

Jerzy Hoła¹, Łukasz Sadowski²

PROBLEM WIELKOSKALOWEGO PODEJŚCIA DO OCENY ZESPOLENIA WARSTW BETONOWYCH

Wprowadzenie

Trwałość zarówno warstwowych elementów betonowych, takich jak podłogi, jak i elementów betonowych skorodowanych powierzchniowo i naprawionych poprzez nałożenie warstwy betonu naprawczego, istotnie zależy od należytego zespolenia warstw [1]. To należyte zespolenie zdefiniowane jest normowo [2] w rozumieniu żądanej minimalnej wartości przyczepności międzywarstwowej. Warto w tym miejscu powiedzieć, że zjawiska fizykochemiczne występujące na granicy dwóch stykających się materiałów, prowadzące do ich wzajemnego zespolenia, nazywane są przyczepnością - adhezją (łac. „adhaesio” - szczepienie). Wyróżnia się adhezję właściwą (specyficzną), związaną z oddziaływaniami chemicznymi i fizykochemicznymi, oraz adhezję mechaniczną, związaną z mechanicznym zakotwieniem materiału warstwy wierzchniej w porach i nierównościach materiału warstwy podkładowej [3-7].

Makroskopową miarą zespolenia betonu warstwy wierzchniej z betonem warstwy podkładowej (spodniej) jest wartość przyczepności przy odrywaniu f_b , określana w praktyce niszcząca metodą odrywania na podstawie pomiaru wartości siły odrywającej za pomocą specjalnego siłownika [2]. Im wyższa jest wartość f_b , tym zespolenie uznaje się za lepsze. Na podstawie tych badań można uzyskać „mapę przyczepności”, na przykład na użytek zgrubnej lokalizacji rejonów wadliwych. Na podstawie tych badań można także ocenić, czy oderwanie nastąpiło na styku warstw (zniszczenie adhezyjne) czy w materiale warstwy wierzchniej lub podkładowej (zniszczenie kohezyjne), jednak bez uzyskania odpowiedzi na pytanie, dlaczego tak się stało.

Oceny zespolenia warstw betonowych w skali makro można też dokonać przy wykorzystaniu do tego celu metody młoteczkowej, metody odpowiedzi na impuls

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: jerzy.hola@pwr.edu.pl

² Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: lukasz.sadowski@pwr.edu.pl

[8] i ultradźwiękowej metody echa [9], a predykcji wartości f_b można dokonać na przykład przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (SSN), bazując na pomiarach wykonanych wymienionymi metodami nieniszczącymi [10].

W ostatnim czasie coraz częściej podejmowane są działania w kierunku zwiększenia wartości przyczepności między warstwami ponad żądaną wartość minimalną. Działania te polegają z jednej strony na odpowiednim przygotowaniu powierzchni warstwy spodniej, powodującym na przykład zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia, odkrycie kruszywa, usunięcie mleczka cementowego i/lub stosowanie środków szepnych zwiększających przyczepność na granicy warstw. Z drugiej zaś strony podejmuje się działania polegające na modyfikacji składu betonu przede wszystkim warstwy wierzchniej, dodatkami i nanododatkami uszczelniającymi strukturę. W działaniach tych bardzo pomocne może być wieloskalowe podejście do oceny zespolenia warstw betonowych, wymagające wykorzystania do tego celu jeszcze innych, poza metodą odrywania, nowoczesnych metod badawczych. Przykładowo, znając rozkład porów w strefie zespolenia, na odpowiednim poziomie obserwacji można świadomie dobrać odpowiedni dodatek uszczelniający strukturę betonu, obniżający porowatość. Znając z kolei skład chemiczny betonu w strefie zespolenia, można dobrać odpowiedni środek szepny zwiększający przyczepność na styku warstw. Obecnie udoskonalanie zespolenia jest zasadniczo wykonywane na drodze doświadczalnej w tym rozumieniu, że badaniom poddawane są próbki o różnych mikrostrukturach, dopóki nie zostaną spełnione określone oczekiwania.

Mając powyższe na uwadze, celem niniejszej pracy jest wskazanie możliwości wykorzystania dostępnych nowoczesnych metod badawczych do oceny struktury betonu w strefie zespolenia warstw na różnych poziomach obserwacji, zdefiniowanie tych poziomów, a także zaprezentowanie przykładowych rezultatów badań obrazujących wieloskalowe podejście do oceny zespolenia warstw.

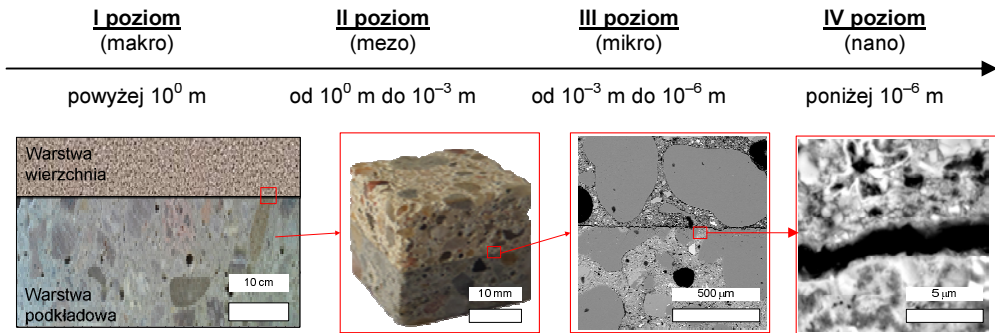
2. Skale (poziomy) obserwacji struktury betonu w strefie zespolenia warstw

Zdaniem autorów, można wyróżnić cztery poziomy obserwacji struktury betonu w strefie zespolenia warstw (rys. 1):

- I poziom - na tym poziomie obserwacji strefę zespolenia proponuje się nazwać jako makro-IZ. W tej skali strefa makro-IZ jest oceniana na podstawie badań przydatnych przede wszystkim do sporządzenia „map przyczepności”, na przykład na użytek zgrubnej lokalizacji rejonów wadliwych,
- II poziom - na tym poziomie obserwacji strefę zespolenia proponuje się nazwać jako mezo-IZ. W tej skali strefa mezo-IZ jest oceniana na podstawie badań właściwości fizycznych i mechanicznych, w tym morfologii powierzchni warstwy podkładowej, a także porowatości betonu w strefie zespolenia,
- III poziom - na tym poziomie obserwacji strefę zespolenia proponuje się nazwać jako mikro-IZ. W tej skali strefa mikro-IZ jest, podobnie jak warstwa przejściowa (ITZ) w betonie na styku kruszywa i matrycy cementowej, oceniana na

podstawie badań gęstości i twardości betonu w strefie zespolenia, w tym zmian tych właściwości w czasie, w wyniku wnikania zaczynu cementowego z betonu warstwy wierzchniej w pory i nierówności stwardniałego betonu warstwy podkładowej,

- IV poziom - na tym poziomie obserwacji strefę zespolenia proponuje się nazywać jako nano-IZ. W tej skali strefa nano-IZ jest oceniana na podstawie badań oddziaływania walencyjnych sił międzycząsteczkowych występujących między stykającymi się powierzchniami oraz migracji pierwiastków na poziomie atomowym, międzycząsteczkowym i molekularnym pomiędzy warstwami.



Rys. 1. Poziomy obserwacji struktury betonu w strefie zespolenia warstw

W tabeli 1 zamieszczono informacje odnośnie do przydatności dostępnych nowoczesnych metod badawczych i ocenianych tymi metodami parametrów betonu w strefie zespolenia warstw w zależności od poziomu obserwacji.

TABELA 1

Przydatność dostępnych nowoczesnych metod badawczych i ocenianych tymi metodami parametrów betonu w strefie zespolenia warstw w zależności od poziomu obserwacji

| Nazwa metody | Oceniany parametr | Poziom obserwacji | | | |
|------------------------|---|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | | I (makro) | II (mezo) | III (mikro) | IV (nano) |
| Odrywania | f_b - przyczepność przy odrywaniu | ■ | ■ | – | – |
| Skanowanie laserowe 3D | Sa - średnia wysokość powierzchni | – | ■ | – | – |
| | Sq - średniokwadratowa wysokość powierzchni | – | ■ | – | – |
| | Vmp - objętość piku materiału | – | ■ | – | – |
| | Str - wydłużenie struktury powierzchni | – | ■ | – | – |
| | Ssk - skośność powierzchni | – | ■ | – | – |
| | Sku - kurtoza powierzchni | – | ■ | – | – |
| | Sdr - rozwinięty stosunek pola międzyfazowego powierzchni | – | ■ | – | – |

| | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|
| Odpowiedzi na impuls | N_{av} - średnia zmienność dynamiki drgań | ■ | ■ | - | - |
| | K_d - sztywność dynamiczna | ■ | ■ | - | - |
| | M_p/N - tempo przyrostu dynamiki drgań | ■ | ■ | - | - |
| | v - współczynnik wadliwości | ■ | ■ | - | - |
| Młoteczkowa | A - amplituda impulsu nadawczego | ■ | ■ | - | - |
| | f_D - częstotliwość odpowiadającą fali ultradźwiękowej odbitej od wady | ■ | ■ | - | - |
| | f_T - częstotliwość odpowiadającą fali ultradźwiękowej odbitej od dna | ■ | ■ | - | - |
| Ultradźwiękowa | t - czas przejścia fali ultradźwiękowej od głowicy nadawczej do odbiorczej | ■ | ■ | - | - |
| Spektralna analiza fal powierzchniowych | v - prędkość propagacji poprzecznej fali ultradźwiękowej | ■ | ■ | - | - |
| Radarowa | A - amplituda impulsu nadawczego | ■ | ■ | - | - |
| | f_D - częstotliwość odpowiadającą fali elektromagnetycznej odbitej od wady | ■ | ■ | - | - |
| | f_T - częstotliwość odpowiadającą fali elektromagnetycznej odbitej od dna | ■ | ■ | - | - |
| Rentgenowska mikrotomografia komputerowa | μ - współczynnik pochłaniania promieniowania rentgenowskiego | - | ■ | ■ | ■ |
| Nanoindentacja | M - moduł indentacji | - | - | ■ | ■ |
| | H - twardość | - | - | ■ | ■ |
| Skaningowa mikroskopia elektronowa | w_i - udział procentowy pierwiastków | - | - | ■ | ■ |
| Radiografia neutronowa | D - dawka pochłonięta promieniowania neutronowego | - | - | ■ | ■ |
| Transmisyjna mikroskopia elektronowa | $\rho(r)$ - gęstość elektronowa cząsteczki | - | - | - | ■ |
| Mikroskopia sił atomowych | Sa - średnia wysokość powierzchni | - | - | - | ■ |

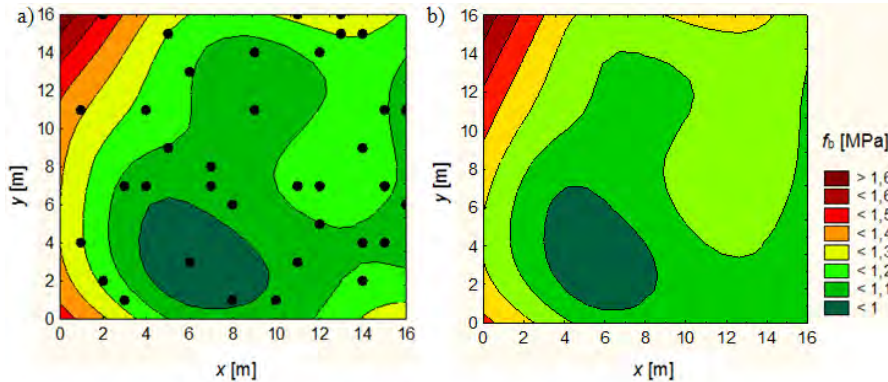
■ - nadaje się, - - nie nadaje się

3. Przykładowe rezultaty badań struktury betonu w strefie zespolenia warstw

3.1. Poziom obserwacji I (makro)

Przykładowe wyniki badań dla poziomu obserwacji w skali makro przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 2a pokazano przykładową mapę przyczepności przy odrywaniu f_b utworzoną na podstawie badań za pomocą metody odrywania. Z kolei

na rysunku 2b przedstawiono mapę przyczepności utworzoną na podstawie badań za pomocą metod niszczących i SSN. W tym przypadku do uprzednio nauczonej i przetestowanej sieci neuronowej podano wartości parametrów N_{av} , K_d , M_p/N , v i f_T ocenione w każdym z podanych na rysunku 2a punktów pomiarowych.

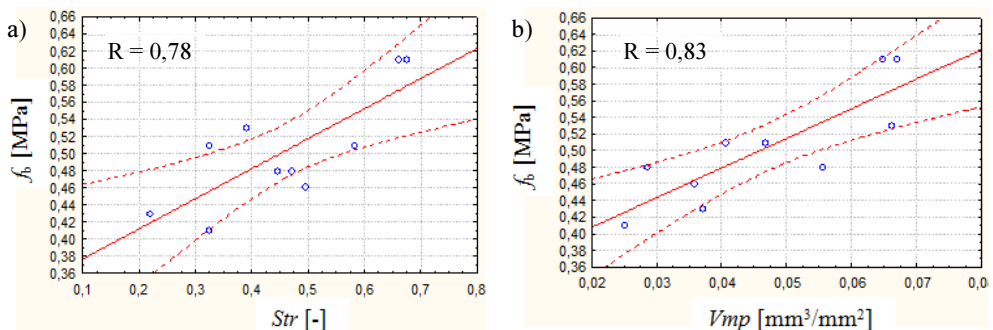


• - oznaczenie punktu pomiarowego do badań za pomocą metody pull-off

Rys. 2. Przykładowe zgrubne mapy przyczepności przy odrywaniu f_b utworzone na podstawie badań za pomocą: a) niszczącej metody odrywania, b) metod niszczących i SSN (na podstawie [11])

3.2. Poziom obserwacji II (mezo)

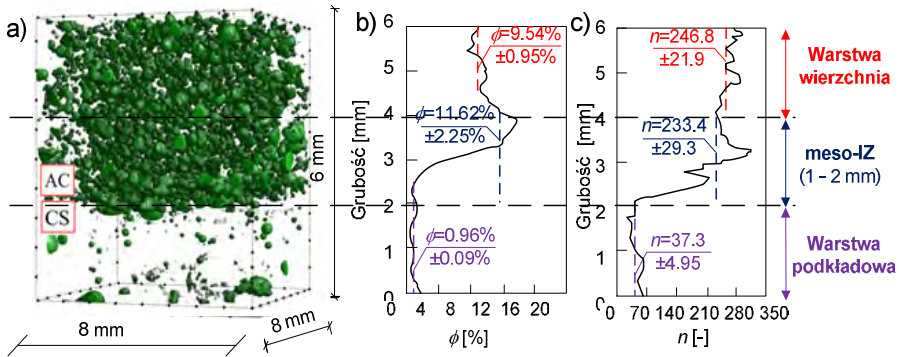
Przykładowe wyniki badań dla poziomu obserwacji w skali mezo, w postaci zależności między wartością przyczepności przy odrywaniu f_b określoną metodą odrywania a wartością parametrów morfologii powierzchni Str i V_{mp} , określonymi metodą skanowania laserowego 3D, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność między wartością przyczepności przy odrywaniu f_b określoną metodą odrywania a wartością przykładowego parametru morfologii powierzchni 3D: a) Str , b) V_{mp} (na podstawie [12])

Z kolei na rysunku 4 pokazano przykładowe wyniki badań porowatości betonu w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładową określoną metodą rentge-

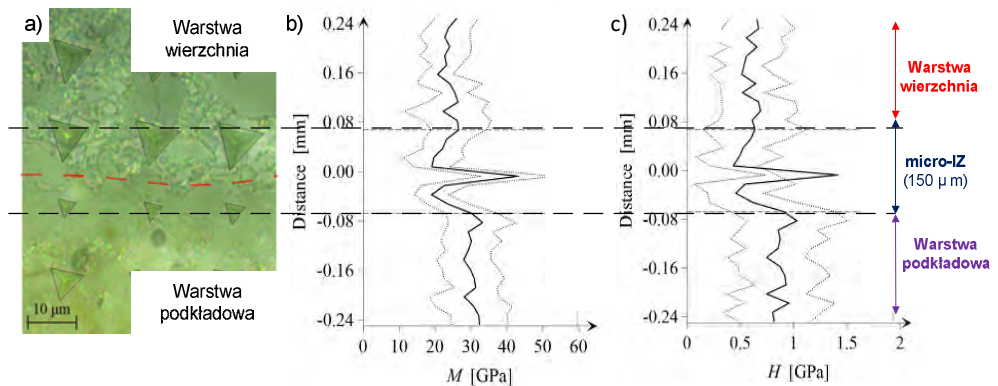
nowskiej mikrotomografii komputerowej w skali mezo. Na podstawie wizualnej oceny modelu porowatości 3D można zauważyć, że warstwa wierzchnia i podkładowa wykonane zostały z betonów znacznie różniących się porowatością i liczbą porów (rys. 4a). Na podstawie analizy zmian porowatości ϕ i liczby porów n na grubości badanej próbki można określić grubość strefy mezo-IZ (rys. 4b, c). Znajomość rozkładu porów w strefie zespolenia może być przydatna w doborze odpowiednich dodatków „uszczelniających” strukturę betonu i obniżających porowatość.



Rys. 4. Porowatość betonu w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładową określoną metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej w skali mezo:
 a) model porowatości 3D, b) porowatość ϕ w funkcji wysokości,
 c) liczba porów n w funkcji wysokości próbki (na podstawie [13])

3.3. Poziom obserwacji III (mikro)

Z kolei na rysunku 5 przedstawiono przykładowo rezultaty badań parametrów mikromechanicznych betonu w strefie zespolenia warstw, określone metodą nanoindentacji w skali mikro.



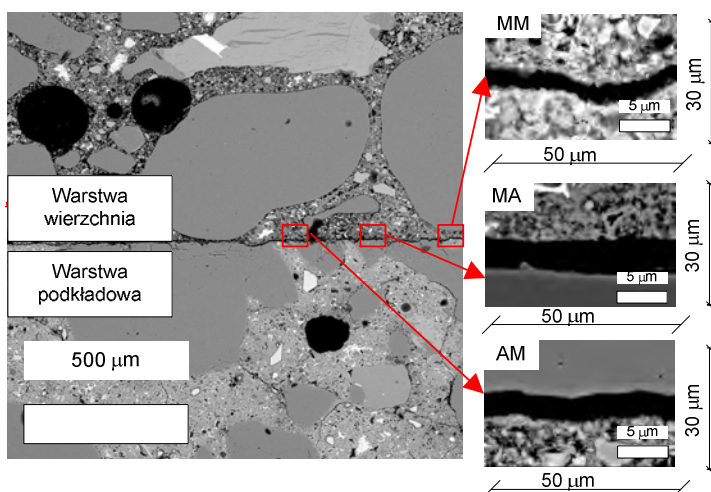
Rys. 5. Parametry mikromechaniczne betonu w strefie zespolenia warstw określone metodą nanoindentacji w skali mikro: a) widok optyczny wykonanych indentacji,
 b) moduł indentacji M w funkcji wysokości badanej próbki, c) twardość H w funkcji wysokości badanej próbki (na podstawie [14])

Na podstawie jakościowej wizualnej oceny widoku optycznego wykonanych indentacji można zauważyć, że beton w strefie mikro-IZ charakteryzuje się niższą twardością niż w strefie przypowierzchniowej warstwy podkładowej (rys. 5a). Na podstawie analizy zmian modułu indentacji M i twardości H na grubości badanej próbki można określić strefę mikro-IZ o grubości około $150\ \mu\text{m}$ (rys. 5b, c).

3.4. Poziom obserwacji IV (nano)

Strukturę betonu w strefie zespolenia warstw w skali nano można oceniać w obrębie następujących rodzajów kontaktu metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) (rys. 6):

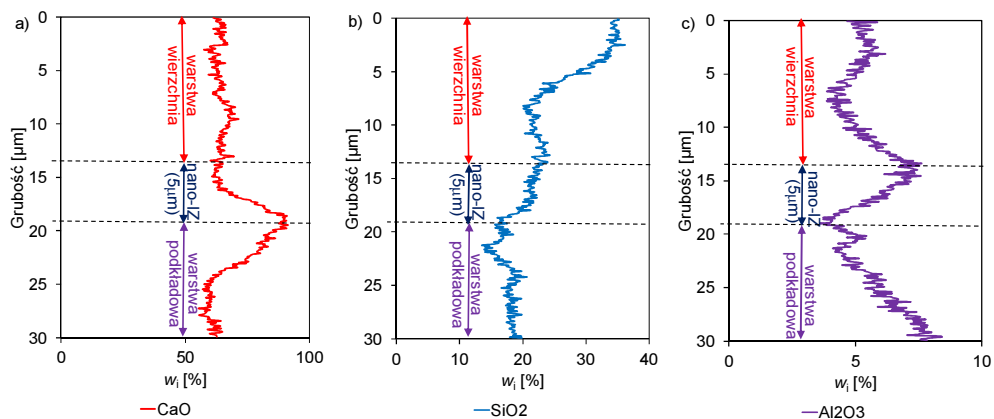
- matryca cementowa w warstwie wierzchniej - matryca cementowa w warstwie podkładowej (MM),
- matryca cementowa w warstwie wierzchniej - kruszywo w warstwie podkładowej (MA),
- kruszywo w warstwie wierzchniej - matryca cementowa w warstwie podkładowej (AM).



Rys. 6. Badania struktury betonu w strefie zespolenia warstw metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) w skali nano (na podstawie [15])

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowo, jaki jest udział procentowy w_i tlenków CaO , SiO_2 oraz Al_2O_3 w funkcji grubości próbki pobranej do badań ze strefy zespolenia warstw wierzchniej z podkładową, uzyskany na podstawie badań metodą skaningowej mikroskopii elektronowej w skali nano dla kontaktu MM.

Z analizy rysunku 7a wynika, że przebieg udziału procentowego w_i tlenku CaO osiąga wartości najwyższe w strefie przypowierzchniowej warstwy podkładowej w funkcji grubości próbki, tlenku Al_2O_3 w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej.



Rys. 7. Udział procentowy w_i tlenków CaO (a), SiO_2 (b) oraz Al_2O_3 (c) w funkcji grubości próbki pobranej ze strefy zespolenia warstw wierzchniej z podkładową, uzyskany na podstawie badań metodą skaningowej mikroskopii elektronicznej w skali nano dla kontaktu MM (na podstawie [15])

Na podstawie analizy zmian udziału procentowego w_i tlenków CaO, SiO_2 oraz Al_2O_3 na grubości badanej próbki pobranej ze strefy zespolenia warstw można określić strefę nano-IZ, która, jak widać z rysunku 7, ma grubość około 5 μm . Jak już wcześniej powiedziano, znajomość składu chemicznego betonu w strefie zespolenia może być przydatna w doborze odpowiedniego środka szepnego zwiększającego przyczepność na styku warstw.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania dostępnych nowoczesnych metod badawczych do oceny struktury betonu w strefie zespolenia warstw w zależności od poziomu obserwacji. Zdefiniowano te poziomy. Zestawienia metod dokonano w układzie tabelarycznym z podaniem nazw parametrów ocenianych poszczególnymi metodami.

Przedstawiono również przykładowe rezultaty badań, składające się na wieloskalowe podejście do oceny struktury betonu w strefie zespolenia warstw. I tak, dla poziomu obserwacji w skali makro przedstawiono mapy przyczepności utworzone na podstawie badań za pomocą niszczącej metody odrywania oraz metod nieniszczących i SSN. Dla poziomu obserwacji w skali mezo przedstawiono rezultaty badań w postaci zależności między f_b a wartościami parametrów morfologii powierzchni Str i Vmp , określonymi metodą skanowania laserowego 3D, oraz rezultaty badań porowatości betonu w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładową uzyskane metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Z kolei dla poziomu mikro przedstawiono rezultaty badań parametrów mikromechanicznych betonu w strefie zespolenia warstw określone metodą nanoindentacji, a dla poziomu nano badania pokazujące, jaki jest udział procentowy tlenków w funkcji grubości

próbki pobranej do badań ze strefy zespolenia warstw wierzchniej z podkładową, uzyskany na podstawie badań metodą skaningowej mikroskopii elektronowej.

Literatura

- [1] Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A., Ochrona i naprawa konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2016.
- [2] PN-EN 1542:2000 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych. Metody badań. Pomiar przyczepności przez odrywanie
- [3] Czarnecki L., Chmielewska B., Uwarunkowania adhezji w złączach budowlanych, Cement Wapno Beton 2005, 10, 74-85.
- [4] Hoła J., Bień J., Sadowski L., Schabowicz K., Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 2015, 63(1), 87-96.
- [5] Courard L., Parametric study for the creation of the interface between concrete and repairs products, Materials and Structures 2000, 33, 65-72.
- [6] Sadowski L., Mathia T.G., Multi-scale metrology of concrete surface morphology: Fundamentals and specificity, Construction and Building Materials 2016, 113, 613-621.
- [7] Adams R.D., Drinkwater B.W., Nondestructive testing of adhesively bonded joints, NDT&E International 1997, 30(2), 93-98.
- [8] Hoła J., Sadowski L., Schabowicz K., Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods, Automation in Construction 2011, 20(7), 799-807.
- [9] Garbacz A., Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych-ocena skuteczności napraw, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [10] Sadowski L., Hoła J., New nondestructive way of identifying the values of pull-off adhesion between concrete layers in floors, Journal of Civil Engineering and Management 2014, 20(4), 561-569.
- [11] Sadowski L., Nikoo M., Nikoo M., Hybrid metaheuristic-neural assessment of the adhesion in existing cement composites, Coatings 2017, 7(4), 49.
- [12] Hoła J., Sadowski L., Reiner J., Stach S., Usefulness of 3D surface roughness parameters for nondestructive evaluation of pull-off adhesion of concrete layers, Construction and Building Materials 2015, 84, 111-120.
- [13] Sadowski L., Stefaniuk D., Hoła J., Effect of the porosity of concrete within the interfacial zone between layers on their pull-off adhesion, Construction and Building Materials (w recenzji).
- [14] Sadowski L., Żak A., Hoła J., Multi-sensor evaluation of the concrete within the interlayer bond with regards to pull-off adhesion, Archives of Civil and Mechanical Engineering (w recenzji).

Streszczenie

W artykule przedstawiono problem wieloskalowego podejścia do oceny zespolenia warstw betonowych. Zaprezentowano możliwości zastosowania dostępnych nowoczesnych metod badawczych do oceny struktury betonu w strefie zespolenia w zależności od poziomu obserwacji. Zdefiniowano w pracy te poziomy. Przedstawiono również przykładowe rezultaty badań obrazujące wieloskalowe podejście do oceny struktury betonu w strefie zespolenia warstw.

Słowa kluczowe: zespolenie warstw, podkład betonowy, zaprawa cementowa

A problem of a multi-scale approach of the assessment of interlayer bond between concrete layers

Abstract

This article presents a problem of a multi-scale approach of the assessment of interlayer bond between concrete layers. The possibilities of applications of available modern measurement methods of the evaluation of the structure of the concrete within the interphase at different observation length scales have been presented. These scales have been defined in this study. Exemplary test results of this evaluation have been also presented in the article.

Keywords: layer bonding, concrete primer, cement mortar