

BADANIA POZIOMU ZESPOLENIA WARSTW WYKONANYCH Z KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH W UJĘCIU WIELOSKALOWYM

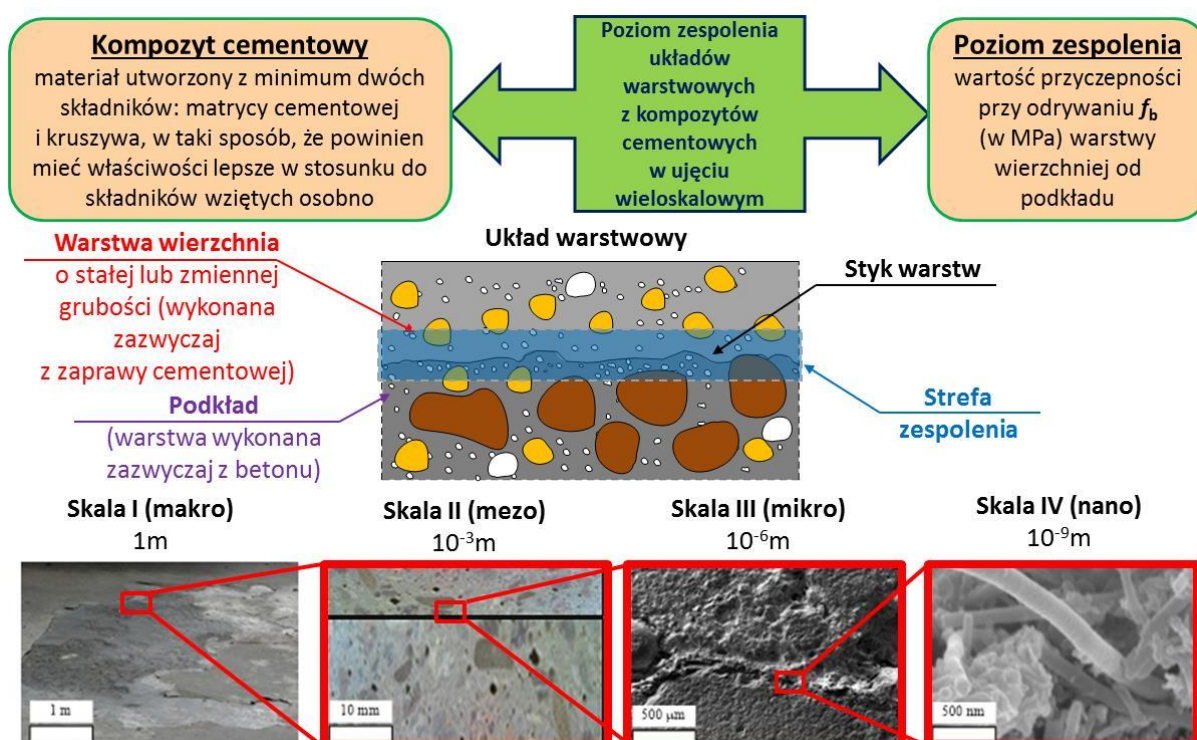
Łukasz SADOWSKI*, Jerzy HOŁA

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wybrzeże
Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

*lukasz.sadowski@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Przez kompozyt cementowy należy rozumieć materiał utworzony z minimum dwóch składników: matrycy cementowej i kruszywa, w taki sposób, że powinien mieć właściwości lepsze w stosunku do składników wziętych osobno. Stosowane w budownictwie układy warstwowe wykonane z kompozytów cementowych składają się najczęściej z warstwy wierzchniej o stałej lub zmiennej grubości wykonanej zazwyczaj z zaprawy cementowej oraz z podkładu, do budowy którego wykorzystywany jest przede wszystkim beton (rys. 1). Układy warstwowe mogą być nowo budowane (np. podłogi) lub istniejące. Mogą to też być elementy betonowe naprawiane, które po naprawie powierzchniowej, polegającej na nałożeniu warstwy naprawczej, stają się układem warstwowym.



Rys. 1. Wyjaśnienie podstawowych pojęć zawartych w tytule referatu.

Poprawna praca oraz trwałość układów warstwowych z kompozytów cementowych istotnie zależy od należytego poziomu ich zespolenia. Przez poziom zespolenia należy rozumieć wartość przyczepności przy odrywaniu f_b (w MPa). Jest ona oceniana w praktyce metodą odrywania i porównywana z wartością minimalną zdefiniowaną albo normowo albo przez projektanta. Przez ujęcie wieloskalowe należy rozumieć badania poziomu zespolenia w skalach od makro do nano.

Dużą niedogodnością metody odrywania jest to, że w każdym punkcie badawczym powstaje po zakończeniu badania ubytek wymagający uzupełnienia. Wymaga się ponadto, aby 1 pomiar kontrolny przypadał na powierzchnię wynoszącą około 3m^2 . W praktyce mankamenty te mają wpływ na ograniczenie liczby koniecznych do wykonania pomiarów kontrolnych. Dlatego uzasadnione jest badanie poziomu zespolenia metodami nieniszczącymi.

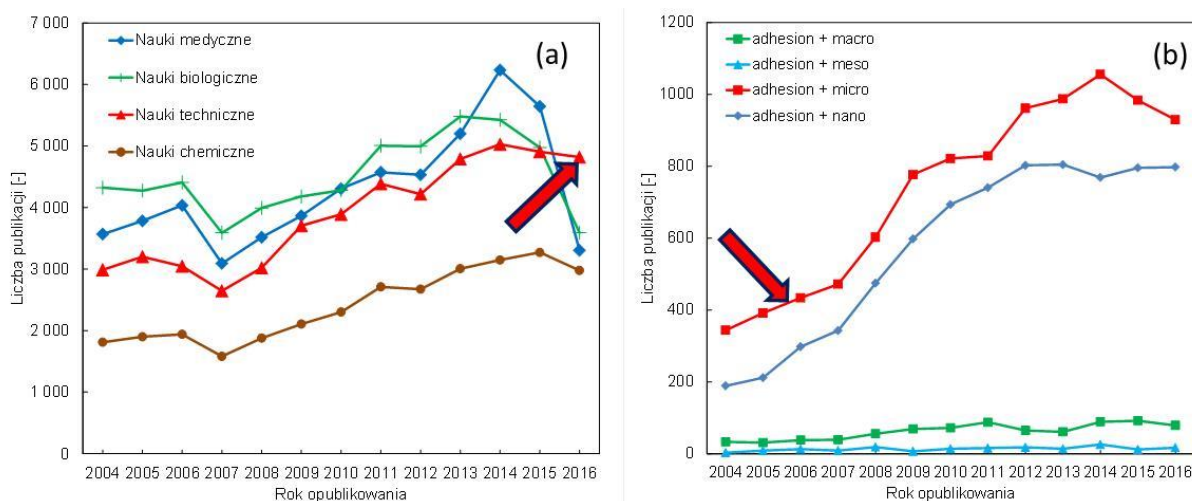
Mając na uwadze poprawną pracę oraz trwałość układów warstwowych wykonanych z kompozytów cementowych, w ostatnim czasie coraz częściej podejmowane są działania w kierunku zwiększenia przyczepności f_b ponad wymaganą wartość minimalną. Dotyczą one na przykład stosowania specjalnego przygotowania powierzchni podkładu, powodującego zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia, usunięcie mleczka cementowego lub powierzchniowe odstonięcie kruszywa. Podejmowane działania dotyczą również stosowania środków szepnych oraz modyfikacji struktury porów powietrznych kompozytów cementowych użytych do wykonania poszczególnych warstw. Wpływ danego działania na poziom zespolenia oceniany metodą odrywania w skali makro nie daje możliwości głębszej analizy rezultatu.

W ocenie wpływu tych wymienionych wyżej przykładowych działań na poziom zespolenia bardzo pomocne mogą być badania w ujęciu wieloskalowym. Rezultaty tych badań mogą w istotnym stopniu wspomagać podejmowanie decyzji w kwestii świadomego wyboru konkretnego zabiegu, czy też środka szepnego znacząco poprawiającego przyczepność, doboru danego rodzaju dodatku czy też domieszki pozytywnie ingerujących w strukturę kompozytu cementowego. Poszukiwanie relacji pomiędzy cechami kompozytów cementowych w strefie zespolenia warstw określanymi w skali makro, a cechami określanymi w skalach mezo, mikro i nano wydaje się być w tej sytuacji nie tylko interesujące, ale przede wszystkim zasadne. Relacje te mogą mieć duże znaczenie w praktyce, bo mogą pozwolić uzyskiwać pożądane cechy makroskopowe przez odpowiednie modelowanie struktury. Obecnie udoskonalanie zespolenia w skali makro jest wykonywane zazwyczaj empirycznie, tzn. wiele próbek o różnych mikrostrukturach jest wytwarzanych i testowanych, dopóki nie zostaną uzyskane żądane cechy.

Mając powyższe na uwadze, celem niniejszej pracy jest wskazanie na możliwości wykorzystania dostępnych nowoczesnych metod badawczych i ocenianych za pomocą tych metod deskryptorów na użytek badań strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym na różnych poziomach obserwacji, zdefiniowanie tych poziomów, a ponadto wskazanie obszernej literatury, w której zawarte są między innymi przykłady badań własnych autorów. Przedstawiony referat bazuje na artykule [1], opublikowanym w 2017 roku w czasopiśmie Applied Sciences.

2. PRZEGLĄD LITERATUROWY

Warto rozpocząć od tego, że zainteresowanie problemem przyczepności w nauce zauważalne jest w liczbie publikacji (rys. 2).



Rys. 2. Analiza bibliograficzna liczby publikacji dotyczących zespolenia w ogóle z podziałem na: a) dyscypliny naukowe, b) skale obserwacji (wyniki dla słowa „adhesion” w abstrakcie, tytule i słowach kluczowych w bazie Scopus – stan na 23.12.2017)

Z przedstawionej na rys. 2a analizy bibliograficznej wynika, że ogólna liczba publikacji dotyczących tego problemu sukcesywnie rośnie. Zauważalny jest systematyczny wzrost ich liczby w naukach technicznych i chemicznych. Z przedstawionej na rys. 2b analizy wynika, że liczba publikacji zawierających słowa „adhesion” w abstrakcie, tytule i słowach kluczowych w zależności od poziomu na jakim prowadzone były obserwacje wzrosła od 2004 roku o około 270% (poziom „micro”) i 420% (poziom „nano”).

W ostatnich latach badania poziomu zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym polegały głównie na badaniach makroskopowych z wykorzystaniem „map przyczepności” wykonywanych metodą odrywania, czy też badań zespolenia wielkogabarytowych elementów betonowych z wykorzystaniem badań przyczepności przy zginaniu [2]. Zgrubne „mapy przyczepności” wykonywane były również na bazie rezultatów badań uzyskanych metodami młoteczkową i ultradźwiękową echa [3]. Z kolei *Sadowski i Hoła* [4]-[10] wykazali, że możliwa jest predykcja wartości przyczepności przy odrywaniu f_b warstw betonowych na podstawie badań nieniszczących przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (SSN).

Badania na niższym poziomie obserwacji polegały głównie na obserwacji miejsc i sposobu zniszczenia strefy zespolenia powstałych po badaniach metodą odrywania [12]-[22]. Mimo, że do oceny morfologii powierzchni betonu nadal popularnością cieszą się test piaskowy i metody profilometryczne, to *Siewczyńska* [23], *Hoła i inni* [24] oraz *Sadowski i inni* [25] z powodzeniem do oceny strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym wykorzystywali metodę skanowania laserowego 3D. Na poziomie meso badania polegały też na analizie deskryptorów akustycznych uzyskiwanych za pomocą metody młoteczkowej [26]-[27], ultradźwiękowej metody echa [28]-[29] oraz ultradźwiękowej [30].

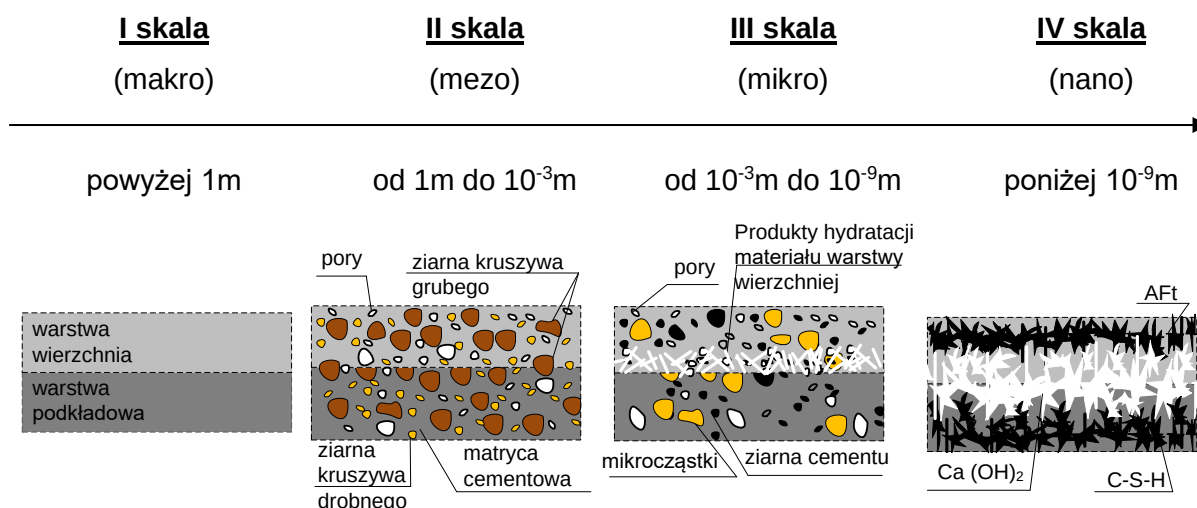
Z kolei badania na poziomie mikro przeprowadzane były z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego [31]-[33] oraz porozymetrii rtęciowej. Natomiast w ostatnich latach obserwuje się, że do oceny strefy zespolenia na poziomie mikro i nano coraz częściej stosuje się mikrotomografię komputerową [34]-[35] oraz nanoindentację [36].

Czarnecki i Garbacz [37] oraz *Pietrie* [38] zwrócili uwagę, że zespolenie warstw betonowych, jako zagadnienie wieloskalowe, należy badać na różnych poziomach obserwacji.

3. POZIOMY BADANIA POZIOMU ZESPOLENIA UKŁADÓW WARSTWOWYCH Z KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

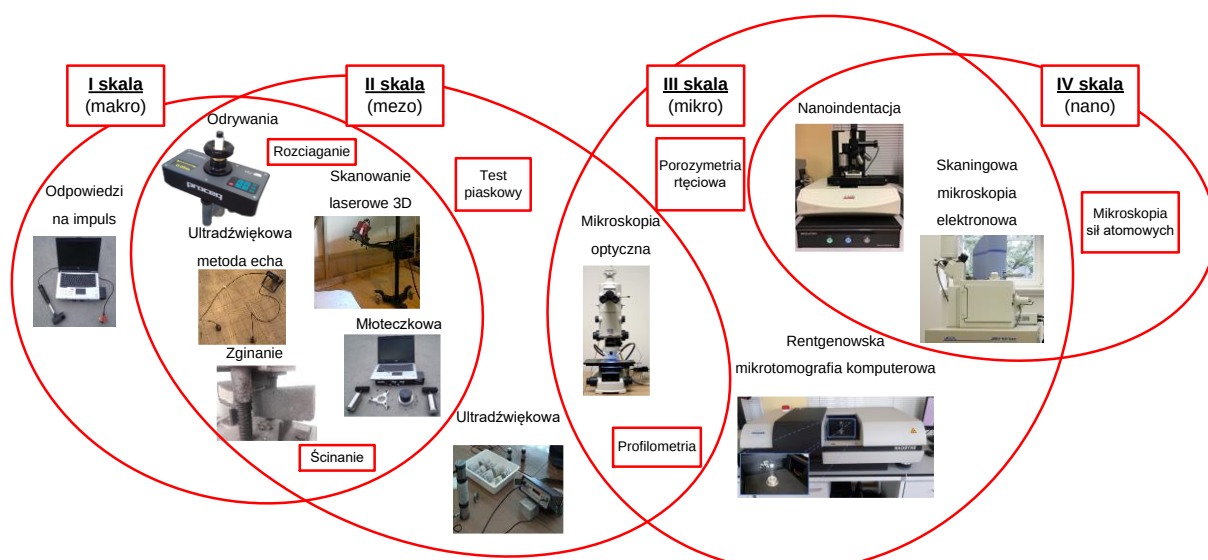
Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań uszczegółowione zostały w pracy [1] badania poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych w czterech skalach obserwacji (rys. 3):

- I skala obserwacji (makro) – w tej skali oceniana jest przede wszystkim wartość przyczepności przy odrywaniu f_b na podstawie badań seminieniszczących,
- II skala obserwacji (mezo) - w tej skali oceniane są przede wszystkim parametry opisujące morfologię powierzchni podkładu,
- III skala obserwacji (mikro) - w tej skali oceniana jest przede wszystkim struktura porów powietrznych kompozytu cementowego w strefie zespolenia oraz jej zmiany w czasie,
- IV skala obserwacji (nano) - w tej skali możliwa jest obserwacja mechanizmu zjawisk na poziomie cząsteczkowym, w tym na przykład ocena składu chemicznego kompozytu cementowego w strefie zespolenia i migracja atomów pierwiastków z warstwy do warstwy.



Rys. 3. Cztery skale badania (obserwacji) poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych (na podstawie artykułu [1])

Na rys. 4 zamieszczono dane odnośnie do przydatności dostępnych nowoczesnych metod badawczych w zależności od poziomu badań strefy zespolenia warstw. Z kolei w tab. 1 zamieszczono rezultaty przeglądu dostępnych nowoczesnych metod badawczych i ocenianych tymi metodami podstawowych deskryptorów w strefie zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym, ze wskazaniem ich przydatności w danej skali obserwacji.



Rys. 4. Przydatność dostępnych metod badawczych w zależności od skali obserwacji poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych (na podstawie artykułu [1])

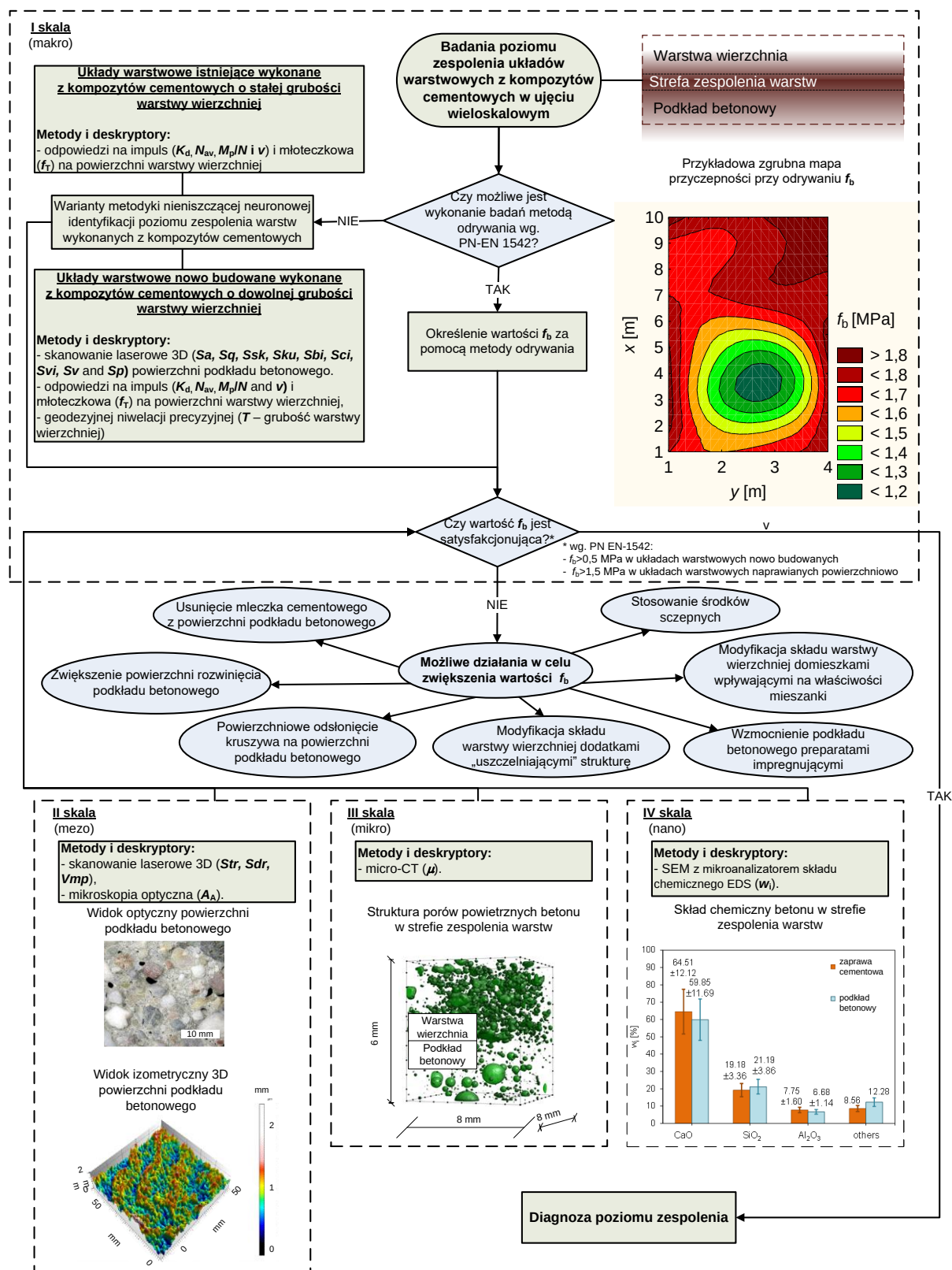
Tab. 1. Przydatność dostępnych metod badawczych i ocenianych za ich pomocą deskryptorów w zależności od skali obserwacji poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych (na podstawie artykułu [1])

Nazwa metody	Podstawowe oceniane deskryptory	Przydatność w skali obserwacji
Odrywania	f_b - przyczepność przy odrywaniu	I, II
Skanowania laserowego 3D	Sku - kurtkoza powierzchni, Str - wydłużenie struktury powierzchni, Sa - średnia wysokość powierzchni, Sdr - rozwinięty stosunek pola międzyfazowego powierzchni, Sq - średniokwadratowa wysokość powierzchni, Ssk - skośność powierzchni, Vmp - objętość piku materiału.	I, II
Odpowiedzi na impuls	K_d - sztywność dynamiczna, M_p/N - tempo przyrostu dynamiki drgań, N_{av} - średnia zmienność dynamiki drgań, v - współczynnik wadliwości.	I, II
Młoteczkowa	A - amplituda impulsu nadawczego, f_T - częstotliwość fali ultradźwiękowej odbitej od dna.	I, II
Mikroskopia optyczna	A_A - udział odsłoniętego kruszywa na powierzchni podkładu	II, III
Rentgenowska mikrotomografia komputerowa	μ - materiałowy współczynnik pochłaniania promieni rentgenowskich	III
Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) z mikroanalizatorem składu chemicznego EDS	w_i - udział procentowy tlenków i atomów pierwiastków.	III, IV

Z tab. 1 wynika, że większość badań poziomu zespolenia warstw była dokonywana na poziomie makro i mezo, z wykorzystaniem metod makroskopowych (przede wszystkim odrywania). Wraz z rozwojem nowoczesnych metod badawczych (przede wszystkim SEM) pojawiły się zastosowania na poziomie mikro. Zdaniem autorów w najbliższym czasie należy się spodziewać zwiększenia zainteresowania niższymi poziomami obserwacji, przy wykorzystaniu nanoindentacji i rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej.

4. PROPOZYCJA METODYKI BADAŃ STREFY ZESPOLENIA WARSTWY WIERZCHNIEJ Z PODKŁADEM BETONOWYM

W wyniku dotychczas przeprowadzonych badań zaproponowano skuteczną metodykę badań poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych (rys. 5).



Rys. 5. Propozycja skutecznej metodyki badań poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych w ujęciu wieloskalowym (na podstawie artykułu [1])

Jak wynika z rys. 5 dla I skali można poszukiwać rozwarstwień (ocena zerojedynkowa) z wykorzystaniem metod nieniszczących. W przypadku zainteresowania wartością f_b można badania wykonać za pomocą niszczącej metody odrywania lub metod nieniszczących i SSN.

Jak wynika z podstaw badania morfologii powierzchni betonu sprecyzowanych w [39], badania w skali II ukierunkowane powinny być na ocenę morfologii powierzchni warstwy podkładowej. W szczególności należy zwrócić uwagę na wpływ maksymalnej wielkości ziarna kruszywa w betonie warstwy podkładowej, stopnia rozwinięcia powierzchni tej warstwy, stopnia odsłonięcia na powierzchni tej warstwy kruszywa grubego, wskutek zastosowania różnych sposobów jej przygotowania, na zespolenie warstw.

Z kolei na poziomie III badania powinny być ukierunkowane na opisywanie przebiegu oraz struktury porów powietrznych w betonie w strefie zespolenia w zależności od sposobu przygotowania powierzchni warstwy podkładowej oraz wpływu tego udziału na zespolenie warstw. Badania te można realizować metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Na tym poziomie obserwacji można również oceniać twardość betonu w strefie zespolenia warstw, określoną metodą nanoindentacji.

Z kolei badania betonu w strefie zespolenia warstw na poziomie IV należy wykonywać z wykorzystaniem metody skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Analizie powinno się poddawać na przykład skład chemiczny betonu w strefie zespolenia, w tym w szczególności udziały procentowe pierwiastków i tlenków w funkcji grubości próbki.

4. PODSUMOWANIE

W artykule, na podstawie dokonanego rozpoznania literaturowego i doświadczeń własnych, wyróżniono cztery poziomy badania (obserwacji) strefy zespolenia warstwy wierzchniej z podkładem betonowym. Przedstawiono możliwości wykorzystania w tym celu dostępnych nowoczesnych metod badawczych i ocenianych tymi metodami podstawowych dyskryptorów, ze wskazaniem ich przydatności na danym poziomie obserwacji.

Zamieszczono również autorską propozycję skutecznej metodyki badań poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych w ujęciu wieloskalowym.

Ponadto w referacie wskazano obszerną literaturę, w której zawarte są między innymi przykłady badań własnych autorów.

LITERATURA

- [1] Sadowski Ł., 2017, Multi-scale evaluation of the interphase zone between the overlay and concrete substrate: methods and descriptors, Applied Sciences, vol. 7 (9), art. 893
- [2] Halicka, A. (2011). Influence new-to-old concrete interface qualities on the behaviour of support zones of composite concrete beams. Construction and building materials, 25(10), 4072-4078.
- [3] Garbacz A. Application of stress based NDT methods for concrete repair bond quality control, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 2015, 63 (1), s. 77-85
- [4] Sadowski, Ł., & Hoła, J. (2015). ANN modeling of pull-off adhesion of concrete layers. Advances in Engineering Software, 89, 17-27.
- [5] Sadowski Ł., Hoła J., Czarnecki S. Non-destructive neural identification of the bond between concrete layers in existing elements, Construction and Building Materials, 127, 49-58.
- [6] Sadowski, Ł., Nikoo, M., & Nikoo, M. (2017). Hybrid Metaheuristic-Neural Assessment of the Adhesion in Existing Cement Composites. Coatings, 7(4), 49

- [7] Sadowski, Ł., Nikoo, M., & Nikoo, M. (2015). Principal Component Analysis combined with a Self Organization Feature Map to determine the pull-off adhesion between concrete layers. *Construction and Building Materials*, 78, 386-396
- [8] Sadowski Ł., Hoła J., Czarnecki S., Wang D., Pull-off adhesion value prediction of variable thick concrete layer to the substrate, *Automation in Construction* (under review)
- [9] Sadowski, Ł. (2015). Non-destructive identification of pull-off adhesion between concrete layers. *Automation in Construction*, 57, 146-155.
- [10] Sadowski, Ł., & Hoła, J. (2014). New nondestructive way of identifying the values of pull-off adhesion between concrete layers in floors. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(4), 561-569.
- [11] Courard, L., Piotrowski, T., & Garbacz, A. (2014). Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cement and Concrete Composites*, 46, 73-80.
- [12] Roy, M., Ray, I., & Davalos, J. F. (2013). High-performance fiber-reinforced concrete: Development and evaluation as a repairing material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(10), 04014074.
- [13] Huang, H., Liu, B., Xi, K., & Wu, T. (2016). Interfacial tensile bond behavior of permeable polymer mortar to concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 210-221.
- [14] Naderi, M. (2008). Adhesion of different concrete repair systems exposed to different environments. *The Journal of Adhesion*, 84(1), 78-104.
- [15] Mauroux, T., Turcry, P., Benboudjema, F., & Aït-Mokhtar, A. (2014). Influence of the time of demoulding on adhesion of cement-based mortar modified with cellulose ether. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(10), 1157-1166.
- [16] Tayeh, B. A., Bakar, B. A., Johari, M. M., & Ratnam, M. M. (2013). The relationship between substrate roughness parameters and bond strength of ultra high-performance fiber concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(16), 1790-1810.
- [17] Horszczaruk, E., & Brzozowski, P. (2014). Bond strength of underwater repair concretes under hydrostatic pressure. *Construction and Building Materials*, 72, 167-173.
- [18] Cleland, D. J., & Basheer, L. (2007). Pull-off adhesion testing for concrete repairs. *Magazine of Concrete Research*, 59(10), 771-776.
- [19] Skominas, R., Gurskis, V., Sadzevicius, R., Damulevicius, V., & Radzevicius, A. (2017). Evaluation of cement mortar suitability for repairing concrete in hydraulic structures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-7.
- [20] Harris, D. K., Muñoz, M. A. C., Gheitasi, A., Ahlborn, T. M., & Rush, S. V. (2014). The challenges related to interface bond characterization of ultra-high-performance concrete with implications for bridge rehabilitation practices. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(2), 75-101.
- [21] Aykac, S., Kalkan, I., & Tankut, T. (2016). Flexural strengthening and repair of RC slabs by adding a new RC layer. *Structural Concrete*, 17(5), 896-909.
- [22] Mohamad, M. E., Ibrahim, I. S., Abdullah, R., Rahman, A. A., Kueh, A. B. H., & Usman, J. (2015). Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond. *Cement and Concrete Composites*, 56, 1-14.
- [23] Siewczyńska M. Method for determining the parameters of surface roughness by usage of a 3D scanner. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2012, 12 (1), s. 83-89.
- [24] Hoła J., Sadowski Ł., 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.
- [25] Sadowski Ł., Czarnecki S., Hoła J. (2016). Evaluation of the morphology of concrete substrate and their adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 3-13

- [26] Garbacz A. Application of stress based NDT methods for concrete repair bond quality control, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 2015, 63 (1), s. 77-85
- [27] Garbacz, A., Piotrowski, T., Courard, L., & Kwaśniewski, L. (2017). On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis. *Construction and Building Materials*, 134, 311-323.
- [28] Garbacz A., Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych-ocena skuteczności napraw, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2007.
- [29] Tsioulou, O., Lampropoulos, A., & Paschalis, S. (2017). Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, 131, 66-77.
- [30] Szymanowski, J., & Sadowski, Ł. (2015). Adhesion Assessment Between Concrete Layers Using the Ultrasonic Pulse Velocity Method. *Applied Mechanics & Materials*, 797.
- [31] Beushausen, H., Höhlig, B., & Talotti, M. (2017). The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the OTZ. *Cement and Concrete Research*, 92, 84-91.
- [32] Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Megat Johari, M. A., & Zeyad, A. M. (2014). Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(18), 1846-1864.
- [33] Satoh, A., & Yamada, K. (2016). FEM simulation of tension struts on adhesion performance of mortar-repair interface. *Engineering Fracture Mechanics*, 167, 84-100.
- [34] Lukovic, M., & Ye, G. (2015). Effect of moisture exchange on interface formation in the repair system studied by X-ray absorption. *Materials*, 9(1), 2.
- [35] Sadowski, Ł., & Stefaniuk, D. (2017). Microstructural Evolution within the Interphase between Hardening Overlay and Existing Concrete Substrates. *Applied Sciences*, 7(2), 123.
- [36] Luković, M., Šavija, B., Dong, H., Schlangen, E., & Ye, G. (2014). Micromechanical study of the interface properties in concrete repair systems. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(9), 320-339.
- [37] Czarnecki L., Garbacz A. Adhesion of interfaces of building materials : a multi-scale approach, *Advances in Materials Science and Restoration*, no. 2, 2007, Aedificatio Publishers
- [38] Petrie, E. M. (2000). *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill.
- [39] Sadowski Ł., Mathia T. G., 2016, Multi-scale metrology of concrete surface morphology: fundamentals and specificity, *Construction and Building Materials*, vol. 113, s. 613-621

