

Dynamiczne właściwości fibrobetonu wytworzonego na bazie piasków odpadowych

Janusz Kobaka^{1,2}, Jacek Katzer¹, 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 przedstawiono wyniki badań nieniszczących fibrobetonu z dodatkiem włókien stalowych wytworzonego na bazie piasków odpadowych. Belki fibrobetonowe o różnej zawartości włókien stalowych poddane były dwóm rodzajom drgań własnych: drganiom skrętnym i giętnym. Na podstawie przeprowadzonych testów i analizy Fouriera, wyznaczono częstotliwości tych drgań. Posłużyły one do określania dynamicznego modułu sprężystości, dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego oraz dynamicznego współczynnika Poissona. Następnie określono wpływ włókien stalowych na te parametry. Badania wykazały, że dodatek włókien stalowych wpływa na zwiększenie dynamicznego modułu sprężystości oraz dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego do pewnej krytycznej zawartości włókien, po przekroczeniu której, następuje zmniejszenie wartości tych modułów, ponadto włókna stalowe nie wpływają na wartości dynamicznego współczynnika Poissona.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, fibrobeton, właściwości dynamiczne, moduł sprężystości, odkształcenie postaciowe, współczynnik Poissona

1. Wprowadzenie

Fibrobetony stają się coraz bardziej popularne w budownictwie, stanowiąc często alternatywę dla betonu zwykłego przy wykonywaniu takich elementów jak: posadzki przemysłowe, nawierzchnie drogowe lub lotniskowe, elementy cienkościenne, elementy narażone na oddziaływania dynamiczne, obudowy tuneli, szybów górniczych, warstwy naprawcze konstrukcji żelbetonowych wykonywane metodą natryskiwania (torkretowania) i in. [1–3]. Fibrobetony charakteryzują się większą wytrzymałością na rozciąganie [4, 5], większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu [6], większą wytrzymałością na siły ścinające [7, 8], odpornością na obciążenia cykliczne [9] oraz trwałością [4, 10] niż beton zwykły. Wśród wielu rodzajów materiałów, z których wykonuje się włókna przeznaczone do fibrobetonu, stalowe zbrojenie rozproszone znalazło najszersze zastosowanie [11] i wykorzystuje się je do wykonywania najbardziej odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych. W celu uzyskania właściwości mechanicznych fibrobetonów o wysokich parametrach, zawartość zbrojenia rozproszonego powinna być

stosunkowo duża. W takim wypadku stosowane jest kruszywo o mniejszym uziarnieniu niż w betonie zwykłym, często poniżej 2 mm, aby uzyskać równomierny rozkład zbrojenia rozproszonego w objętości kompozytu [12]. Zapotrzebowanie na takie kruszywo daje możliwość zastosowania zalegającego na hałdach piasku kwarcowego, będącym produktem odpadowym procesu hydroklasyfikacji pospółek regionu Pomorza. Hydroklasyfikacja polega na wypłukiwaniu frakcji piaskowych z pospółki w celu uzyskania frakcji zwirowych. Wykorzystanie piasków odpadowych do produkcji fibrobetonów jest alternatywą dla kosztownej rekultywacji terenów dawnych i obecnych kopalń kruszyw naturalnych.

Skuteczne stosowanie fibrobetonów do konstrukcji narażonych na obciążenia dynamiczne wymaga kompleksowego rozpoznania ich podstawowych cech dynamicznych, takich jak na przykład częstotliwość drgań własnych czy dynamiczny moduł sprężystości [13]. Właściwości współczynników dynamicznych, takich jak: dynamiczny moduł sprężystości, dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego lub dynamiczny współczynnik Poissona różnią się od ich statycznych odpowiedników wyznaczanych na próbkach poddanych obciążeniom mając wartości około 10 % większe [14]. Biorąc pod uwagę powyższe fakty przeprowadzono program badań mający na celu określenie wybranych właściwości dynamicznych fibrobetonów.

Autor korespondujący:

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

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.02.2024 r., przyjęty do druku 18.11.2024 r.



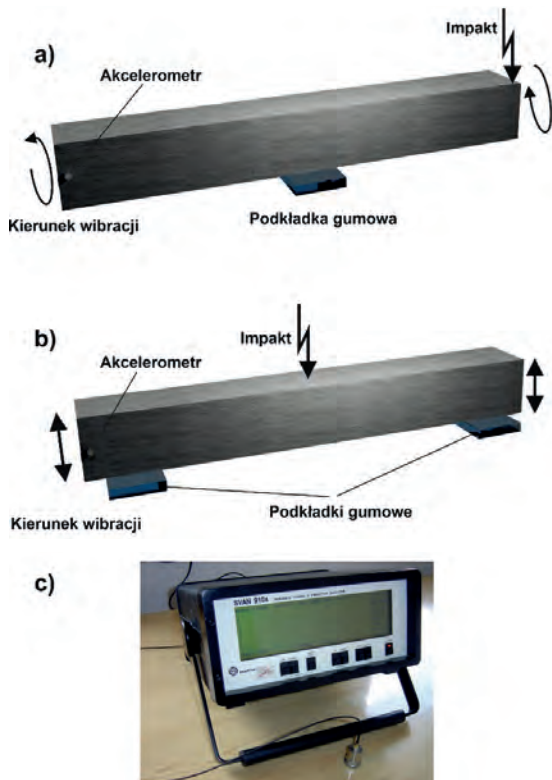
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

2. Metodyka badań

Badania dynamicznego modułu sprężystości oraz dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego oznaczano na podstawie pomiarów drgań własnych belek przyrządowych

o wymiarach 10 cm × 10 cm × 40 cm wykonanych z fibrobetonu. Wykonano belki o różnej zawartości włókien stalowych (mierzonej jako procent objętości): 0 %, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 % oraz 2,5 %. Zastosowano włókna stalowe o haczykowatym kształcie, średnicy 0,8 mm i długości 50 mm. Wykonano sześć belek z każdego rodzaju, łącznie otrzymując 36 belek. Jako składniki fibrobetonu podane na 1 m³ użyto: superplastyfikator 16,8 kg, woda 160 dm³, cement 420 kg, piasek płukany 1570 kg, pyły krzemionkowe 21 kg.

Badania drgań własnych wykonano układając belki na podstawie z gumy. Po wymuszeniu drgań przez uderzenie stalową kulką, sygnał z czujnika przekazywany jest do urządzenia monitorującego SVAN 910A (Rys. 1). W urządzeniu monitorującym, w oparciu o analizę Fouriera, wyznaczona jest częstotliwość drgań własnych badanych elementów. Drgania giętne posłużyły do wyznaczenia dynamicznego modułu sprężystości, natomiast drgania skrętne do wyznaczenia dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego.



Rys. 1. Stanowisko do badań drgań własnych: a) drgania skrętne, b) drgania giętne, c) urządzenie monitorujące SVAN 910A użyte do badań drgań własnych

Fig. 1. Stand for testing natural vibrations: a) torsional vibrations, b) bending vibrations, c) SVAN 910A monitoring device used for natural vibration tests

Dynamiczny moduł sprężystości fibrobetonu wyznaczono według następującej zależności [14]:

$$E_d = \frac{f_{flex}^2}{(2k+1)^2} \cdot \frac{ml^3}{I} \cdot \frac{64}{\pi^2} \cdot T, \quad (1)$$

w której współczynnik korekcyjny T jest wyznaczany z następującej zależności:

$$T = \frac{1}{2} + \frac{(2n+1)^2}{8} \pi^2 \frac{I}{Al^2} \left[1 + \frac{2(1+\nu)}{k} \right] + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{(2n+1)^2}{8} \pi^2 \frac{I}{Al^2} \left[1 + \frac{2(1+\nu)}{k} \right] + \frac{(2n+1)^4}{64} \pi^4 \frac{I^2}{A^2 l^4} \left[1 - \frac{2(1+\nu)}{k} \right]^2}, \quad (2)$$

gdzie: A – pole przekroju, I – moment bezwładności przekroju, k – składowa harmoniczna drgań, tutaj $k = 1$, l – długość belki, n – współczynnik korygujący, tutaj $n = 1$, ν – współczynnik Poissona.

Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego fibrobetonu wyznaczono według następującej zależności [14]:

$$G_d = \frac{f_{tors}^2}{k_i^2} \cdot \frac{ml}{A} \cdot 4 \cdot R, \quad (3)$$

w której R jest współczynnikiem zależnym od wymiarów przekroju poprzecznego belki b i h :

$$R = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \frac{b}{h} - 2,52 \left(\frac{b}{h} \right)^2 + 0,21 \left(\frac{b}{h} \right)^6}, \quad (4)$$

k_i – składową harmoniczną drgań (dla pierwszej składowej $k_i = 1$) [-], f_{tors} – częstotliwością drgań własnych [Hz], A – polem przekroju poprzecznego belki [mm²], b – szerokością przekroju belki [mm], h – wysokością przekroju belki [mm], m – masą belki [kg], l – długością belki [mm].

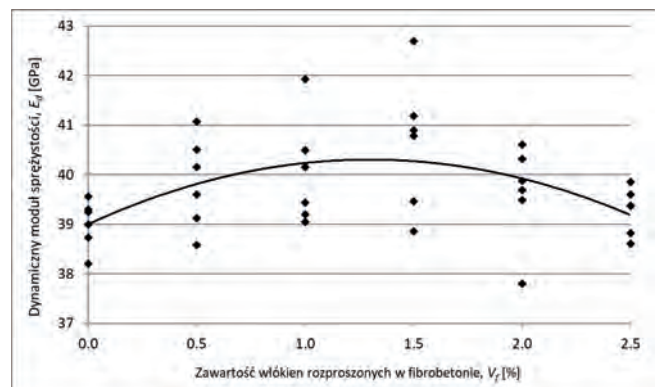
Dynamiczny współczynnik Poissona fibrobetonu wyznaczono według następującej zależności [15]:

$$\nu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1. \quad (5)$$

3. Wyniki badań

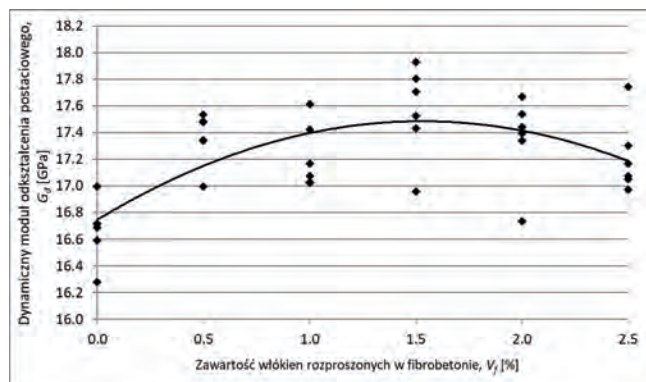
Wyniki badań dynamicznego modułu sprężystości E_d wykazały nieznaczną tendencję wzrostową tej właściwości wraz ze wzrostem zawartości włókien (Rys. 2). Przy braku włókien w betonie (tzw. matrycy fibrobetonowej) wartość E_d wyniosła około 39 GPa wzrastając stopniowo do wartości powyżej 40 GPa przy zawartościach włókien 1,0 % i 1,5 %. Powyżej zawartości włókien 1,0 % i 1,5 % nastąpił spadek wartości dynamicznego modułu sprężystości do wartości 39,9 GPa dla 2,0 % włókien i 39,2 GPa dla zawartości włókien 2,5 %.

Podobny do dynamicznego modułu sprężystości E_d jest przebieg krzywej dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego G_d . Najmniejszą wartością G_d , około 16,7 GPa, wykazała się

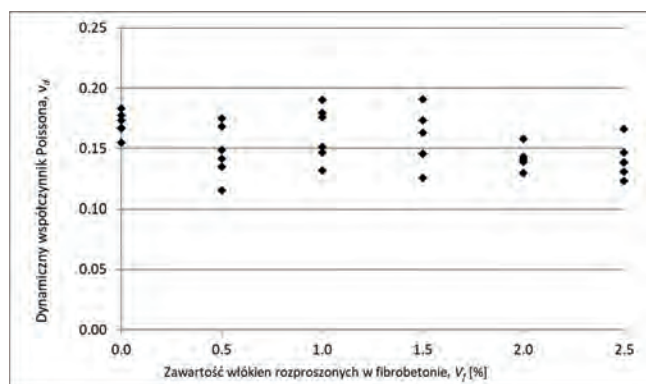


Rys. 2. Zależność dynamicznego modułu sprężystości E_d od zawartości włókien stalowych V_f

Fig. 2. Dependence of the dynamic modulus of elasticity E_d on the content of steel fibers V_f



Rys. 3. Wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego G_d w zależności od zawartości włókien stalowych V_f
 Fig. 3. Values of the dynamic modulus of shear deformation G_d depending on the steel fiber content V_f



Rys. 4. Dynamiczny współczynnik Poissona ν_d dla różnych zawartości włókien stalowych V_f
 Fig. 4. Dynamic Poisson's ratio ν_d for different steel fiber contents V_f

matryca betonowa, po czym wraz ze wzrostem zawartości włókien stalowych w fibrobetonie, następował stopniowy wzrost wartości G_d do wartości maksymalnej. Wartość ta wyniosła ok. 17,5 GPa przy zawartości włókien 1,5 %. Po przekroczeniu zawartości włókien 1,5 % nastąpił spadek wartości G_d . Przy zawartości włókien 2,0 % było to około 17,4 GPa, natomiast przy zawartości włókien 2,5 % 17,2 GPa.

Wartości wyznaczonego dynamicznego współczynnika Poissona ν_d nie wykazują wyraźnej tendencji wzrostowej lub spadkowej w zależności od zawartości włókien w fibrobetonie, jednak przeprowadzona jednoczynnikowa analiza wariancji, pozwalająca na porównanie średnich wartości dla grup wyników wykazała, że wartość prawdopodobieństwa p wyniosła 0,039 i była mniejsza od poziomu istotności wynoszącego 0,05. Oznacza to, że analizowane wartości średnich dla sześciu grup wyników różnią się od siebie w sposób statystycznie istotny. Średnia wartość dynamicznego współczynnika Poissona ν_d wyniosła dla wszystkich sześciu grup pomiarów 0,15.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Dodatek włókien stalowych wpływa na zwiększenie dynamicznego modułu sprężystości oraz dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego, jednak powyżej 1,5 % następuje jego zmniejszenie, co spowodowane jest napowietrzeniem mieszanki betonowej podczas mieszania przez zbyt dużą zawartość włókien.
- Włókna stalowe nie wpływają na wartości dynamicznego współczynnika Poissona.

Przeprowadzone badania nieniszczące betonu zbrojonego włóknami stalowymi przy użyciu piasku odpadowego dostarczyły cennych informacji na temat jego właściwości dynamicznych. Analiza drgań skrętnych i zginających w połączeniu z analizą Fouriera pozwoliła na wyznaczenie kluczowych parametrów, takich jak dynamiczny moduł sprężystości (moduł Younga), dynamiczny moduł ścinania (moduł sztywności) i dynamiczny współczynnik Poissona. Badanie wpływu zróżnicowanej zawartości włókien stalowych na te parametry pogłębia naszą wiedzę na temat zachowania fibrobetonu i stwarza możliwości optymalizacji jego charakterystyk mechanicznych w rzeczywistych zastosowaniach konstrukcyjnych. Wyniki rzucają światło na skuteczność włókien stalowych w kształtowaniu tych właściwości dynamicznych, oferując implikacje dla optymalizacji fibrobetonu w zastosowaniach budowlanych. Zaobserwowany wpływ włókien stalowych na te właściwości dostarcza cennych informacji dla inżynierów i badaczy dążących do poprawy właściwości mechanicznych SFRC, szczególnie przy wykorzystaniu materiałów odpadowych do jego produkcji. Uzyskane wyniki podkreślają znaczenie badań nieniszczących w ocenie właściwości użytkowych fibrobetonu wykonanego z piasku odpadowego.

Podsumowując, badania nieniszczące fibrobetonu opartego o piasek odpadowy pozwoliły uzyskać istotne informacje na temat dynamicznego zachowania materiału. Analiza drgań skrętnych i zginających, uzupełniona analizą Fouriera, ułatwiła wyznaczenie kluczowych parametrów dynamicznych. W badaniu zbadano także wpływ włókien stalowych na te właściwości, co umożliwiło kompleksowe zrozumienie, w jaki sposób różna zawartość włókien wpływa na dynamiczny moduł sprężystości, dynamiczny moduł ścinania i dynamiczny współczynnik Poissona. Odkrycia te wnoszą wkład w poszerzenie wiedzy na temat kompozytów cementowych i stanowią podstawę do dalszych prac uzupełniających luki w wiedzy. Badanie wpływu włókien stalowych na te właściwości dynamiczne dostarcza praktycznych spostrzeżeń umożliwiających optymalizację receptur fibrobetonów, szczególnie w przypadku wykorzystania materiałów odpadowych w praktyce budowlanej.

Dalsze kierunki badań powinny być rozszerzone o wpływ składu matrycy fibrobetonowej oraz różnych rodzajów i typów włókien (włókna o innym kształcie i wykonane z innych materiałów) na właściwości dynamiczne fibrobetonów. Również różnice między właściwościami dynamicznymi i statycznymi powinny zostać wyraźnie określone, jak również ich korelacja z innymi właściwościami mechanicznymi fibrobetonów.

Bibliografia

1. Zych T., *Współczesny fibrobeton – możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i form architektonicznych*, „Czasopismo Techniczne, Architektura”, Vol. 107, No. 18, 2010, 371–386.
2. Mu R., Mei S., Wang X., Chen X., Zhao Q., Qing L., Chen J., Fan C., *Mechanical properties of a 3D-printed SFRC beam with steel fiber distribution adaptive to tensile stress*, “Material Letters”, Vol. 349, 2023, DOI: 10.1016/J.MATLET.2023.134776.
3. Wang S., Madan A., Zhao C., Seong Huang E., Su T., Chiew B.J., Yang Y., *Experimental study on strain of SFRC tunnel lining segments using a comprehensive embedded optical fiber sensing system*, “Measurement”, Vol. 223, 2023, DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113791.
4. Li B., Chi Y., Xu L., Li C., Shi Y., *Cyclic tensile behavior of SFRC: Experimental research and analytical model*, “Construction and Building Materials”, Vol. 190, 2018, 1236–1250, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.140.

5. Kobaka J., Katzer J., Ponikiewski T., *A combined electro-magnetic induction and radar-based test for quality control of steel fibre reinforced concrete*, "Materials", Vol. 12, No. 21, 2019, DOI: 10.3390/ma12213507.
6. Safdar Raza S., Ali B., Noman M., Fahad M., Mohamed Elhadi K., *Mechanical properties, flexural behavior, and chloride permeability of high-performance steel fiber-reinforced concrete (SFRC) modified with rice husk ash and micro-silica*, "Construction and Building Materials", Vol. 359, 2022, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129520.
7. Alshboul O., Almasabha G., Al-Shboul K.F., Shehadeh A., *A comparative study of shear strength prediction models for SFRC deep beams without stirrups using Machine learning algorithms*, "Structures", Vol. 55, 2023, 97–111, DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2023.06.026.
8. Chen C., Akiyama M., Lim S., Kondo S., Hosono Y., Lai Y., Aoki K., *Shear performance of centrifugal forming hollow circular SFRC piles: Feasibility study of replacing stirrups with steel fibers*, "Construction and Building Materials", Vol. 409, 2023, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134140.
9. Xiang D., Liu S., Li Y., Liu Y., *Improvement of flexural and cyclic performance of bridge deck slabs by utilizing steel fiber reinforced concrete (SFRC)*, "Construction and Building Materials", Vol. 329, 2022, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127184.
10. Marcos-Meson V., Fischer G., Edvardsen C., Skovhus T.L., Michel A., *Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review*, "Construction and Building Materials", Vol. 200, 2019, 490–501, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.051.
11. Zheng Y., Lv X., Hu S., Zhuo J., Wan C., Liu J., *Mechanical properties and durability of steel fiber reinforced concrete: A review*, "Journal of Building Engineering", Vol. 82, 2023, DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.108025.
12. Maidl B., *Steel Fibre Reinforced Concrete*, Ernst & Sohn, 1995.
13. Katzer J., *Chosen Dynamic Features of Fiber Reinforced Concrete Beams*, [In:] Life Cycle Assessment Behaviour and Properties of Concrete and Concrete Structures International Conference, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2004.
14. Weiler B., Grosse C., *Elastic constants – their dynamic measurement and calculation*. Elastische Parameter – ihre dynamische Messung und Berechnung., Otto Graf Journal, 1995.
15. Neville A.M., *Właściwości betonu*, 2010.

Dynamic Properties of SFRC Made on the Basis of Waste Sand

Abstract: The article presents the results of non-destructive testing of steel fiber reinforced concrete (SFRC) based on waste sand. Fiber concrete beams with different steel fiber content were subjected to two types of free vibrations: torsional and flexural vibrations. Based on the tests and Fourier analysis, the frequencies of these vibrations were determined. They were used to determine the dynamic modulus of elasticity (Young's modulus), the dynamic shear modulus (modulus of rigidity) and the dynamic Poisson's ratio. In the next stage, the influence of steel fibers on these parameters was determined. The tests have shown that the addition of steel fibers increases the value of dynamic modulus of elasticity and the dynamic shear modulus up to a certain critical fiber content, beyond which the values of these moduli decrease; moreover, steel fibers do not affect the value of the dynamic Poisson's ratio.

Keywords: NDT, FRC, dynamic properties, modulus of elasticity, shear modulus, Poisson's ratio

dr inż. Janusz Kobaka

janusz.kobaka@uwm.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3596-3187

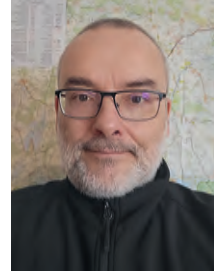
Od 07/2021 post-doc w projekcie NCN „Wydobycie regolitu na powierzchni Księżyca w warunkach obniżonej grawitacji”. 03.2021–05.2021 adiunkt na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. 10.2018–02.2021 adiunkt na Politechnice Koszalińskiej. 10.2007–09.2018 kierownik Laboratorium Techniki Budowlanej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

