierzchniowe. Pomiarów nie mogą być wykonywane w tych samych punktach, a odległość między miejscami badań powinna być większa bądź równa 2 cm. W aktualnej normie PN-EN 12504-2 [21] nie występują ściśle określone wymagania dotyczące liczby miejsc pomiaru. Ograniczono się jedynie do podania liczby pomiarów w jednym badanym miejscu –  $n = 9$ . Nie zawarto również żadnych zaleceń odnoszących się do pojedynczej liczby odbicia, jeżeli jednak 20% wszystkich wyników różni się od średniej wartości o więcej niż 6 jednostek na skali młotka to cały zestaw odczytów należy odrzucić.

Analizy przedstawione w pracy [15] dowiodły, że w trakcie badań młotkiem Schmidta część energii bijaka zostaje zużyta na drgania elementu. Dlatego też, aby zapobiec sfalszowaniu pomiarów, sztywność elementu konstrukcji w wybranym miejscu powinna być dostatecznie duża. Takie wielkości jak amplituda i częstotliwość drgań wytworzone przez przyrząd pomiarowy wpływają na otrzymywane wyniki. Jeżeli sztywność elementu jest niewystarczająca, to w wyniku drgań masy przyrządu następuje zmniejszenie wartości liczb odbicia. W elementach charakteryzujących się takimi właściwościami, występuje pozorne zmniejszenie wytrzymałości betonu przy interpretacji wyników, w obrębie badanych obszarów. Dla porównania, przy stosowaniu ulepszonego młotka Poldiego (rys. 1 [11]) następuje z kolei zawyżona wytrzymałość betonu. Jest to spowodowane podatnością elementu, w wyniku której średnica i głębokość powstałego odcisku są mniejsze niż w rzeczywistości [3].

Na podstawie badań sklerometrem Schmidta uzyskuje się informację o twardości warstwy przypowierzchniowej betonu o grubości ok. 3 cm. Struktura jednorodności betonu w elementach masywnych może być zróżnicowana, chociażby wskutek nierównomiernego zagęszczania betonu. W związku z tym wątpliwe jest założenie, że twardość warstwy przypowierzchniowej jest adekwatna do całego przekroju. Stąd też przy kontroli jakości betonu młotkami Schmidta norma [3] ogranicza grubość badanego elementu do 20 cm przy dostępie jednostronnym, 40 cm przy dostępie dwustronnym i 60 cm przy dostępie przynajmniej z trzech stron. Obszar pomiarowy określono, jako powierzchnię betonu wynoszącą ok. 50 cm<sup>2</sup>, na której wykonuje się pomiary liczby odbicia w  $n_i$  punktach pomiarowych, przy czym odległości pomiędzy nimi nie powinny być mniejsze od 2 cm.

Aktualna norma [21] zawiera znacznie mniej wymogów, niż wcześniejsze przepisy. Określa jedynie minimalną grubość elementu przeznaczanego do badania, jako równą co najmniej 10 cm. Miejscem pomiarowym jest natomiast obszar 30 cm × 30 cm, w którym odległość sąsiednich punktów pomiarowych nie powinna być mniejsza od 25 mm i żaden z nich nie powinien się znajdować bliżej krawędzi elementu niż 25 mm.

Odpowiednie przygotowanie miejsc do badań ma decydujący wpływ na rzetelny odczyt wyników. Wspomniana już

wcześniej norma [21] zaleca przygotowanie obszaru do pomiarów przez szlifowanie kamieniem ściernym powierzchni chropowatych lub miękkich oraz powierzchni z ubytkami za pomocą, do momentu, aż staną się one gładkie. Kamień ścierny określono jako kamień karborundowy o średnio uziarnionej strukturze bądź podobny materiał. Powierzchnie zagładzane lub gładko formowane mogą być poddane badaniu bez uprzedniego szlifowania. Konieczne jest również usunięcie wody oraz okruchów z powierzchni betonu, gdyż mogą one znacznie zmniejszyć odczyt liczby odbicia. Z kolei PN-74/B-06262 [24] nakazuje wyrównanie ręczne lub mechaniczne powierzchni. W pracy [11] ustalono grubość szlifowanej powierzchni, w zależności od chropowatości na  $1 \div 3$  mm. W sytuacjach, gdy beton jest silnie skorodowany lub stary, grubość ta może wynosić  $3 \div 5$  mm.

Zakres wykonywania pomiarów jednoznacznie określono w [3, 21, 24]. Podczas ich wykonywania, należy unikać badania:

- miejsc, w których beton jest widocznie uszkodzony (rąkawy, spękany, skarbonatyzowany);
- elementów poziomo usytuowanych podczas betonowania (w warstwie przypowierzchniowej następuje nagromadzenie mlecza cementowego lub kruszywa grubego, co pozornie zawyża wytrzymałość);
- w miejscach linii przebiegania przerw technologicznych w betonowaniu;
- elementów elastycznych, mało sztywnych;
- w miejscach, w których na głębokości 3 cm przebiega zbrojenie konstrukcyjne;
- w miejscach z przepuszczalnymi wkładkami stalowymi, ceramicznymi, drewnianymi lub z pustakami znajdującymi się na głębokości do 3 cm od badanej powierzchni;
- w warstwach betonu przemarzniętego (w okresie dojrzewania; woda nie związana w betonie zostaje zamieniona w lód, co pozornie zwiększa wytrzymałość betonu, a po rozmarznięciu ją zanizają);
- gdy występuje zawilgocenie powierzchni betonu;
- w miejscach, w których powierzchnia betonu jest silnie skorodowana.

W przypadku, gdy w trakcie badania nastąpiło skruszenie lub inne uszkodzenie betonu, wynik należy odrzucić.

## Statystyczne opracowanie wyników badań

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymuje się liczbę  $n$  odbić od badanego elementu. W pierwszej kolejności należy wyznaczyć wartość średniego odczytu liczb odbicia  $i$ -tego obszaru pomiarowego. W tym celu korzystamy z zależności:

$$L_{mi} = \frac{\sum_{j=1}^n L_{ij}}{n_i} \quad (8)$$

w której:

$L_{mi}$  – średnia wartość liczby odbicia w  $i$ -tym punkcie konstrukcji,

$n_i$  – liczba pomiarów w  $i$ -tym punkcie pomiarowym.

Na podstawie rozważań przedstawionych w [18] uznano, iż zazwyczaj zbiory liczb odbicia w betonie konstrukcji zbliżo-

ne są do rozkładu Pearsona III typu (rozkład niesymetryczny), logarymiczno-normalnego, Weibulla lub Gaussa-Laplace'a (normalnego). Stąd też do celów praktycznych w budownictwie mostowym przyjmuje się, że rozkłady wyników badań sklerometrycznych są rozkładami normalnymi, symetrycznymi charakteryzującymi się:

- wartością średnią liczby odbicia

$$L_m = \frac{\sum_{j=1}^n L_{mj}}{n_j} \quad (9)$$

przy czym:

$L_m$  – wartość średnia odczytu liczby odbicia w konstrukcji,

$n_j$  – liczba  $j$ -tych punktów pomiarowych.

Kolejne wartości charakteryzujące wyniki badań w rozkładzie normalnym to:

- odchylenie standardowe liczby odbicia

$$S_{Li} = \sqrt{\frac{1}{n_{ij}-1} \sum_{i,j=1}^n (L_{ij} - L_m)^2} \quad (10)$$

- zależny od niego współczynnik zmienności liczby odbicia

$$v_i = \frac{S_{Li}}{L_{mi}} \cdot 100\% \quad (11)$$

## Metoda skalowania i określania wytrzymałości według PN-EN 13791

Jak wspomniano, ocenę jednorodności i wytrzymałości betonu metodą sklerometryczną przeprowadza się wykorzystując odpowiednie zależności empiryczne między liczbą odbicia a wytrzymałością betonu  $f_c - L$ . Zależności te są różne do różnych betonów a ponadto ich przebieg uzależniony jest od wielu parametrów, które wpływają na skład i technologię betonu. Pomimo tego, że literatura przedmiotu podaje wiele krzywych korelacji o ogólnym charakterze zbliżonym do siebie, to jednak rozbieżności między nimi są na tyle duże, że nie pozwalają na ustalenie jednej, ogólnej krzywej regresji do wszystkich betonów.

Próby normalizacji procedury skalowania podjęto w [22]. Przewiduje ona określenie wytrzymałości dwoma sposobami, które wymagają wyników otrzymanych z badań odwiertów rdzeniowych i pomiarów uzyskanych metodą pośrednią.

Wariant pierwszy jest to bezpośrednia korelacja z wynikami badań odwiertów rdzeniowych. Odpowiada ona metodom dokładnym proponowanym w Instrukcji ITB 210/1977 [25] i normie PN-74/B-06262 [24]. Zgodnie z jej zaleceniami, w celu ustalenia korelacji między wytrzymałością betonu na ściskanie w konstrukcji oraz wynikiem badań sklerometrycznych należy przeprowadzić pełny program badania. Zależności te wyznacza się do co najmniej 18 rdzeni pobranych z konstrukcji i 18 wyników pomiarów wykonanych w tym samym punkcie. Uzyskuje się w ten sposób 18 par wyników. Samo wyznaczenie zależności korelacyjnej polega na sporządzeniu wykresu  $f_c - L$ , a następnie dopasowaniu prostej lub krzywej za pomocą analizy metodą regresji par wyników, uzyskanych w ramach programu badań. W konsekwencji uzyskuje się zależność  $f_L = f(L)$ . W celu zapewnienia repre-

zentywności wyników, zaleca się aby pary wyników były równomiernie rozłożone. Zależność korelacyjna powinna być wyznaczana przy założeniu możliwości 10% zniżenia wytrzymałości, przy której należy wyliczyć standardowy błąd oszacowania, granice ufności oraz granice tolerancji dla pojedynczego wyniku.

Określona zależność korelacyjna może być stosowana tylko do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji w warunkach, w których ją wyznaczono. Powinna być wykorzystywana jedynie w zakresie uzyskanych wyników badania. Niedopuszczalna jest ekstrapolacja wyników.

Oceniając charakterystyczną wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, należy ściśle przestrzegać następujących zaleceń:

- w każdym miejscu pomiarowym ocena powinna wynikać z badań, przeprowadzonych w co najmniej 15 punktach pomiarowych,
- odchylenie standardowe powinno być wartością obliczoną do wyników pomiarów lub równe 3,0 MPa, w zależności od tego, które z nich przyjmuje większą wartość.

Charakterystyczną wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji w danym miejscu pomiarowym określa się jako mniejszą z wartości:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48s \quad (12)$$

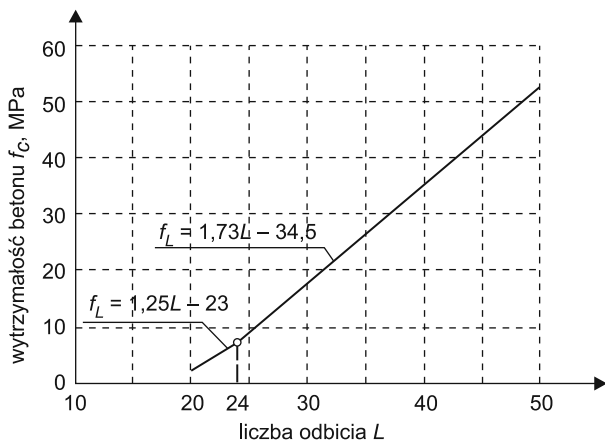
lub

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 \quad (13)$$

przy czym:

- $f_{ck, is}$  – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji,
- $f_{m(n), is}$  – średnia arytmetyczna wytrzymałości na ściskanie obliczona z zależności korelacyjnej  $f_c - L$ ,
- $f_{is, lowest}$  – najmniejsza z oznaczonych wartości wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji obliczona z zależności korelacyjnej  $f_c - L$ ,
- $s$  – odchylenie standardowe.

Wariant drugi to wzorcowanie na podstawie odwiertów rdzeniowych do ograniczonego zakresu wytrzymałości, z wykorzystaniem wyznaczonej zależności korelacyjnej. Metoda ta jest odpowiednikiem metody uproszczonej proponowanej w Instrukcji ITB 210/1977 [25] i normie PN-74/B-06262 [24]. Procedurę tę stosuje się do ograniczonego zakresu wytrzymałości z wykorzystaniem wyznaczonej hipotetycznej zależności



Rys. 6. Krzywa bazowa według [22]

korelacyjnej, krzywej regresji łącznie z jej przesunięciem, wyznaczonym za pomocą badania odwiertów rdzeniowych.

W [22] podano do przybliżonego skalowania bazową krzywą, określoną jako dolną obwiednię zależności między liczbą odbicia a wytrzymałością betonu  $f_{c, cyl}$ , którą sprowadzono do wartości  $f_{c, cube}$ , określonych na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Ocenę wytrzymałości betonu wykonuje się przez przesunięcie krzywej bazowej do właściwego poziomu, określonego za pomocą odwiertów rdzeniowych i badań nieniszczących.

Technika ta może być wykorzystywana do oceny populacji typowych betonów, wykonanych z tych samych materiałów i w ten sam sposób z miejscem pomiarów wybranym z tego rodzaju populacji. Do wyznaczenia wartości przesunięcia  $\Delta f$  w celu określenia zależności korelacyjnej między pomiarami pośrednimi i wytrzymałością betonu na ściskanie w konstrukcji, wykorzystuje się co najmniej 9 par wyników pomiarów.

Otrzymane wyniki badań pośrednich i niszczących należy nanieść na wykres, na którym powinna również się znaleźć krzywa bazowa (rys. 6 [22]) wyznaczona z zależności:

$$f_L = 1,25L - 23 \text{ przy } 20 \leq L \leq 24 \quad (14a)$$

$$f_L = 1,73L - 34,5 \text{ przy } 24 \leq L \leq 50 \quad (14b)$$

W każdym punkcie pomiarowym należy określić różnicę między wytrzymałością betonu na ściskanie, uzyskaną z badań próbek a wytrzymałością wyznaczoną z krzywej bazowej na podstawie wzorów (14a i b). Następnie wyznacza się średnią wartość różnic  $\Delta f$  z  $n$  pomiarów. Zasadę korygowania krzywej bazowej zilustrowano na rysunku 7 [3]:

$$\delta f = f_{is} - f_L \quad (15)$$

przy czym:

- $f_{is}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie określona na próbkach,
- $f_L$  – wytrzymałość na ściskanie obliczona z krzywej bazowej  $f_c - L$ .

Wartość przesunięcia podstawowej krzywej regresji  $\Delta f$  jest uzależniona od średniej wartości różnic  $\delta f_{m(n)}$  oraz współczynnika  $k_1$  zależnego od liczby pomiarów. Można ją wyznaczyć ze wzoru:

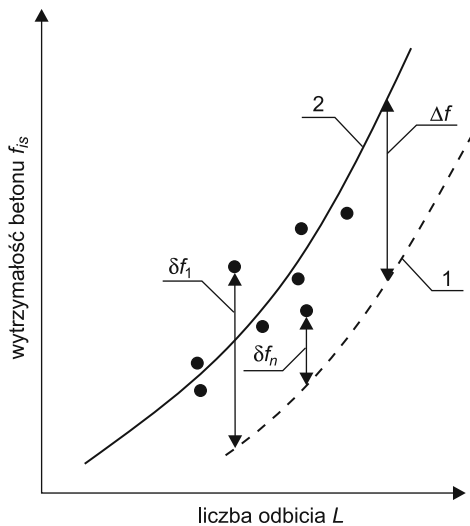
$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 s \quad (16)$$

w którym:

- $\delta f_{m(n)}$  – średnia wartość różnic wytrzymałości na ściskanie wyznaczonych na próbkach i wyznaczonych z krzywej bazowej,
- $s$  – odchylenie standardowe różnic wytrzymałości na ściskanie wyznaczone na podstawie próbek,
- $k_1$  – współczynnik przyjmowany wg tab. 3 [22].

Uzyskana po kalibracji zależność  $f_{is, L} = f_L + \Delta f$  może być ekstrapolowana w zakresie  $\pm 2$  jednostek liczb odbicia poza zakres liczb odbicia stanowiących podstawę skalowania.

Po skorygowaniu krzywej bazowej jesteśmy w stanie określić wytrzymałość charakterystyczną betonu na ściskanie zależnie od liczby pomiarów (przypadek A lub przypadek B) i przyporządkować beton do danej klasy wytrzymałości. Można stosować inne zależności korelacyjne, mające uzasadnienie badawcze, co jest zgodne z [22].



Rys. 7. Korygowanie krzywej bazowej [3]: 1 – krzywa bazowa, 2 – zależność korelacyjna między pośrednią metodą badania i wytrzymałością betonu na ściskanie w konstrukcji, określoną dla danego betonu, który jest przedmiotem badań,  $\delta f_{1...n}$  – różnica między jednostkową wytrzymałością odwiertowego i wartością wytrzymałości wynikającą z krzywej bazowej

Stosując techniki do nieniszczącego badania wytrzymałości betonu na ściskanie trzeba mieć w szczególności na uwadze, że najwięcej błędów popełnianych jest podczas interpretacji uzyskanych wyników badań. Jest to z reguły związane ze zbyt pochopnym przyjmowaniem jednej, podawanej najczęściej przez producenta urządzenia zależności wytrzymałości na ściskanie od uzyskiwanych w badaniach nieniszczących wartości oznaczeń. Nie wolno zapominać, że najpewniejszą interpretację uzyskanych wyników badań można przeprowadzić wówczas, gdy w przypadku określonego rodzaju betonu (wykonanego z danych surowców, dojrzewającego w danych warunkach i przez określony czas) będzie wyznaczona na drodze statystycznej analizy korelacyjnej wyników badania próbek betonowych empiryczna zależność wytrzymałości na ściskanie badanego materiału od wartości uzyskiwanych daną metodą pomiarową.

## Podsumowanie

Ocena wytrzymałości betonu na podstawie badań sklerometrycznych [21] charakteryzuje się niewątpliwymi zaletami. Jest to nie tylko możliwość łatwego określania wytrzymałości betonu w konstrukcji, ale również krótki czas oczekiwania na wyniki oraz ewentualność wielokrotnego powtórzenia badania podczas wznoszenia obiektu i jego eksploatacji (można dzięki nim obserwować zwiększenie wytrzymałości w czasie w tych samych elementach). Dodatkową zaletą, jest brak destruktywnego oddziaływania na badany obiekt.

W normie PN-EN 206-1 [26] zastępującej PN-B-88/06250 [27] jednoznacznie stwierdzono, że wytrzymałość betonu można wyznaczyć na próbkach wyciętych z konstrukcji, a dodatkowo można przeprowadzić badania nieniszczące konstrukcji. Stwierdzenie to wyklucza ocenę wytrzymałości

betonu tylko na podstawie badań nieniszczących, które należy traktować jako towarzyszące.

Należy jednak pamiętać, że na podstawie pomiarów sklerometrycznych uzyskuje się informacje o jakości wyłącznie powierzchniowej warstwy betonu (o grubości 3÷10 cm). Wobec tego ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach z betonu zwartego o wymiarach przekraczających 30 cm (w kierunku uderzenia przyrządu) nie jest miarodajna.

## Bibliografia

- [1] J. Biliszczuk i inni (1995): *Podręcznik inspektora mostowego*. WPW, Wrocław
- [2] L. Brunarski, L. Runkiewicz (1983): *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej. Seria monografie, rok. XXXVIII, Warszawa
- [3] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk (2010): *Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali. Tom 1*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN
- [4] K. Flaga (1970): *Wpływ wielkości elementów próbnych na ocenę wytrzymałości betonu metodą sklerometryczną*. Inżynieria i budownictwo, nr 10, s. 395-399
- [5] K. Flaga (1974): *Wpływ temperatury dojrzewania i obróbki termicznej na ocenę wytrzymałości betonu metodą sklerometryczną*. I Krajowe Sympozjum Badania Nieniszczące, ITB, Warszawa
- [6] T. Godycki-Ćwirko (1984): *Mechanika betonu*. Arkady, Warszawa
- [7] P. Góra (2012): *Most w Boiskach – studium przebudowy*. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Lubelska, Lublin
- [8] S. Karaś (2004): *O badaniach betonu mostów metodami „pull-off” i „pull-out”*. Inżynieria i Budownictwo, nr 7, s. 359-369
- [9] S. Karaś (2011): *Ocena wytrzymałości betonu według normy PN-EN 13791*. Drogownictwo, nr 2, s. 42-48
- [10] S. Karaś (2011): *Norma PN-EN 13791 – pytania o definiowanie klasy wytrzymałości betonu*. Inżynieria i Budownictwo, nr 10, s. 69-71
- [11] R. Kozak i inni (1970): *Badanie materiałów, elementów i konstrukcji*. Budownictwo betonowe T. VIII, Arkady, Warszawa
- [12] J. Małolepszy (2000): *Technologia betonu: metody badań*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków
- [13] M. Neville (2000): *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków
- [14] L. Runkiewicz (1974): *Wpływ naprężenia w betonie na ocenę jego wytrzymałości i jednorodności młotkiem Schmidta*. I Krajowe Sympozjum Badania Nieniszczące, ITB, Warszawa
- [15] L. Runkiewicz (1983): *Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji za pomocą sklerometrów Schmidta*. ITB, Warszawa
- [16] L. Runkiewicz (1991): *Wpływ wybranych czynników na wyniki badań sklerometrycznych betonu*. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa
- [17] L. Runkiewicz (1999): *Diagnostyka i wzmacnianie konstrukcji żelbetonowych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce
- [18] L. Runkiewicz (2002): *Badania konstrukcji żelbetonowych*. Biuro Gamma, Warszawa
- [19] PN-EN 12390-3 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [20] PN-EN 12390-4 Badania betonu. Część 4: Wytrzymałość na ściskanie – Specyfikacja maszyn wytrzymałościowych
- [21] PN-EN 12504-2 Badania betonu w konstrukcjach. Część 2: Badania nieniszczące. Oznaczenia liczby odbicia
- [22] PN-EN 13791 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych
- [23] PN-EN 1992-1-1 Projektowanie konstrukcji z betonu. Reguły ogólne dla budynków
- [24] PN-74/B-06262 Nieniszczące badania konstrukcji z betonu. Metoda sklerometryczna badania wytrzymałości betonu na ściskanie za pomocą młotka Schmidta
- [25] Instrukcja ITB 210/1977 Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu
- [26] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [27] PN-B-88/06250 Beton zwykły ■