

Zastosowanie dwóch technik pomiarowych do oceny struktury wewnętrznej fibrobetonu

Janusz Kobaka^{1,2}, Jacek Katzer², Machi Zawidzki³

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii, ul. Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

³ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: W artykule opisano badania struktury wewnętrznej betonu zbrojonego włóknami stalowymi przy zastosowaniu dwóch nieniszczących technik pomiarowych: metody wykorzystującej fale ultradźwiękowe oraz metody wykorzystującej indukcję elektromagnetyczną. Metoda ultradźwiękowa pozwoliła na określenie wad materiałowych powstałych w wyniku niejednorodnego rozkładu włókien w przestrzeni badanych ciał próbnych. Metoda wykorzystująca indukcję elektromagnetyczną pozwoliła dokonać identyfikacji zawartości włókien. Badania wykazały, że fibrobeton charakteryzujący się stosunkowo dużą zawartością włókien stalowych (powyżej 1,5 % objętościowo), jest podatny na powstawanie nieciągłości materiałowych w jego wewnętrznej strukturze. Zjawisko to występuje w bardzo niewielkim stopniu w betonach o zawartości włókien stalowych poniżej 1,5 %.

Słowa kluczowe: ultradźwięki, indukcja elektromagnetyczna, beton, włókna, fibrobeton

1. Wprowadzenie

Beton jest najpopularniejszym materiałem budowlanym na świecie. Jego globalna produkcja osiągnęła w 2020 r. poziom około 26 Gt rocznie [1]. Podstawowym materiałem niezbędnym do produkcji betonu, oprócz cementu i wody (tworzących zaczyn), są kruszywa budowlane. Globalne wydobycie naturalnych kruszyw budowlanych wynosi około 20 Gt rocznie, przekraczając wydobycie paliw kopalnych (około 15 Gt rocznie) [1]. Wpływ wydobycia kruszyw na środowisko naturalne jest bardzo duży. Kruszywo stosowane do betonu składa się z frakcji grubych oraz drobnych, te ostatnie wypełniają przestrzenie między ziarnami frakcji grubych. Kruszywo stanowi większość, około 70 % objętości betonu, tak więc przy ciągłym wzroście zapotrzebowania na ten materiał, istnieje na nie duży popyt. W północnych regionach Polski występują liczne złoża tzw. pospółki, stanowiące naturalną mieszaninę frakcji piaskowych 0–2 mm i żwirowych powyżej 2 mm. Powodem występowania pospółki w tych rejonach była erozja, a następnie migracja skał spowodowana przesuwaniem się lodowców z Półwyspu Skandynawskiego na południe w czasie kolejnych epok glacialnych nawiedzających Bałtyk i regiony dzisiejszej

Polski [2]. Procentowy udział żwiru w pospółce jest znacznie mniejszy niż piasku i waha się w przedziale od 10 % do 50 %, stanowiąc średnio około 30 %. Stosunek udziału żwiru do piasku w betonie jest odwrotny niż w pospółce i wynosi on średnio około 3/1. Tak niewielki udział frakcji żwirowej w pospółce w stosunku do udziału piasku, przy jednocześnie większym zapotrzebowaniu na tę frakcję, stał się powodem opracowania technologii zwanej hydroklasyfikacją. Technologia ta polega na wypłukiwaniu frakcji żwirowych z pospółki i pozostawianiu frakcji drobnych na terenie wyrobiska lub w jego bezpośrednim pobliżu w postaci hałd (rys. 1). Hydroklasyfikacja stosowana była od lat 60. XX w. Na terenie północnej Polski zarejestrowano od tego czasu ponad 600 kopalni kruszyw mineralnych, z których wiele wykorzystywało tę technologię. Frakcje drobne kruszywa, uznane jako bezwartościowe w czasach, kiedy były składowane jako odpady, stają się obecnie cennym materiałem budowlanym i są stosowane z powodzeniem w nowszych technologiach, takich jak beton wysokowartościowy, beton przeznaczony do druku 3D lub jako fibrobeton. Wykorzystanie już istniejących hałd tego materiału zapobiega dalszej degradacji środowiska naturalnego i stanowi alternatywę kosztownej ich rekultywacji.

Fibrobeton, nazwany również betonem ze zbrojeniem rozproszonym, stanowi alternatywę dla tradycyjnego żelbetu [3] (betonu zbrojonego przy użyciu stalowych prętów i strzemion) oraz siatkobetonu [4]. Zbrojenie rozproszone ma na celu poprawę wytrzymałości na rozciąganie betonu, która stanowi zaledwie około 1/10 jego wytrzymałości na ściskanie. Betony ze zbrojeniem rozproszonym z powodzeniem stosowane są w budownictwie już od wielu lat [5]. Często można je napotkać jako posadzki przemysłowe zdolne do przeniesienia dużych obciążeń mechanicznych [6]. Fibrobeton jest

Autor korespondujący:

Janusz Kobaka, Janusz.Kobaka@agh.edu.pl; Janusz.Kobaka@uwm.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.02.2024 r., przyjęty do druku 07.11.2024 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Hałda piasków odpadowych na terenie Pomorza Zachodniego
Fig. 1. A heap of waste sand in Western Pomerania

dobrym przykładem korzyści z wykorzystania jedynie frakcji drobnych kruszywa z pominięciem frakcji grubych. Wiele posadzek przemysłowych wykonuje się bez udziału żwiru, dzięki czemu możliwe jest zastosowanie większej zawartości włókien, niż w przypadku betonu o większych wymiarach ziaren [7–9]. Jednym z głównych problemów technologicznych związanych z produkcją i zastosowaniem fibrobetonu jest jego jednorodność [10]. Szczególnie ważnym problemem jest kontrola równomierności rozprowadzenia włókien stalowych w całej objętości betonu. Tradycyjne badanie próbek wykonanych z danego zarobu pozwala określić różnorodakie charakterystyki mechaniczne uzyskanego fibrobetonu, ale nie daje informacji o równomierności ułożenia włókien w wykonanym pełnowymiarowym elemencie [11, 12]. Zastosowanie nieniszczących technik badawczych pozwala rozwiązać ten problem. Według autorów szybka, tania a jednocześnie wiarygodna kontrola jakości wykonanych elementów fibrobetonowych stanowi warunek ich szerokiego stosowania w budownictwie.

Biorąc pod uwagę wymienione fakty autorzy zaplanowali program badawczy z użyciem dwóch nieniszczących metod badawczych: metodę wykorzystującą fale ultradźwiękowe oraz metodę wykorzystującą indukcję elektromagnetyczną. Obie metody są od lat stosowane w diagnostyce materiałów i konstrukcji budowlanych. Ich pierwotnym przeznaczeniem było badanie ułożenia tradycyjnego stalowego zbrojenia prętowego w elementach żelbetonowych (metoda indukcji elektromagnetycznej) oraz określanie dynamicznego modułu sprężystości oraz spękania elementów betonowych (metoda ultradźwiękowa). Aparaty do przeprowadzania badań obiema metodami są dostępne komercyjnie i dość szeroko stosowane w budownictwie. Niekonwencjonalne zastosowanie takich aparatów pozwoliłoby na prowadzenie szybkiej diagnostyki elementów fibrobetonowych. Prowadzenie pomiarów dwiema metodami równocześnie umożliwiłoby jednoznaczną ocenę zarówno równomierności rozłożenia włókien stalowych w objętości fibrobetonu, jak i identyfikację zawartości włókien. Proponowane podejście pozwala wykorzystać istniejące zasoby aparaturowe oraz doświadczenie kadry w ich obsłudze przy jednoczesnym uzyskaniu zupełnie nowych danych tak pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Dużą zaletą proponowanej metody jest jej mobilność. Metody badań nieniszczących, które dotychczas okazały się bardzo skuteczne w precyzyjnym określaniu ułożenia włókien stalowych, takie jak tomograf komputerowy [13] czy inne rodzaje aparatów przeznaczonych do wykonywania zdjęć w oparciu o promienie X są duże, bardzo drogie i całkowicie stacjonarne. Dodatkowo wymagają specjalnie ekranowanych pomieszczeń do ich poprawnego użytkowania.

2.1. Materiały i elementy próbne

Matrycę kompozytu użytego w badaniach zaprojektowano na bazie odpadowego piasku płukanego będącego produktem odpadowym procesu hydroklasyfikacji. Założono konsystencję matrycy V4 zgodnie z normą PN-EN 206-1 [14], co przy stosunkowo dużej płynności mieszanki umożliwiło wprowadzenie włókien stalowych do zawartości 2,5 % (objętościowo) bez znaczącej utraty urabialności. Zastosowano cement portlandzki szybkowiązący CEMII 42,5R A-V, a stosunek wodno-cementowy wyniósł 0,38. Jako dodatek uszczelniający zastosowano pyły krzemionkowe w ilości 5 % w stosunku do masy użytego cementu. W celu uzyskania zakładanej konsystencji oraz poprawy urabialności mieszanki zastosowano dodatek upłynniający w postaci superplastyfikatora Betocrete 406 (FM). Jako zbrojenie rozproszone zastosowano włókna stalowe o długości 50 mm i średnicy 0,8 mm, zakończone haczykowato i o prostym kształcie (rys. 2), które mają Aprobatację Techniczną ITB. Wykonano łącznie 72 elementy próbne,

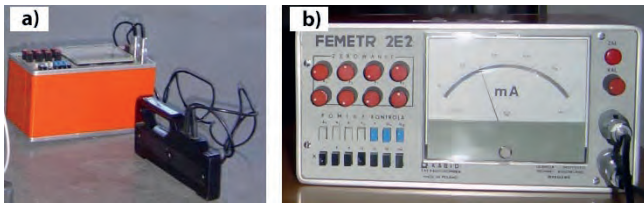


Rys. 2. Włókna stalowe użyte w badaniach
Fig. 2. Steel fibre used during the research program

po 12 elementów każdego rodzaju, różniącego się zawartością włókien stalowych: 0,0 %, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %. Elementy próbne charakteryzowały się sześciennym kształtem o boku 100 mm. Elementy rozformowano po 24 godzinach i przeniesiono do dojrzewalni, gdzie przebywały przez następne 27 dni w temperaturze 20 °C pod lustrem wody. Po tym czasie elementy wysuszono do stałej masy i poddano badaniom.



Rys. 3. Defektoskop ultradźwiękowy użyty w badaniach
Fig. 3. Ultrasonic defect detector used in the research



Rys. 4. Detektor zbrojenia Femetr 2E2 użyty w badaniach: a) widok ogólny urządzenia, b) panel nastawczy wraz ze wskaźnikiem natężenia prądu elektrycznego

Fig. 4. Femetr 2E2 reinforcement detector used in the tests: a) general view of the device, b) adjustment panel with an electric current indicator

2.2. Aparatura użyta do badań

Do przeprowadzenia programu badawczego wykorzystano dwie metody badań nieniszczących. Badania ciągłości struktury wewnętrznej kompozytu przeprowadzono przy użyciu defektoskopu ultradźwiękowego Epoch 4 z głowicami 100 kHz (rys. 3).

Badania przeprowadzono metodą bezpośrednią, umieszczając głowice aparatu na przeciwległych ścianach próbki. Drugą nieniszczącą metodą badawczą, która pozwoliła na określenie zawartości włókien stalowych w próbce kompozytu była metoda wykorzystująca zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Aparat użyty w badaniach to detektor zbrojenia Femetr typu 2E2 (rys. 4).

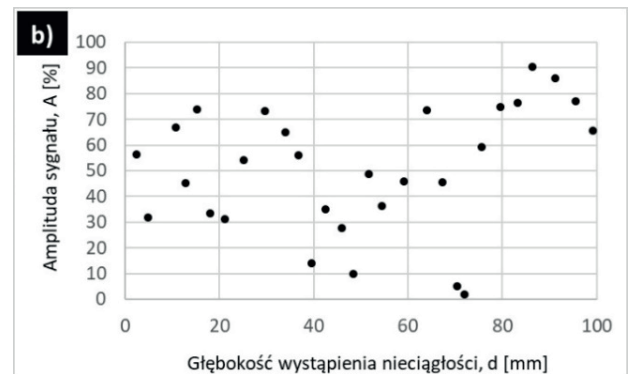
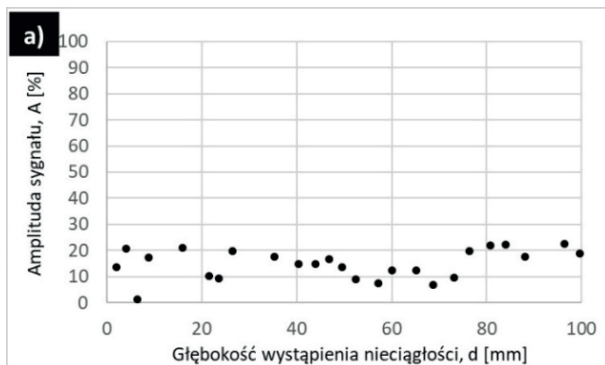
3. Wyniki badań

Pomiary wykonane defektoskopem ultradźwiękowym pozwoliły na ustalenie nieciągłości materiału w objętości betonu. Na rys. 5 przedstawiono głębokości wystąpienia nieciągłości w zależności od amplitudy sygnału. Między wynikami przedstawionymi na rys. 5a i 5b widać dużą różnicę w uzyskanych amplitudach. Dla próbek bez włókien waha się ona na poziomie od 0 % do 20 %, a dla próbek z fibrobetonów z zawartością włókien 2,5 % waha się od 0 % do 90 %.

Kolejnie uśredniono amplitudy sygnału dla próbek uzyskując dla każdej próbki jeden wynik (przykładowe dane dla dwóch próbek z rys. 5 dałyby więc dwie wartości), co umożliwiło określenie zależności średniej amplitudy sygnału dla badanych kompozytów od zawartości włókien stalowych (rys. 6). Po wykonaniu pomiarów natężenia prądu indukowanego w zbrojeniu rozproszonym betonu (przy użyciu detektora zbrojenia, który jest bezpośrednio zależny od zawartości zbrojenia), ustalono korelację między natężeniem prądu I oraz średnią amplitudą sygnału A (rys. 7).

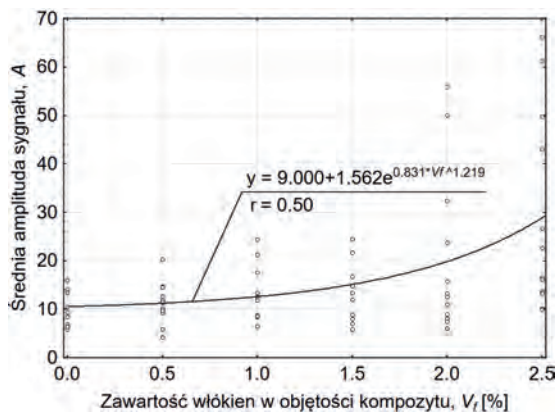
4. Dyskusja

Przeprowadzone badania wykazały silny związek między amplitudą sygnału ultradźwiękowego defektoskopu a zawar-



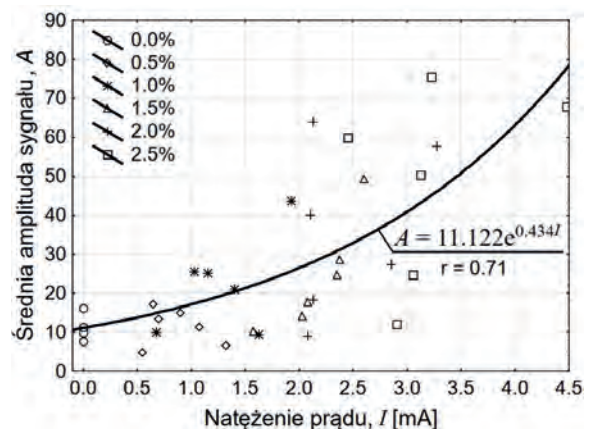
Rys. 5. Przykładowe wystąpienia nieciągłości w postaci pików amplitudy sygnału ultradźwiękowego dla: a) próbki o zawartości włókien stalowych 0 %, b) dla próbki o zawartości włókien stalowych 2,5 %

Fig. 5. Examples of discontinuities in the form of ultrasonic signal amplitude peaks for: a) a sample with a steel fiber content of 0 %, b) a sample with a steel fiber content of 2.5 %



Rys. 6. Średnie amplitudy sygnałów uzyskanych z defektoskopu ultradźwiękowego w zależności od zawartości włókien stalowych w kompozycie

Fig. 6. Average amplitudes of signals obtained from the ultrasonic defect detector depending on the content of steel fibers in the composite



Rys. 7. Średnie amplitudy sygnałów uzyskanych z defektoskopu ultradźwiękowego w korelacji z natężeniem prądu wskazanym przez detektor zbrojenia Femetr 2E2

Fig. 7. Average amplitudes of signals obtained from the ultrasonic defect detector in correlation with the current indicated by the Femetr 2E2 reinforcement detector

tością zbrojenia rozproszonego w betonie (rys. 5 a i b). Zależność amplitudy sygnału od zawartości włókien stalowych (rys. 6) wykazała, że dla zawartości włókien od 0 % do ok. 1,5 % amplituda rośnie liniowo-proporcjonalnie, natomiast powyżej 1,5 % włókien następuje większa tendencja wzrostowa, co powoduje zakrzywienie krzywej ku górze. Tendencję tę potwierdzają badania zawartości zbrojenia dla każdej próbki oddzielnie za pomocą detektora zbrojenia Femetr 2E2 (rys. 7). Tutaj tendencja wzrostowa jest jeszcze wyraźniejsza niż na rys. 6. Powodem znacznego wzrostu amplitudy sygnału dla kompozytów o zawartości zbrojenia rozproszonego powyżej 1,5 % jest silne napowietrzenie mieszanki w procesie mieszania składników. Efekt ten opisał Maidl wprowadzając graniczne zawartości zbrojenia dla kruszyw o różnym uziarnieniu maksymalnym [8]. Konsekwencją wprowadzenia zbyt dużej zawartości zbrojenia jest wystąpienie nieciągłości materiałowych w jego strukturze w postaci pęcherzy powietrza i kawern.

W literaturze opisane jest także zjawisko tworzenia się tzw. jeży w postaci splątanych włókien, w szczególności dotyczy to włókien o dużym stosunku długości do średnicy [15]. Przebadywany materiał wykonany był na bazie takiej samej matrycy, jednak aparatura nieniszcząca wykazała zmiany ciągłości jego struktury w szczególności dla dużych zawartości włókien. W praktyce materiał kompozytu zbrojonego włóknami stalowymi może charakteryzować się bardzo odmiennymi cechami, wpływającymi na wystąpienie wad materiałowych. Konsystencja i urabialność mieszanki, grubość i jednorodność uziarnienia, zawartość dodatków poprawiających szczelność, takich jak pyły krzemionkowe lub popioły lotne. Metody nieniszczące wykorzystane w badaniach opisanych w artykule pozwalają na stosunkowo szybką ocenę zarówno zawartości zbrojenia, jak i wystąpienia defektów materiałowych. Pozwala to już na etapie projektowania betonu, (przy połączeniu obu metod badawczych), określenie górnej granicy zawartości zbrojenia, przy której nie pogarsza ono struktury wewnętrznej kompozytu.

5. Wnioski

Przeprowadzony program badawczy oraz związana z nim analiza pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Stosując łącznie obie metody można wykryć obecność włókien w objętości fibrobetonu i ocenić wystąpienie nieciągłości materiału w jego objętości.
- Dalsze kierunki badań powinny skupić się na możliwości dokładnej oceny zawartości włókien w fibrobetonie oraz marginesu błędów dla tej metody badań.
- Zaproponowana metodyka jednoczesnego stosowania obu metod nie pozwala wykryć pojedynczych włókien.
- Metoda oparta na technice ultradźwiękowej nadaje się do natychmiastowego wykrywania obszarów z wyraźną nierównomiernością rozłożenia włókien w objętości betonu (zbyt niskie lub zbyt wysokie lokalne zagęszczenie układu włókien).

Bibliografia

1. Watari T., Cao Z., Serrenho A.C., Cullen J., *Growing role of concrete in sand and climate crises*, "IScience", Vol. 26, No. 5, 2023, DOI: 10.1016/J.ISCI.2023.106782.
2. Szufficki M. (red.) et al., *Bilans zasobów złóż kopalnin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r.*, Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2021.
3. Destrée X., Mandl J., *Steel fibre only reinforced concrete in free suspended elevated slabs: Case studies, design assisted by testing route, comparison to the latest SFRC standard documents*, [In:] *Proceedings of the International FIB Symposium 2008 – Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for Our Society*, 2008.
4. Wang X., Fan F., Lai J., Xie Y., *Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining*, "Structures", Vol. 34, 2021, 1080–1098, DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.07.086.
5. Behbahani H.P., Nematollahi B., Farasatpour M., *Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement : A Review*, in: *International Conference on Structural Engineering and Construction Management (ICSECM)*, 2011.
6. Komárková T., Láník J., Anton O., *Evaluation of Selected Physicomechanical Properties of SFRC according to Different Standards*, "Advances in Materials Science and Engineering", Vol. 2018, No. 1, 2018, DOI: 10.1155/2018/7098065.
7. Katzer J., Kobaka J., *Influence of fine aggregate grading on properties of cement composite*, "Silicates Industriels", Vol. 74, 2009, 9–14.
8. Maidl B.R., *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Ernst & Sohn, 1995.
9. Katzer J., Kobaka J., *The assessment of fine aggregate pit deposits for concrete production*, "Kuwait Journal of Science and Engineering", Vol. 33, No. 2, 2006, 165–174.
10. Gettu R., Gardner D.R., Saldívar H., Barragán B.E., *Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens*, "Materials and Structures", Vol. 38, 2005, 31–37, DOI: 10.1007/BF02480572.
11. Katzer J., Kobaka J., *Combined non-destructive testing approach to waste fine aggregate cement composites*, "Science and Engineering of Composite Materials", Vol. 16, No. 4, 2009, DOI: 10.1515/SECM.2009.16.4.277.
12. Kobaka J., Katzer J., Ponikiewski T., *A combined electromagnetic induction and radar-based test for quality control of steel fibre reinforced concrete*, "Materials", Vol. 12, No. 21, 2019, DOI: 10.3390/ma12213507.
13. Ponikiewski T., Katzer J., Bugdol M., Rudzki M., *Steel fibre spacing in self-compacting concrete precast walls by X-ray computed tomography*, "Materials and Structures", Vol. 48, 2015, 3863–3874, DOI: 10.1617/s11527-014-0444-y.
14. EN 206:2013, *Concrete. Specification, performance, production and conformity*, 2013.
15. Liao L., Zhao J., Zhang F., Li S., Wang Z., *Experimental study on compressive properties of SFRC under high strain rate with different fiber content and aspect ratio*, "Construction and Building Materials", Vol. 261, 2020, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119906.

Harnessing Two Measurement Techniques to Assess the Internal Structure of SFRC

Abstract: The article describes the examination of the internal structure of concrete reinforced with steel fibers using two non-destructive measurement techniques: a method using ultrasonic waves and a method using electromagnetic induction. The ultrasonic method allowed for the determination of material defects resulting from the non-uniform distribution of fibers in the space of the tested sample bodies. The method using electromagnetic induction allowed for the identification of fiber content. Research has shown that fiber concrete, characterized by a relatively high content of steel fibers (above 1.5 % by volume), is susceptible to the formation of material discontinuities in its internal structure. This phenomenon occurs to a very small extent in concrete with steel fiber content below 1.5 %.

Keywords: ultrasound, electromagnetic induction, concrete, fibers, fiber reinforced concrete

dr inż. Janusz Kobaka

janusz.kobaka@uwm.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3596-3187



Od 07/2021 post-doc w projekcie NCN „Wydobycie regolitu na powierzchni Księżyca w warunkach obniżonej grawitacji”. 03.2021–05.2021 adiunkt na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. 10.2018–02.2021 adiunkt na Politechnice Koszalińskiej. 10.2007–09.2018 kierownik Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej. 03.2004–09.2007 specjalista inżynierijno-techniczny w Laboratorium Techniki Budowlanej PK..

dr hab. inż. Jacek Katzer, prof. UWM

jacek.katzer@uwm.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4049-5330



W swoich badaniach specjalizuje się w technologii betonu i fibrobetonu. Od 2017 r. zajmuje się również gruntami księżycowymi i symulantami gruntów księżycowych. Posiada doświadczenie jako badacz betonu, projektant mieszanek, kontroler jakości produkcji betonów (zarówno towarowych, jak i prefabrykatów) oraz wykładowca technologii betonu. Obecnie pracuje na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie kierując Centrum Inżynierii Lądowej. W trakcie swojej kariery naukowej związany był także z Politechniką Koszalińską (Polska), Uniwersytetem w Sheffield (Wielka Brytania), Politechniką w Brnie (Czechy) oraz VSB – Politechniką Ostrawską (Czechy).

dr hab. inż. Machi Zawidzki

zawidzki@piap.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0001-8695-4400



Od 10/2022 kierownik ZBI – Dział Wsparcia Badań Aplikacyjnych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Od 2/2017 adiunkt w Zakładzie Technologii Inteligentnych w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. 7/2020 habilitacja w dziedzinie Nauk Technicznych, w dyscyplinie – Informatyka. Tytuł autoreferatu: Zastosowania metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji architektonicznych Systemów Ekstremalnie Modularnych. W latach 10/2007 – 09/2010 studia doktoranckie na Uniwersytecie Ritsumeikan w Japonii. Temat rozprawy: Application of Computational Intelligence to engineering design problems in Architecture – firmitatis, utilitatis, venustatis.