

## Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych – w języku polskim

## Spis treści

Spis treści.....	1
Podstawowe określenia i ich definicje.....	2
1. Dane personalne.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	4
4.2. Publikacje powiązane tematycznie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego..	4
4.3. Omówienie celu naukowego przedłożonych publikacji oraz najważniejszych wyników.....	5
a) Wprowadzenie.....	5
b) Przedmiot, cel i zakres cyklu publikacji powiązanych tematycznie.....	8
c) Omówienie osiągniętych wyników.....	9
d) Podsumowanie.....	25
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.....	26
5.1. Działalność naukowo – badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora.....	26
5.2. Działalność naukowo – badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nie wchodząca w skład głównego osiągnięcia naukowego.....	28
6. Podsumowanie działalności naukowo – badawczej, dydaktycznej, organizacyjnej i inżynierskiej po uzyskaniu stopnia doktora.....	32
6.1. Działalność naukowo – badawcza.....	32
6.2. Działalność dydaktyczna.....	36
6.3. Działalność organizacyjna.....	37
6.3. Działalność inżynierska.....	39

## Podstawowe określenia i ich definicje

Delaminacja wzmocnienia	Utrata przyczepności (rozwarstwienie) pomiędzy kompozytem a betonem lub pomiędzy warstwami kompozytu. Delaminacja następuje poprzez utratę spójności pomiędzy poszczególnymi warstwami składowymi wzmocnienia.
FRCM	<i>Fibre Reinforced Cementitious Matrix</i> – matryca (zaprawa) cementowa (mineralna) wzmocniona włóknami w postaci siatek kompozytowych.
FRP	<i>Fibre Reinforced Polymers</i> – tworzywo sztuczne wykonane z polimeru wzmocnionego włóknami, m.in. węglowymi CFRP ( <i>Carbon</i> ), szklanymi GFRP ( <i>Glass</i> ), aramidowymi AFRP ( <i>Aramid</i> ) lub bazaltowymi BFRP ( <i>Basalt</i> ).
Kompozyt	Materiał utworzony z dwóch lub większej liczby różnych materiałów, w taki sposób, że ma właściwości wyjątkowe i/lub lepsze w stosunku do komponentów wziętych osobno lub wynikających z prostego sumowania ich właściwości. Komponenty są celowo połączone i możliwe do wyodrębnienia metodami mechanicznymi, rozłożone są w kontrolowany sposób w celu nadania optymalnych właściwości nowemu materiałowi. Składnikiem ciągłym kompozytu jest matryca lub osnowa, wypełniona np. włóknami.
Laminat kompozytowy	Gotowy element w postaci taśmy lub kształtki, w którym wszystkie wiązki włókien kompozytowych ułożone są jednokierunkowo, równoległe do długości elementu i zatopione w matrycy, najczęściej polimerowej.
Mata kompozytowa	Jedno lub dwukierunkowy arkusz z włókien kompozytowych tkany na osnowie poliestrowej, w którym poszczególne wiązki włókien przylegają do siebie.
Matryca lub osnowa	Materiał wypełniający kompozyt, może być metaliczna, ceramiczna lub polimerowa. Matryca spaja włókna w laminacie, przenosi obciążenia na włókna, chroni włókna przed zniszczeniem na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych. Łączy również kompozyt ze wzmacnianym podłożem.
PBO-FRCM	System wzmocnień, w którym matryca (zaprawa) cementowa (mineralna) wzmocniona jest siatką z włókien PBO.
Siatka kompozytowa	Dwukierunkowo tkany arkusz z włókien kompozytowych, w którym poszczególne wiązki włókien nie przylegają do siebie.
Włókna PBO	<i>p-Phenylene BenzobisOxazole</i> – syntetyczne włókna wytwarzane z polimeru z grupy poliamidów, a dokładniej aramidów, z którego przędzie się sztuczne włókna. Włókna PBO posiadają dwukrotnie większą wytrzymałość na rozciąganie i dwukrotnie większy moduł sprężystości przy rozciąganiu niż włókna Kevlar. Włókna PBO odznaczają się bardzo wysoką odpornością na działanie ognia w porównaniu do innych włókien polimerowych.
Zaprawa mineralna	Materiał powstający z połączenia spoiwa hydraulicznego otrzymywanego z wypalonych i zmielonych surowców mineralnych (najczęściej skał osadowych), w tym przypadku cementu i dodatków wypełniających (np. włókien). W materiałach tych, po dodaniu wody, zachodzą reakcje chemiczne, w wyniku których następuje proces wiązania i twardnienia.

## **1. Dane personalne**

Dr inż. Tomasz Trapko

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

## **2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe**

1994 r.: technik budownictwa w specjalności budownictwo, Technikum Budowlane w Zespole Szkół Budowlano-Elektrycznych im. Jana III Sobieskiego w Świdnicy. Tytuł pracy dyplomowej: „Obiekty obronne i warowne na Dolnym Śląsku”. Promotor: mgr inż. Krystyna Kowalonek.

1 lipca 1999 r.: magister inżynier na kierunku budownictwo, w specjalności inżynieria budowlana, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Tytuł pracy magisterskiej: „Projekty techniczne konstrukcji wsporczych z betonu dla napowietrznej linii energetycznej o napięciu 30 kV”. Promotor: dr inż. Aleksy Łodo.

16 lutego 2005 r.: doktor nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo w specjalności konstrukcje betonowe, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Tytuł pracy doktorskiej: „Nośność żelbetowych słupów wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych”. Promotor: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński. Recenzenci: prof. dr hab. inż. Maria E. Kamińska z Politechniki Łódzkiej i prof. dr hab. inż. Jerzy Hoła z Politechniki Wrocławskiej. Praca została wyróżniona przez Radę Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

## **3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych**

Od 1 października 2000 r. doktorant na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, w Zakładzie Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

Od 16 lutego 2005 r. asystent w Zakładzie Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

Od 1 lutego 2006 r. do chwili obecnej adiunkt, początkowo w Zakładzie Konstrukcji Betonowych, później w Katedrze Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, a obecnie w Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)**

**4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego**

Podstawą do ubieganie się o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest cykl publikacji powiązanych tematycznie pt.:

**„Wzmacnianie wybranych elementów z betonu siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej”**

**4.2. Publikacje powiązane tematycznie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

Tabela 1. Zestawienie publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Lp.	Autor, tytuł, czasopismo, data wydania, tom, strony	Punktacja MNiSW	Impact factor
1	<b>Trapko T.:</b> Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements. <i>Materials &amp; Design</i> . 2013, vol. 44, s. 382-391.	A <sub>(2013)</sub> = 35	IF <sub>(2013)</sub> = 3,171
2	<b>Trapko T.:</b> Stress-strain model for FRCM confined concrete elements. <i>Composites. Part B: Engineering</i> . 2013, vol. 45, nr 1, s. 1351-1359.	A <sub>(2013)</sub> = 45	IF <sub>(2013)</sub> = 2,602
3	<b>Trapko T.:</b> The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements. <i>Composites. Part B: Engineering</i> . 2013, vol. 54, s. 138-145.	A <sub>(2013)</sub> = 45	IF <sub>(2013)</sub> = 2,602
4	<b>Trapko T.:</b> Odkształcalność ściskanych elementów betonowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRCM. Referat z 59. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZiTb Lublin – Krynica 2013. <i>Budownictwo i Architektura</i> . 2013, vol. 12, nr 1, s. 163-170.	B <sub>(2013)</sub> = 3	-
5	<b>Trapko T.:</b> Behaviour of fibre reinforced cementitious matrix strengthened concrete columns under eccentric compression loading. <i>Materials &amp; Design</i> . 2014, vol. 54, s. 947-954.	A <sub>(2014)</sub> = 35	IF <sub>(2014)</sub> = 3,501
6	<b>Trapko T.:</b> Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns. <i>Construction &amp; Building Materials</i> . 2014, vol. 61, s. 97-105.	A <sub>(2014)</sub> = 40	IF <sub>(2014)</sub> = 2,296
7	<b>Trapko T.:</b> Confined concrete elements with PBO-FRCM composites. <i>Construction &amp; Building Materials</i> . 2014, vol. 73, s. 332-338.	A <sub>(2014)</sub> = 40	IF <sub>(2014)</sub> = 2,296
<b>Razem:</b>		<b>243</b>	<b>16,468</b>

Wszystkie prace wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie są samodzielne, udział 100%.

#### 4.3. Omówienie celu naukowego przedłożonych publikacji oraz najważniejszych wyników

##### a) Wprowadzenie

Przyjęło się nazywać wzmocnianiem konstrukcji budowlanych zarówno klasyczne działania mające na celu wzmocnienie elementów konstrukcyjnych, jak również działania mające na celu ich naprawę. Z pierwszym przypadkiem mamy do czynienia wtedy, gdy zachodzi konieczność podniesienia nośności elementów konstrukcyjnych, ze względu na zwiększenie wartości obciążeń, w stosunku do założeń projektowych. Z kolei działania mające na celu doprowadzenie uszkodzonych elementów konstrukcyjnych do stanu pierwotnej nośności, oznaczają ich naprawę. Kompatybilność obydwu działań spowodowała sklasyfikowanie ich pod wspólnym terminem – wzmocniania konstrukcji.

Tematyka wzmocniania konstrukcji betonowych za pomocą materiałów kompozytowych FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) jest przedmiotem zainteresowania, od ponad dwóch dekad, wielu ośrodków naukowych na świecie. Od kilkunastu lat tematyka ta jest również obecna na kilku polskich uczelniach. Świadczy o tym rosnąca liczba publikacji, pojawiających się w monografiach, renomowanych czasopismach oraz na naukowych konferencjach tematycznych. Pierwsze prace laboratoryjne, aplikacje inżynierskie i modele obliczeniowe dotyczyły głównie zginanych elementów belkowych. Wykorzystywano w nich materiały na bazie włókien węglowych CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*), szklanych GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymers*) i aramidowych AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Polymers*). W kolejnych latach działania poznawcze rozszerzyły się na: wzmocnienia zewnętrzne i wewnętrzne elementów zginanych, ścinanych, skręcanych i ściskanych, wzmocnienia wstępnie sprężonymi kompozytami FRP, wzmocnienia FRP konstrukcji obciążonych sejsmicznie, konstrukcje hybrydowe i wiele innych. Jednocześnie wraz z postępem prac badawczych opracowywane są algorytmy, wytyczne i przepisy normowe do projektowania tego typu wzmocnień.

Wzmocnianiem, ściskanych elementów betonowych, za pomocą materiałów kompozytowych zajmuję się od roku 2000. Technologia wzmocnień FRP była wtedy nowością w Polsce, a jedną z grup naukowych zajmującą się tą tematyką był zespół z Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Zagadnienie wzmocniania ściskanych elementów betonowych było wtedy mało rozpoznane na świecie, a w naszym kraju było wręcz nieobecne. W przeciągu ostatnich kilkunastu lat temat wzmocniania ściskanych elementów betonowych stał się żywo obecny i aktualny wśród badaczy na świecie, choć w Polsce ciągle jeszcze pomijany w pracach naukowych.

W pracy doktorskiej zajmowałem się możliwością wykorzystania taśm z włókien kompozytowych, jako zewnętrznego wzmocnienia podłużnego słupów żelbetowych. W badaniach zastosowałem system taśm z włókien węglowych CFRP, w których żywica epoksydowa stanowi matrycę dla włókien w laminacie, jak również spoiwo łączące taśmę z betonem. W pracach doświadczalnych analizowałem wpływ intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP na pracę modelowych słupów żelbetowych (w skali ~1:5), poddanych doraźnemu ścisaniu osiowemu. Ponadto wykonałem badania słupów żelbetowych w skali naturalnej, poddanych doraźnemu ścisaniu osiowemu oraz mimośrodowemu, dla których zastosowałem jedną, maksymalnie możliwą intensywność wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP, wynikającą z założenia jednowarstwowego wzmocnienia. W elementach tych zastosowałem dwa typy wzmocnienia poprzecznego – w postaci opasek (obejm) z maty CFRP lub w postaci jednokrotnego całkowitego owinięcia matą CFRP. Z kolei w analizach teoretycznych zaproponowałem zależność na określanie nośności osiowo ścisanych, krępych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami z włókien węglowych. W podsumowaniu pracy doktorskiej zdefiniowałem, według mnie najistotniejsze, kierunki dalszych badań, znacznie poszerzające tematykę ujętą w doktoracie. Szczegółowy opis moich osiągnięć naukowo-badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora został podany w punkcie 5.1. autoreferatu.

Po uzyskaniu stopnia doktora rozszerzyłem badania nad wpływem intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP na nośność i odkształcalność żelbetowych słupów, poddanych doraźnemu obciążeniu osiowemu oraz mimośrodowemu. Badania te wykonywałem na słupach w skali naturalnej, dla których zastosowałem trzy intensywności wzmocnienia podłużnego i jednokrotne, całkowite uzwojenie matą CFRP. Podjąłem także badania mające na celu wyznaczenie i ocenę parametrów reologicznych betonu wzmocnionego za pomocą taśm i mat z włókien węglowych CFRP. Zająłem się również nowymi badaniami nad wpływem obciążeń wielokrotnie zmiennych na pracę elementów betonowych i żelbetowych wzmocnionych materiałami kompozytami. Ponadto zainteresowałem się tematyką oceny stanu technicznego, diagnostyki przyczyn uszkodzeń i napraw konstrukcji betonowych. Obecnie, wspólnie z mgr inż. Dorotą Urbańską doktorantką w Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, prowadzę badania belek żelbetowych wzmocnionych na ścinanie za pomocą materiałów kompozytowych. Celem tych badań jest ocena udziału wzmocnienia kompozytowego w nośności na ścinanie, w zależności od sposobu jego skonstruowania i zakotwienia. Szczegółowy opis moich osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora został podany w punkcie 5.2. autoreferatu.

Nowym obszarem moich zainteresowań po uzyskaniu stopnia doktora są badania odporności wzmocnień kompozytowych na wpływ wysokich temperatur. Szczególne zainteresowanie tą tematyką pojawiło się w czasie, gdy realizowałem dwa projekty badawcze (Komitetu Badań Na-

ukowych oraz Prorektora ds. Badań Naukowych i Współpracy z Gospodarką Politechniki Wrocławskiej) dotyczące badania cech reologicznych elementów betonowych wzmocnianych zewnętrznym zbrojeniem kompozytowym CFRP.

Jak wiadomo w systemach FRP, bez względu na rodzaj zastosowanych włókien, decydująca o trwałości i skuteczności wzmocnienia jest żywica (matryca) epoksydowa. Zarówno w systemie wykorzystującym włókna węglowe – CFRP, jak i szklane – GFRP oraz aramidowe – AFRP, połączenie kompozytu z betonem odbywa się za pomocą żywic epoksydowych. Jak wykazano w wielu badaniach, również w moich własnych [18, 23 w Z6], parametrem decydującym o efektywności wzmocnienia jest temperatura w jakiej użytkowany jest wzmocniony element. Graniczną temperaturą dla systemów FRP jest temperatura zeszklenia żywicy epoksydowej  $T_g$ , po przekroczeniu której spoiwo traci swoje właściwości. Pod wpływem wzrastającej temperatury uzyskuje się nawet poprawę właściwości plastycznych elementów [23, 34 w Z6], ale po przekroczeniu temperatury zeszklenia w żywicy następują zmiany strukturalne, które są już nieodwracalne, nawet po jej wystudzeniu. Wartości temperatur zeszklenia żywic  $T_g$  są podawane przez producentów w opracowywanych przez nich kartach technicznych systemów FRP, i jak zaobserwowałem z biegiem lat w kolejnych wydaniach tych kart, zmniejszają się one o kolejnych kilka stopni. Wyeliminowanie tego problemu jest możliwe dwojako, po pierwsze poprzez stosowanie zabezpieczeń termicznych na wzmocnionych elementach, co również jest przedmiotem zainteresowania w literaturze, lub po drugie poprzez wyeliminowanie żywicy, jako spoiwa łączącego kompozyt z betonem.

Ja zająłem się tym drugim rozwiązaniem, a mianowicie wyeliminowaniem żywicy, jako spoiwa łączącego kompozyt z betonem. Stąd zainteresowanie systemem FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*), który powstał w celu wyeliminowania głównej wady żywicy epoksydowej, którą jest słaba kompatybilność termiczna z betonem. W przypadku systemu FRCM mamy do czynienia z inną filozofią wzmocnienia niż w systemach FRP. W *Fibre Reinforced Polymers* gotowy laminat, w którym włókna zatopione są w żywicy epoksydowej, dokleja się do betonu, również za pomocą żywicy epoksydowej. W systemie tym laminat może być także wykonywany bezpośrednio podczas aplikacji wzmocnienia, poprzez jednoczesne nasączenie i doklejenie do betonu żywicą epoksydową wiotkich mat kompozytowych. Stąd też nazwa *Fibre Reinforced Polymers* – tworzywo sztuczne wzmocnione włóknami. Z kolei w *Fibre Reinforced Cementitious Matrix* to zaprawa mineralna, którą pokrywany jest wzmocniany element jest wzmocniana włóknami. Zaprawa, dzięki swojej strukturze łączy się z włóknami i zapewnia przyczepność kompozytu do betonu. Należy pamiętać, że nie mamy tutaj do czynienia ze sztywnym laminatem, jak przy wzmocnieniach FRP, a z warstwą zaprawy mineralnej wypełnionej włóknami. Z powodu ziarnistości zaprawy nie jest ona w stanie odpowiednio wypełnić włókna i zapewnić, tak dobrej ich przyczepności do betonu, jak ma to miejsce w przypadku żywic epoksydowych. Dlatego

zastąpiono maty siatkami, które posiadają odpowiednie oczka i zaprawa może przeniknąć do poszczególnych włókien zapewniając ich dobre połączenie z betonem.

## **b) Przedmiot, cel i zakres cyklu publikacji powiązanych tematycznie**

Przedmiotem przedłożonego cyklu publikacji powiązanych tematycznie są rezultaty doświadczalnych i teoretycznych badań wybranych elementów z betonu, wzmocnionych **siatką z włókien PBO** (*p-Phenylene BenzobisOxazole*), potocznie nazywaną **siatką PBO**, połączoną z betonem za pomocą zaprawy mineralnej. System ten oznacza się w literaturze symbolem **PBO-FRCM**. Badaniami objąłem elementy betonowe i żelbetowe, modelowe i w skali naturalnej. Prace doświadczalne zrealizowałem w czterech etapach, w których elementy, o różnym sposobie skonstruowania wzmocnienia poprzecznego i podłużnego, poddawałem doraźnemu, monotonicznemu ścisaniu osiowemu oraz mimośrodowemu. Programy badań w kolejnych etapach, opracowywałem czerpiąc z doświadczeń, które zdobyłem realizując wcześniejsze etapy badań.

Celami naukowymi przeprowadzonych badań i analiz były:

1. ocena możliwości wykorzystania siatki z włókien PBO na zaprawie mineralnej do wzmocnienia ściskanych elementów betonowych, zarówno w neutralnej temperaturze, za jaką uważa się temperaturę +20°C, jak i warunkach wysokich temperatur,
2. ocena wpływu: intensywności wzmocnienia poprzecznego siatką z włókien PBO (liczby warstw wzmocnienia), sposobu ukształtowania wzmocnienia poprzecznego siatką z włókien PBO (długości zakładu końcowego), jednoczesnego wzmocnienia podłużnego i poprzecznego siatką z włókien PBO na nośność i odkształcalność ściskanych osiowo oraz mimośrodowo elementów betonowych i żelbetowych,
3. odpowiedź na pytanie, czy podłużne i poprzeczne wzmocnienie siatką z włókien PBO współdziała z betonem i stalą w przenoszeniu naprężeń ściskających i rozciągających w ściskanych elementach betonowych i żelbetowych,
4. stworzenie opisu matematycznego zachowania się ściskanych elementów betonowych wzmocnionych zewnętrznym płaszczem z siatki z włókien PBO.

Na każdym etapie badań dokonywałem przeglądu stanu wiedzy. Odnosił się on głównie do opisu zachowania elementów wzmocnionych w systemach FRP, ponieważ w literaturze brakuje prac dotyczących wzmocnienia, ściskanych elementów betonowych, za pomocą siatki PBO. Wraz ze zdobywaną przez mnie wiedzą, zaczęły pojawiać się również pierwsze zagraniczne publikacje, których autorzy zajmują się podobną tematyką, choć ciągle jest to zaledwie kilka artykułów.

W cyklu siedmiu publikacji powiązanych tematycznie [32-37, 41 w Z6] pt.: „**Wzmocnianie wybranych elementów z betonu siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej**” zaprezentowałem badania doświadczalne, weryfikujące założenia teoretyczne oraz obrazujące rzeczywiste zachowanie się ściskanych elementów z betonu wzmocnianych w systemie PBO-FRCM, pod



działaniem doraźnego, monotonicznego obciążenia osiowego oraz mimośrodowego. Wykonałem analizy doświadczalne wpływu wspomnianych w celach naukowych parametrów na nośność i odkształcalność elementów badawczych. Na podstawie własnych wyników badań zaproponowałem model matematyczny do obliczania wytrzymałości betonu uzwojonego siatką PBO, a także dokonałem jego weryfikacji.

W pierwszych trzech pracach cyklu [32, 33, 34 w Z6] przedstawiałem badania i analizy porównawcze, zarówno na próbkach wzmocnionych matą CFRP, jak i siatką PBO. Badania przeprowadziłem w neutralnej temperaturze +20°C, jak również w warunkach wysokich temperatur: +40°C, +60°C, +80°C +120°C i +180°C. Praca [35 w Z6] jest efektem obserwacji poczynionych we wcześniejszych etapach badań, opisanych w pracach [32, 33 i 34 w Z6]. Skupia się ona na zagadnieniu wpływu długości i nośności zakładu końcowego kompozytu na wartość i rozkład obwodowych odkształceń granicznych. Po serii badań na próbkach betonowych postanowiłem przetestować system PBO-FRCM na słupach w skali naturalnej, które poddałem doraźnemu ścisnieniu osiowemu oraz mimośrodoowemu. Praca [36 w Z6] poświęcona jest analizie nośności granicznych i opisowi mechanizmów zniszczenia słupów. Przedstawiłem również pomiary przemieszczeń poziomych słupów, które pokazują zdolności tych elementów do plastycznych deformacji. Z kolei praca [37 w Z6] zawiera analizę odkształcalności słupów mimośrodoowo ścisnionych wzmocnionych w systemie PBO-FRCM. Praca [41 w Z6] jest podsumowaniem aktualnej wiedzy na temat wzmocnień wybranych elementów z betonu siatką PBO na zaprawie mineralnej, którą zdobyłem na podstawie badań doświadczalnych. Oceeniłem efektywność wzmocnienia oraz zachowanie się wzmocnionych elementów. Porównałem wpływ intensywności i sposobu skonstruowania wzmocnienia na efektywność pracy elementów ścisnionych. Analizy oparłem, zarówno na własnych wynikach badań, jak również na dostępnych w literaturze badaniach *Ombres'a* z University of Calabria i *Colajanni* z zespołem z University of Messina we Włoszech.

### **c) Omówienie osiągniętych wyników**

Powszechnie znane są korzyści ze skrapowania betonu zewnętrznym płaszczem CFRP. Jednak wprowadzając nowy system wzmocnień, konieczna była ocena efektywności wzmocnienia oraz porównanie zachowania się elementów owiniętych matą CFRP i siatką PBO. Korzyści, jakie mają płynąć z możliwości zastosowania systemu PBO-FRCM, wymagały przetestowania go w niekorzystnych warunkach termicznych. Jednak, aby poznać materiał z jakim miałem do czynienia w pierwszej kolejności oceniłem wpływ liczby warstw wzmocnienia poprzecznego matą CFRP i siatką PBO, bez ekspozycji próbek na wysokie temperatury. Następnie, elementy walcowe ( $\phi 113 \times 300$  mm) z jedną warstwą wzmocnienia poprzecznego matą CFRP i siatką PBO poddałem, przed próbą niszczącą, działaniu wysokich temperatur: +60°C, +120°C i +180°C, a samo badanie odbyło się po wystudzeniu próbek (Rys. 1 i 2).

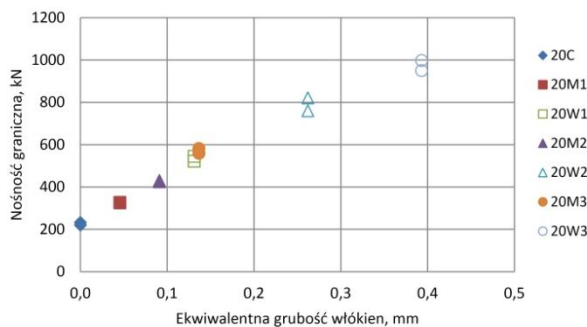


Rys. 1. Element wzmocniony jedną warstwą maty CFRP, na stanowisku badawczym [32 w Z6]



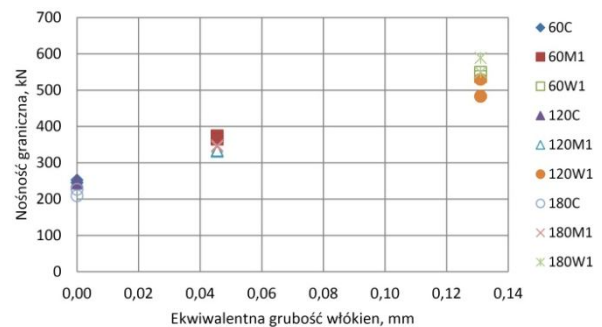
Rys. 2. Element wzmocniony jedną warstwą siatki PBO, na stanowisku badawczym [32 w Z6]

Zgodnie z oczekiwaniami, system CFRP dał zauważalne efekty, wpływu liczby warstw maty opasującej przekrój, na wzrost nośności (Rys. 3). Grubość płaszcza kompozytowego oraz rodzaj zastosowanych włókien wpływają na pomierzone wartości nośności granicznych. Przy zastosowaniu jednej warstwy maty CFRP uzyskałem zbliżoną wartość nośności granicznej, jak przy zastosowaniu trzech warstw siatki z włókien PBO. W przypadku elementów wystawionych, przed próbą niszczącą, na działanie wysokich temperatur: +60°C, +120°C i +180°C nie stwierdziłem zasadniczego wpływu ekspozycji, na zarejestrowane nośności (Rys. 4).



Rys. 3. Nośność graniczna elementów bez wstępnej ekspozycji na temperaturę [32 w Z6]

Oznaczenia: TWi: T – temperatura wstępnej ekspozycji, W – mata CFRP, i – liczba warstw maty  
 TMi: T – temperatura wstępnej ekspozycji, M – siatka PBO, i – liczba warstw siatki  
 TC: T – temperatura wstępnej ekspozycji, C – próbka referencyjna bez wzmocnienia



Rys. 4. Nośność graniczna elementów ze wstępnią ekspozycją na temperaturę [32 w Z6]

Tabela. 2. Parametry techniczne siatki PBO i maty CFRP [32 w Z6]

Nr	Typ włókien	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Odkształcenia przy zerwaniu	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Grubość włókien [mm]
		[MPa]	[GPa]	[%]		
1	PBO	5270 (a)/5800 (b)	270	2,15	1,56	0,0455
2	CFRP	2670 (a, c)/4300 (b, d)	238	1,80	1,76	0,1310

(a) według badań własnych; (b) według danych producenta; (c) dane dla laminatu; (d) dane dla włókien

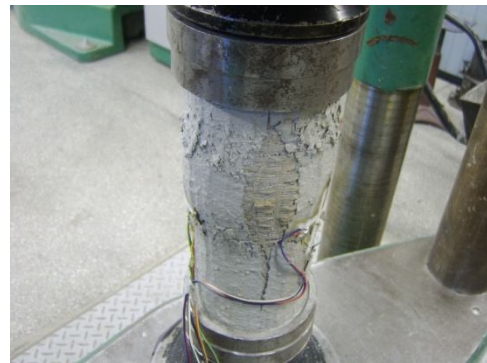
Porównanie wytrzymałości na rozciąganie włókien siatki PBO i włókien maty CFRP (Tabela 2) sugeruje, że system PBO-FRCM powinien dać jeszcze lepsze efekty wzmocnienia. Jednak, jak wykazałem na podstawie badań, większa wytrzymałość na rozciąganie siatki PBO nie przekłada się bezpośrednio na większy przyrost nośności i wartości odkształceń ściskania. Jest to spowodowane wspomnianą wcześniej ziarnistością zaprawy i wypełnieniem przez nią kompozytu oraz

przyczepnością siatki do betonu i pomiędzy jej warstwami.

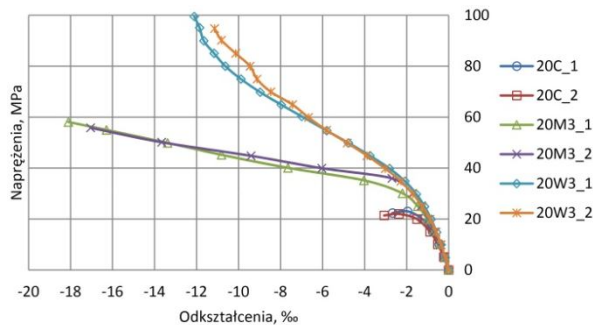
Jak wykazały badania, począwszy od mechanizmu zniszczenia (Rys. 5 i 6), poprzez charakter przebiegu ścieżek odkształceń (Rys. 7 i 8), aż do wartości granicznych nośności i odkształceń nie można porównywać ze sobą tych dwóch systemów, przy tej samej intensywności wzmocnienia (liczbie warstw). Wszystkie elementy wzmocnione matą CFRP niszczyły się w sposób gwałtowny, poprzez rozerwanie płaszcza. Zupełnie inny był mechanizm zniszczenia elementów wzmocnionych siatką PBO. Przy żadnej próbie nie nastąpiło rozerwanie włókien, a inicjacja zniszczenia następowała zawsze na zewnętrznym zakładzie.



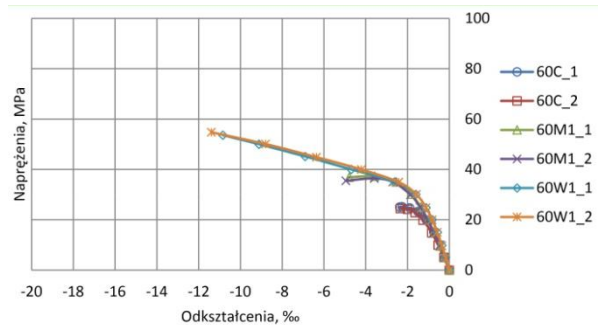
Rys. 5. Obraz zniszczenia elementu wzmocnionego jedną warstwą maty CFRP [32 w Z6]



Rys. 6. Obraz zniszczenia elementu wzmocnionego dwoma warstwami siatki PBO [32 w Z6]

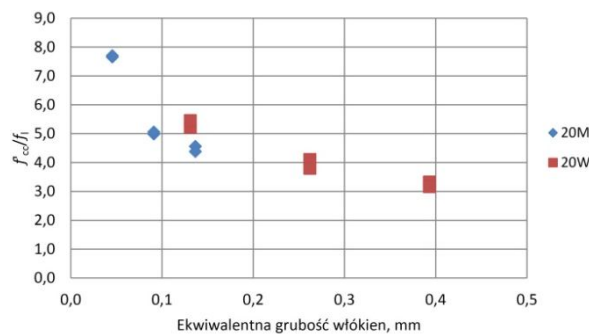


Rys. 7. Przykładowa zależność  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów bez wstępnej ekspozycji na temperaturę, wzmocnionych trzema warstwami kompozytu [32 w Z6]



Rys. 8. Przykładowa zależność  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów ze wstępną ekspozycją na temperaturę, wzmocnionych jedną warstwą kompozytu [32 w Z6]

Oznaczenia:  $TW_{i,j}$ :  $T$  – temperatura wstępnej ekspozycji,  $W$  – mata CFRP,  $i$  – liczba warstw maty,  $j$  – numer próbki  
 $TM_{i,j}$ :  $T$  – temperatura wstępnej ekspozycji,  $M$  – siatka PBO,  $i$  – liczba warstw siatki,  $j$  – numer próbki  
 $TC_j$ :  $T$  – temperatura wstępnej ekspozycji,  $C$  – próbka referencyjna bez wzmocnienia,  $j$  – numer próbki



Rys. 9. Stosunek  $f'_{cc}/f_i$  w zależności od ekwiwalentnej grubości włókien [32 w Z6]  
 Oznaczenia: 20 – temperatura badania, M – siatka PBO, W – mata CFRP

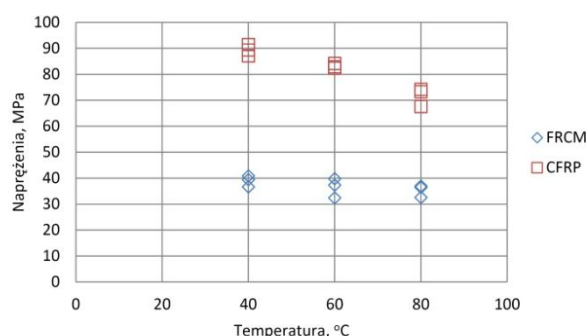
Najlepsze efekty wykorzystania zewnętrznego uzwojenia uzyskałem przy pojedynczym

wzmocnieniu (Rys. 9). Wraz ze wzrostem intensywności wzmocnienia (liczby warstw) spada efektywność wykorzystania kolejnej warstwy wzmocnienia.

Niewątpliwie system PBO-FRCM jest konkurencyjny w stosunku do systemu CFRP. Charakter pracy elementów wzmocnionych siatką PBO jest bardziej przewidywalny i możliwy do wykorzystania w bardziej skomplikowanych układach konstrukcyjnych, niż wydzielone elementy ściskane. Sygnalizowany i powolny przyrost odkształceń w obszarze obciążenia niszczącego, umożliwia redystrybucję sił wewnętrznych i włączenie się do współpracy innych, mniej wytrzymałych elementów.

Pracą inicjującą i równocześnie rozpoczynającą cykl publikacji powiązanych tematycznie, w której opisałem pierwsze wyniki doświadczeń na elementach owiniętych siatką PBO, w porównaniu z elementami uzwojonymi matą CFRP, jest artykuł w *Materials & Design* pt.: „Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements [32 w Z6]. Artykuł został opublikowany w 2013 r. i jest pierwszą na świecie publikacją pokazującą zastosowanie siatki PBO na zaprawie mineralnej, jako uzwojenia betonu. Artykuł posiada: 11 cytowań według bazy *Web of Science* (w tym 7 obcych), 12 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 7 obcych) i 15 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 9 obcych)

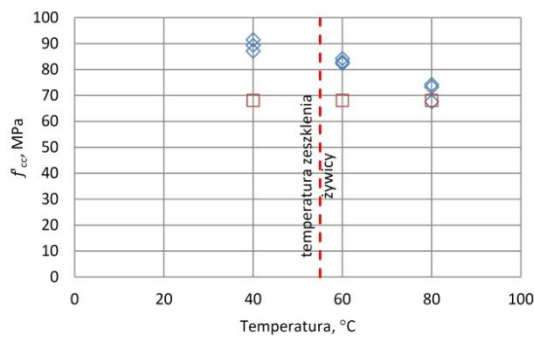
Kolejnym, naturalnym pytaniem, nasuwającym się na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań było, jak zachowują się próbki poddane działaniu wysokich temperatur i badane w tych temperaturach. Betonowe próbki walcowe ( $\phi 113 \times 300$  mm) wzmocniłem w dwóch grupach: dwoma warstwami maty CFRP lub dwoma warstwami siatki PBO. Podałem je działaniu wysokich temperatur:  $+40^\circ\text{C}$ ,  $+60^\circ\text{C}$ ,  $+80^\circ\text{C}$ , przez 24h. Bezpośrednio po wyjęciu próbek z komory klimatycznej zostały one obciążone do zniszczenia. Przed, w trakcie i po badaniu elementów dokonywałem pomiarów termowizyjnych ich temperatury.



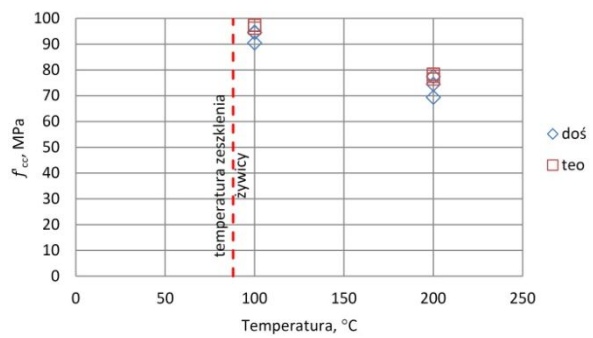
Rys. 10. Naprężenia elementów wzmocnionych w zależności od temperatury próbek [34 w Z6]

Dla próbek wzmocnionych matą CFRP, wraz ze wzrostem temperatury następuje wyraźny spadek naprężeń granicznych, z kolei dla próbek wzmocnionych siatką PBO nie widać, tak wyraźnego wpływu wysokich temperatur (Rys. 10). Na podstawie przeprowadzonej analizy badań własnych i obcych stwierdziłem, że w wysokich temperaturach, nieprzekraczających temperatury zeszklenia żywicy  $T_g$ , uplastycznia się ona nie tracąc swoich właściwości spoiwa. Wraz ze

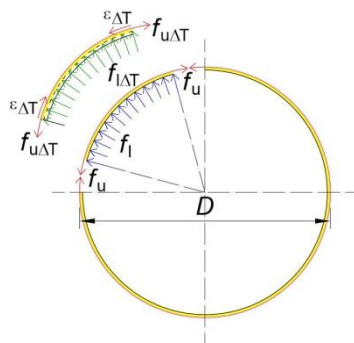
wzrostem temperatury obniża się moduł sprężystości żywicy i zmniejsza się sztywność płaszczka kompozytowego. Płaszcz CFRP staje się bardziej odkształcalny i zdolny do przenoszenia znacznie większych naprężeń (Rys. 11 i 12). Podobny efekt zauważyłem już we wcześniejszych badaniach, które były genezą cyklu prac powiązanych tematycznie [18, 23 w Z6]. Pozytywny trend zanika w temperaturach znacznie powyżej temperatury zeszklenia, kiedy następuje degradacja matrycy.



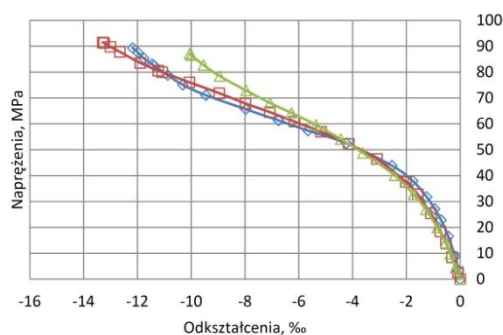
Rys. 11. Doświadczalna i teoretyczna wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f_{cc}$  w zależności od temperatury – badania własne [34 w Z6]



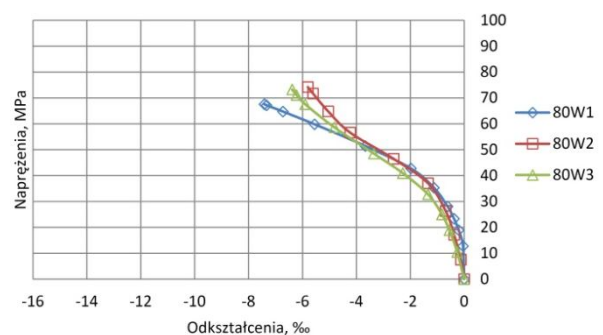
Rys. 12. Doświadczalna i teoretyczna wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f_{cc}$  w zależności od temperatury – badania Al-Salloum [34 w Z6]



Rys. 13. Dodatkowy efekt wzmocnienia [34 w Z6]



Rys. 14. Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  elementów wzmocnionych dwoma warstwami maty CFRP, badanych w temperaturze +40°C – badania własne [34 w Z6]



Rys. 15. Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  elementów wzmocnionych dwoma warstwami maty CFRP, badanych w temperaturze +80°C – badania własne [34 w Z6]

Oznaczenia: TWj: T – temperatura badania, W – mata CFRP, j – numer próbki

Włókna kompozytowe, zorientowane prostopadle do tworzącej walca, pod wpływem działania wysokiej temperatury kurczą się ( $\epsilon_{\Delta T}$ ), wywierając dodatkowy nacisk na betonowy rdzeń. Z kolei betonowy rdzeń i matryca, pod wpływem tej samej temperatury rozszerzają się wywierając dodatkowe naprężenia poprzeczne ( $f_{l\Delta T}$ ). Taka interakcja powoduje dodatkowe wzmocnienie.

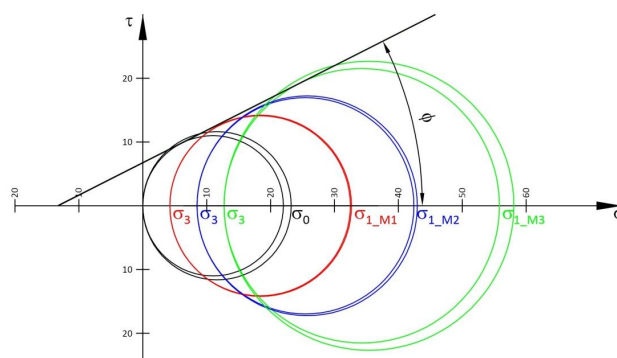
nie przekroju, które zbliżone jest do idei sprężenia poprzecznego elementu (Rys. 13).

Wzrost naprężeń oraz odkształceń ściskania, są doskonale widoczne w badaniach (Rys. 14 i 15). Jednak należy zaznaczyć, że jest to uwaga słuszna jedynie w temperaturach poniżej temperatury zeszklenia matrycy  $T < T_g$ .

Wyniki badań, próbek poddanych działaniu wysokich temperatur i badanych w tych temperaturach opisałem w artykule w *Composites. Part B: Engineering* pt.: „The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements” [34 w Z6]. Artykuł posiada: 6 cytowań według bazy *Web of Science* (w tym 3 obce), 7 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 3 obce) i 8 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 4 obce).

Skrępowanie betonu zewnętrznym uzwojeniem kompozytowym, w tym przypadku siatką PBO lub matą CFRP, połączoną z betonem za pomocą odpowiedniego spoiwa, powoduje przyrost jego wytrzymałości. Zależy on od liczby warstw wzmocnienia, wytrzymałości kompozytu na rozciąganie i kształtu przekroju poprzecznego elementu. Skrępowanie betonu poprzecznym uzwojeniem sprawia, że betonowy rdzeń znajduje się w złożonym stanie naprężenia, co przekłada się bezpośrednio na przyrost wytrzymałości betonu.

Bazując na zdobytej wiedzy zaproponowałem model obliczeniowy opierający się na teorii *Coulomba – Mohra*, w którym stan naprężeń w fazie zniszczenia można przedstawić za pomocą granicznych kół naprężeń, które mają wspólną obwiednię – krzywą graniczną. Dysponując danymi eksperymentalnymi wyznaczyłem, dla wszystkich typów elementów opisanych w pracach [32, 34 w Z6], graniczne koła naprężeń, a na podstawie ich obwiedni dobrałem odpowiednie krzywe graniczne *Mohra* i wyznaczyłem kąty  $\phi$  ich nachylenia do osi podłużnej  $\sigma$  (Rys. 16).



Rys. 16. Obwiednia granicznych kół naprężeń *Mohra* elementów 20M [33 w Z6]  
Oznaczenia: M: M – siatka PBO, i – liczba warstw siatki

Wytrzymałość betonu na ściskanie w trójosiowym stanie naprężeń  $f_{cc}(\sigma_1)$  jest sumą wytrzymałości cylindrycznej betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia  $f_{co}(\sigma_0)$  i iloczynu naprężeń poprzecznych powstających na styku betonu i uzwojenia  $f_l(\sigma_2=\sigma_3)$  dla przekroju okrągłego) oraz współczynnika wzmocnienia betonu  $k_1$ . Wartości współczynników  $k_1$  wyznaczyłem na podstawie kątów nachylenia  $\phi$  i zależności pomiędzy naprężeniami w przestrzennym stanie naprężeń w uzwojonym elemencie walcowym:

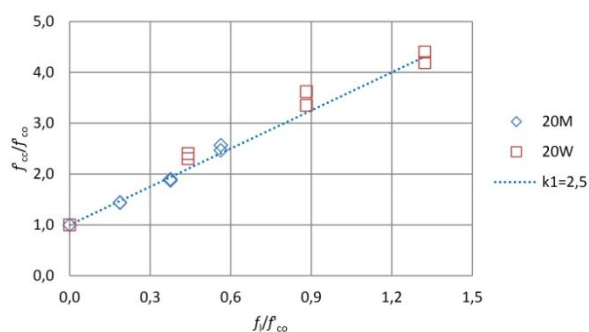
$$\sigma_1 = \sigma_0 + k_1 \sigma_3, \quad (1)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_1. \quad (2)$$

Naprężenie  $f_1$  zależą od średnicy uzwajanego rdzenia  $D$ , wytrzymałości na rozciąganie kompozytu  $f_u$  a także od grubości płaszcza kompozytowego  $t$ . Wyznaczając naprężenia poprzeczne na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego  $f_1$  (3) przyjmuje się, że maksymalne naprężenia w kompozycie osiągają wartość jego wytrzymałości na rozciąganie  $f_u$ . Jest to założenie słuszne jedynie dla okrągłych przekrojów poprzecznych, natomiast dla przekrojów wielokątnych, z wyokrąglonymi narożami, wymagane jest inne podejście, które uwzględni koncentrację naprężeń na załamaniach uzwojenia.

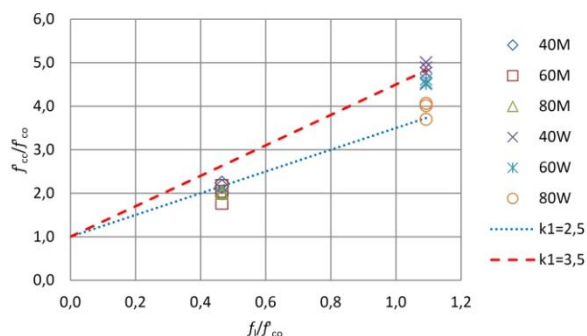
$$f_1 = \frac{2 \cdot t \cdot f_u}{D} = 2 \cdot \rho_f \cdot f_u. \quad (3)$$

Współczynniki wzmocnienia betonu  $k_1$  wyznaczyłem zarówno dla elementów bez ekspozycji na temperatury, jak również poddanych, przed próbą niszczącą, działaniu temperatur: +60°C, +120°C i +180°C oraz badanych w temperaturach: +40°C, +60°C, +80°C. Na rysunku 17 przedstawiam krzywą graniczną dla elementów badanych w temperaturze +20°C, wzmocnionych siatką PBO oraz matą CFRP. Z kolei na rysunku 18 pokazałem krzywą graniczną dla elementów poddanych działaniu wysokich temperatur i badanych zaraz po wyjęciu z komory klimatycznej. Ostatecznie zaproponowałem przyjmowanie współczynnika wzmocnienia  $k_1=2,5$  dla elementów wzmocnionych siatką PBO, bez względu na temperaturę oraz dla elementów wzmocnionych matą CFRP pracujących w warunkach normalnych +20°C, nawet jeżeli wcześniej były wystawione na działanie wysokich temperatur. Dla elementów wzmocnionych matą CFRP, poddanych ciągłemu działaniu wysokich temperatur, ale nie przekraczających znacznie temperatury zeszklenia matrycy  $T_g$ , proponuję przyjmować współczynnik wzmocnienia  $k_1=3,5$ . Porównałem wartości wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f'_{cc}$  otrzymane z obliczeń teoretycznych, dla przyjętych współczynników wzmocnienia  $k_1$ , z wartościami doświadczalnymi i współczynnik determinacji, czyli dopasowania modelu wynosi  $R^2=0,97$ .



Rys. 17. Wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f'_{cc}$  w zależności od naprężeń  $f_1$  dla elementów bez ekspozycji na wysoką temperaturę [33 w Z6]

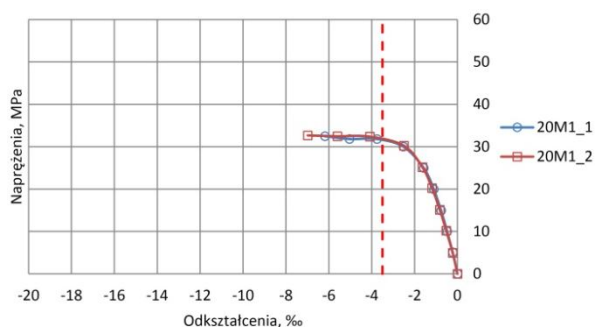
Opis oznaczeń: TM lub TW: T – temperatura badania, M – siatka PBO, W – mata CFRP



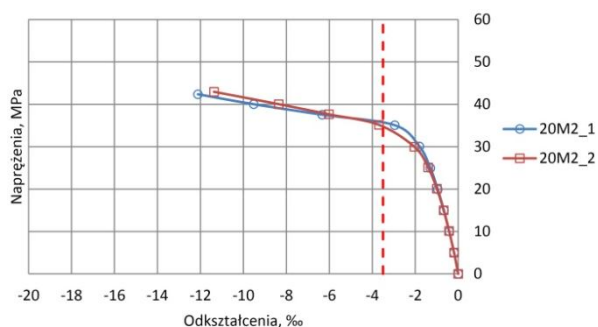
Rys. 18. Wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f'_{cc}$  w zależności od naprężeń  $f_1$  dla elementów badanych w wysokiej temperaturze [34 w Z6]

W pracy [34 w Z6] podałem zależność na wartość współczynnika nieciągłości wzmocnienia  $k_e$ , która uwzględnia możliwą nieciągłość wzmocnienia poprzecznego, wzdłuż poboczniczy elementu cylindrycznego, poprzez zastosowanie obejm (opasek) z kompozytu.

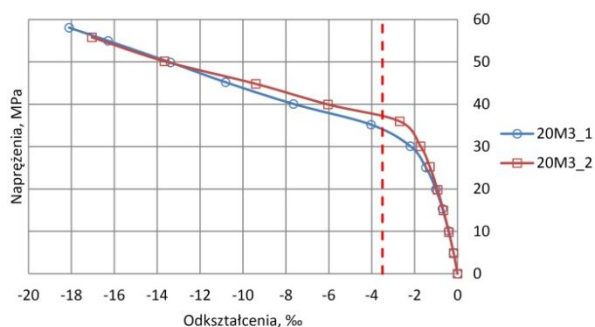
Analizując ścieżki odkształceń elementów wzmocnionych siatką PBO zauważyłem, że bez względu na intensywność wzmocnienia poprzecznego, temperaturę wstępnej ekspozycji czy temperaturę badania, zmiana przebiegu krzywej  $\sigma$ - $\varepsilon$  następuje przy odkształceniach równych około 3,5‰. Wartość tą nazwałem odkształceniami krytycznymi  $\varepsilon_k$ . Granicę odkształceń krytycznych  $\varepsilon_k$  zaznaczyłem na rysunkach 19-22 linią przerywaną. Obserwowane wzmocnienie elementu, przy wyteżeniu odpowiadającym odkształceniom krytycznym, należy tłumaczyć pełnym włączeniem się do współpracy uzwojenia kompozytowego. W pierwszej fazie stopień wykorzystania uzwojenia kompozytowego jest stosunkowo niewielki, dopiero po pierwszym etapie pracy elementu, następuje pełne włączenie się do współpracy siatki PBO (Rys. 19-21). Dla elementów ze wstępną obróbką termiczną można zauważyć, że zmiana przebiegu krzywych ściskania następuje przy odkształceniach krytycznych równych około  $\varepsilon_k=3,5‰$  i nie zależy od wartości temperatury. Odkształceniom krytycznym odpowiadają maksymalne naprężenia ściskania  $\sigma_k=\sigma_{max}$  po osiągnięciu których następuje wyczerpanie nośności (Rys. 22).



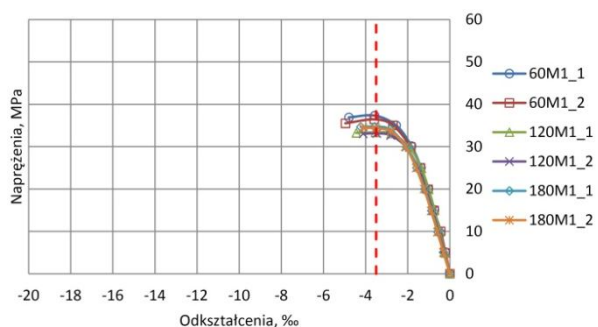
Rys. 19. Zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów 20M1 [32 w Z6]



Rys. 20. Zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów 20M1 [32 w Z6]



Rys. 21. Zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów 20M1 [32 w Z6]



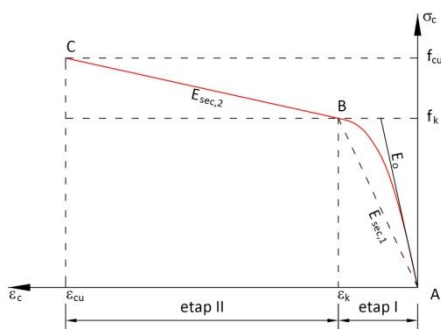
Rys. 22. Zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów 60M1, 120M1 i 180M1 [32 w Z6]

Oznaczenia:  $TMi_j$ :  $T$  – temperatura wstępnej ekspozycji,  $M$  – siatka PBO,  $i$  – liczba warstw siatki,  $j$  – numer próbki

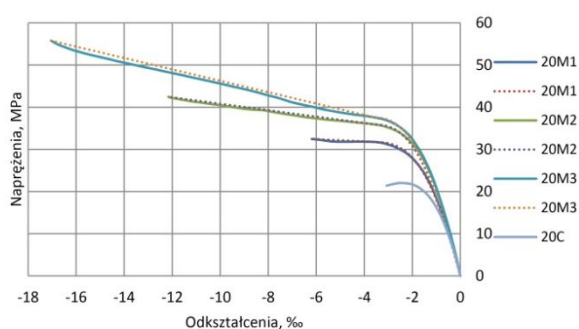
Na tej podstawie zaproponowałem opis zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów wzmocnionych siatką PBO (Rys. 23). Zaproponowany model obliczeniowy  $\sigma$ - $\varepsilon$  dla betonu uzwojonego kompozytami włóknistymi PBO opartymi na zaprawie mineralnej odpowiada wynikom uzyskanym w eksperymencie. Uzyskałem zadawalającą zgodność modelu teoretycznego zarówno w odniesieniu do



obliczania wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężeń  $f_{cc}$ , jak i prognozowania przebiegu i stanu odkształcenia. Na rysunku 24 przedstawiłem porównanie przebiegu krzywych ściskania  $\sigma$ - $\varepsilon$  wybranych próbek z badań doświadczalnych bez ekspozycji na temperaturę (linie ciągłe) w porównaniu ze ścieżkami teoretycznymi wyznaczonymi z zależności (4) i (5) (linie przerywane).



Rys. 23. Zależność  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów wzmocnionych siatką PBO [33 w Z6]



Rys. 24. Porównanie zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  elementów 20M [33 w Z6]

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c = \frac{f'_{co} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \rightarrow \text{jeżeli } 0 \leq \varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_k, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c = f'_{co} + E_{sec,2} \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \rightarrow \text{jeżeli } \varepsilon_{cc} > \varepsilon_k. \end{array} \right. \quad (5)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}, \quad (6)$$

$$r = \frac{E_o}{E_o - E_{sec,1}}, \quad (7)$$

$$E_o = 2700 \cdot (f'_{co})^{1/3}, \quad (8)$$

$$E_{sec,1} = \frac{f_k}{\varepsilon_k}, \quad (9)$$

$$E_{sec,2} = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}}. \quad (10)$$

$E_o, f'_{co}$  i  $\varepsilon_{co}$  – odpowiednio: moduł sprężystości, maksymalne naprężenia i odkształcenia betonu w jednoosiowym stanie naprężeń,

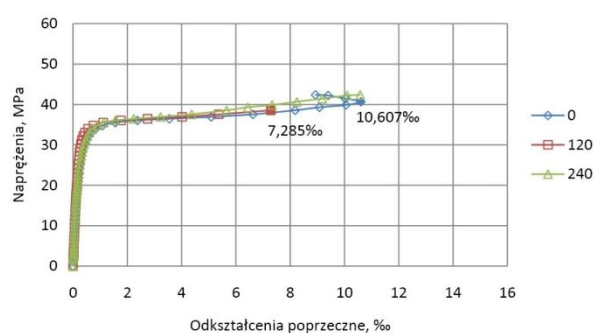
$f'_{cc}$  i  $\varepsilon_{cc}$  – odpowiednio: maksymalne naprężenia i odkształcenia betonu w trójosiowym stanie naprężeń,  
 $E_{sec}$  – sieczny moduł sprężystości betonu wzmoczonego.

Proponowany model obliczeniowy opisałem w artykule w Composites. Part B: Engineering pt.: „Stress-strain model for FRCM confined concrete elements” [33 w Z6]. Artykuł posiada: 5 cytowań według bazy *Web of Science* (w tym 1 obce), 6 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 2 obce) i 8 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 2 obce).

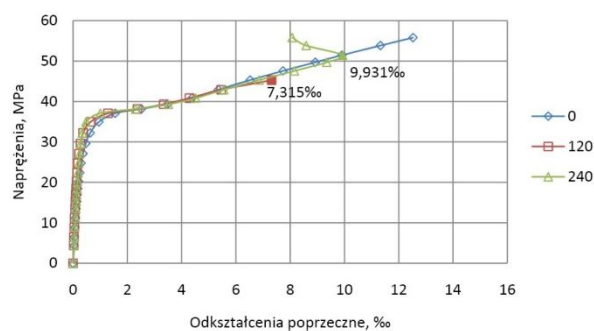
Bardzo interesującym zagadnieniem jest odkształcalność poprzeczna elementów owiniętych siatką PBO. Jak już wcześniej wspomniałem zniszczenie betonu uzwojonego zewnętrznym płaszczem PBO inicjowane jest zawsze poprzez rozwarstwienie połączenia siatki na zewnętrznym zakładzie (Rys. 6). Taki typ zniszczenia klasyfikujemy do grupy, za które odpowiedzialna jest matryca i nazywamy rozerwaniem szwu - *seam debond*.

Dzięki układowi tensometrów, co 120° po obwodzie próbek PBO-FRCM, udało mi się zareje-

strować poziom odkształceń inicjujących rozwarstwienie siatki. Na rysunkach 25 i 26 przedstawiłem odkształcenia poprzeczne elementów w funkcji naprężeń dla tensometrów w pozycjach – 0°, 120° i 240°. Zniszczenie elementów wzmocnionych siatką PBO rozpoczynało się zawsze na zewnętrznym zakładzie siatki, gdzie następował poślizg pomiędzy warstwami kompozytu i rozwarstwienie płaszcza kompozytowego. Dzięki naklejeniu tensometrów poziomych na zakładzie udało się zarejestrować moment zerwania połączenia i wartość odkształceń przy których to następuje – około 7,3‰. W elementach tych (20M2 i 20M3) zastosowałem zakład  $z=70$  mm dla których  $z/u=0,2$  ( $u$  – obwód próbki). Stosunek maksymalnych i średnich odkształceń obwodowych wynosi 0,77-0,99. Jest on najniższy dla wzmocnienia pojedynczego i wzrasta ze wzrostem liczby warstw siatki.



Rys. 25. Ścieżki odkształceń poprzecznych w funkcji obciążenia oraz obraz zniszczenia elementu 20M2\_1 [35 w Z6]

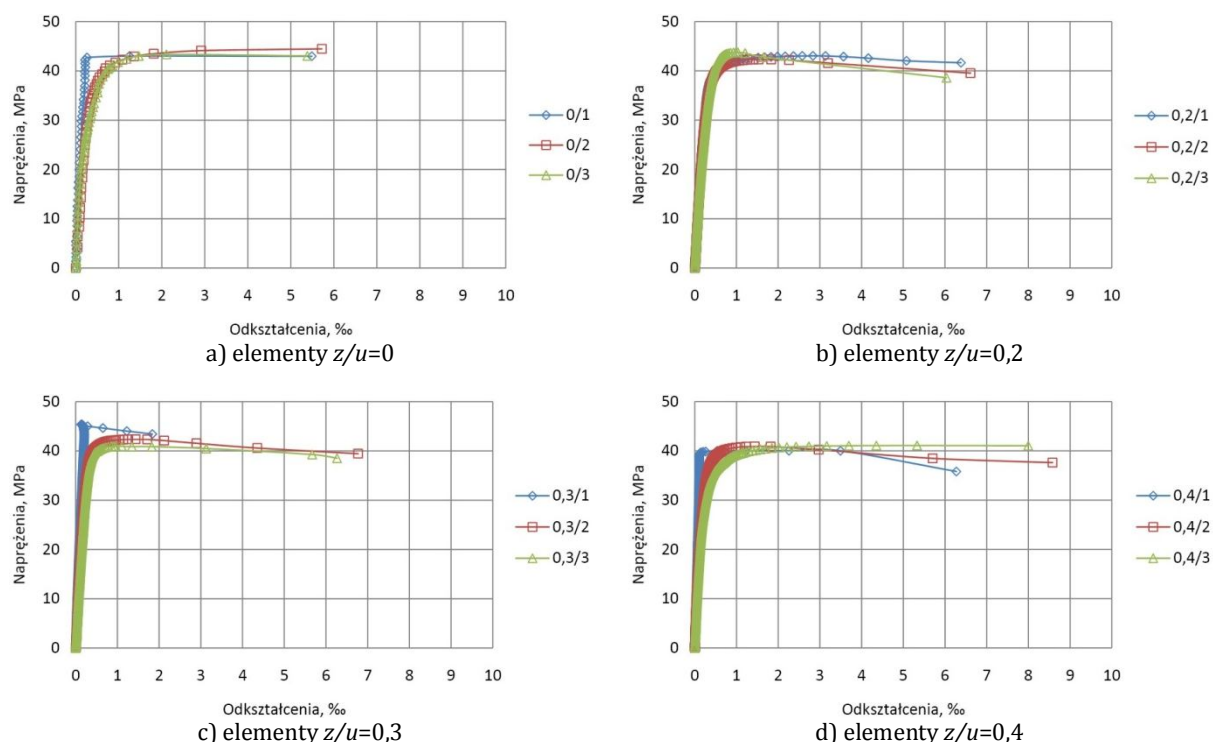


Rys. 26. Ścieżki odkształceń poprzecznych w funkcji obciążenia oraz obraz zniszczenia elementu 20M3\_2 [35 w Z6]  
Oznaczenia:  $TMi_j$ :  $T$  – temperatura wstępnej ekspozycji,  $M$  – siatka PBO,  $i$  – liczba warstw siatki,  $j$  – numer próbki

Obserwacja mechanizmów zniszczenia, we wcześniejszych badaniach, skłoniła mnie do przyjrzenia się wpływowi długości zakładu końcowego siatki PBO na wartość granicznych odkształceń poprzecznych. W tym celu wykonałem badania, w których próbki walcowe ( $\phi 113 \times 300$  mm) wzmocniłem jedną warstwą siatki PBO o różnej długości zakładu końcowego. Względny zakład siatki przyjąłem, jako stosunek długości zakładu do obwodu próbki ( $z/u$ )= $0 \div 0,4$ .

Wartość granicznych odkształceń obwodowych zależy od długości zakładu (Rys. 27), a decydujące o delaminacji są najmniejsze odkształcenia na długości zakładu. Jednocześnie należy zauważyć, że rozkład odkształceń na długości zakładu kompozytu jest nieliniowy, co pokazują m.in. analizy MES prezentowane w literaturze obcej. Wraz ze wzrostem długości zakładu (*overlapping zone*) wzrastają odkształcenia delaminacji (rys. 27). Współczynnik wykorzystanie siatki

PBO, w strefie końca zakładu, waha się w granicach 0,28-0,44 w zależności od jego długości. Jednocześnie analizując wartości odkształceń poprzecznych, poza strefą zakładu (rys. 25 i 26) wiadać, że współczynnik wykorzystanie siatki PBO wynosi 0,55-0,80.



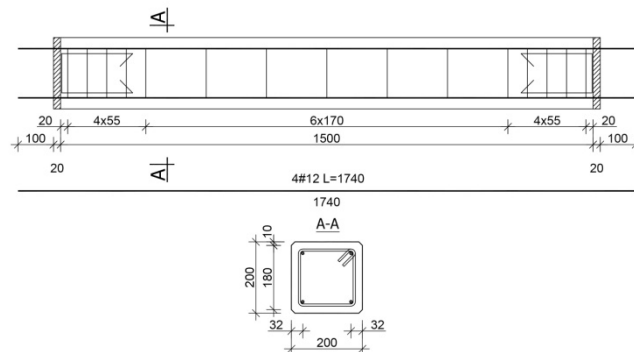
Rys. 27. Ścieżki odkształceń poprzecznych w funkcji obciążenia w zależności od względnej długości zakładu [35 w Z6]

Analizy rozkładu odkształceń poprzecznych elementów owiniętych siatką PBO zaprezentowałem na 59. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZiTb Lublin – Krynica 2013. Praca opublikowana została w materiałach konferencyjnych w artykule pt.: „Odształcalność ściskanych elementów betonowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRCM” w czasopiśmie *Budownictwo i Architektura* [35 w Z6]. Artykuł posiada 2 cytowania według bazy *Publish or Perish* (w tym 0 obcych).

Badania próbek betonowych, skrępowanych płaszczem kompozytowym siatką PBO pokazały dużą plastyczność elementów oraz sygnalizowany i powolny przyrost odkształceń w obszarze obciążenia niszczącego, co umożliwiła redystrybucję sił wewnętrznych w złożonych układach konstrukcyjnych np. ze słupami mimośrodowo ściskanymi. Po serii badań na elementach modelowych, czerpiąc ze zdobytej wiedzy i doświadczeń, postanowiłem przetestować system PBO-FRCM na mimośrodowo ściskanym słupach żelbetowych w skali naturalnej (Rys. 28).

Analizowałem wpływ obciążeń mimośrodowych oraz sposobu wzmocnienia siatką PBO na zachowanie się słupów żelbetowych. Zrealizowałem trzy położenia obciążenia podłużnego – obciążenie osiowe,  $h/12$  i  $h/6$  ( $h$  – wymiar przekroju poprzecznego). Przebadłem 15 smukłych słupów żelbetowych (Rys. 28), z których 12 zostało wcześniej wzmocnionych siatką PBO (Rys. 29). Słupy podzieliłem na trzy grupy w zależności od wartości mimośrodu. W każdej z grup

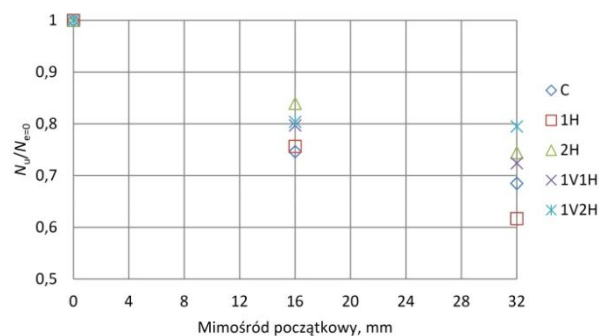
znajdowało się po pięć słupów, różniących się sposobem wzmocnienia. Dwa elementy wzmocniłem odpowiednio: jedną lub dwoma warstwami poprzecznej siatki PBO. Kolejne dwa element wzmocniłem podłużnie jedną warstwą siatki (w płaszczyźnie zginania) i również poprzecznie odpowiednio: jedną lub dwoma warstwami. Jeden słup w każdej grupie pozostawiłem, jako referencyjny bez wzmocnienia.



Rys. 28. Zbrojenie słupa [36 w Z6]



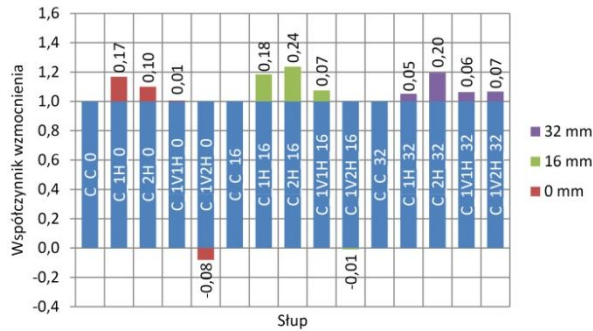
Rys. 29. Element na mimośrodku 32 mm ( $h/6$ ) na stanowisku badawczym [36 w Z6]



Rys. 30. Względny przyrost/spadek nośności w zależności od mimośrodu [36 w Z6]

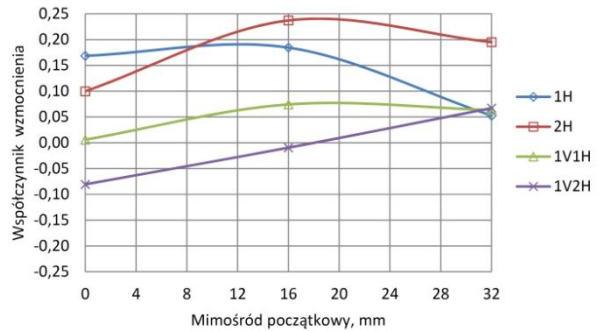
Sposób wzmocnienia podłużnego i/lub poprzecznego w istotny sposób wpływa na nośność słupów mimośrodowo ściskanych wzmocnionych siatką PBO. Najmniejsze spadki nośności wraz ze wzrostem mimośrodu siły odnotowano dla elementów najmocniej wzmocnionych (Rys. 30). Analizując zachowanie się słupów w danej grupie obciążenia mimośrodowego zauważyłem, że dla elementów wzmocnionych podłużnie i poprzecznie dwoma warstwami siatki PBO, ściskanych osiowo i na mimośrodku  $h/12$  ( $e=16$  mm), należy wprowadzić pojęcie osłabienia elementu. Dla słupów tych zanotowałem spadki nośności w porównaniu z elementami referencyjnymi

(Rys. 31 i 32). Spowodowane jest to przyrostem sztywności podłużnej słupów, jako efektu zastosowanie wielowarstwowego wzmocnienia kompozytowego. Obecność podłużnego zbrojenia kompozytowego redukuje odkształcalność podłużną elementów, co jest raczej niekorzystne. Obserwowane jest to w szczególności dla elementów ściskanych osiowo lub z niewielkim mimośrodem.

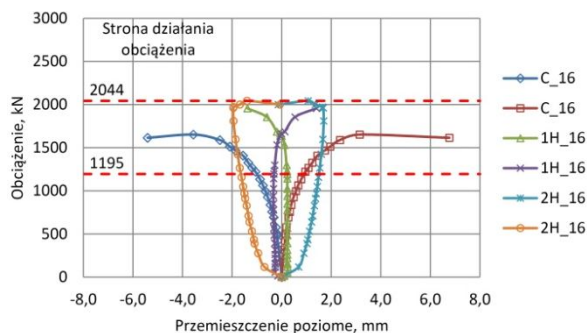


Rys. 31. Współczynnik wzmocnienia/osiabienia w zależności od typu słupa [36 w Z6]

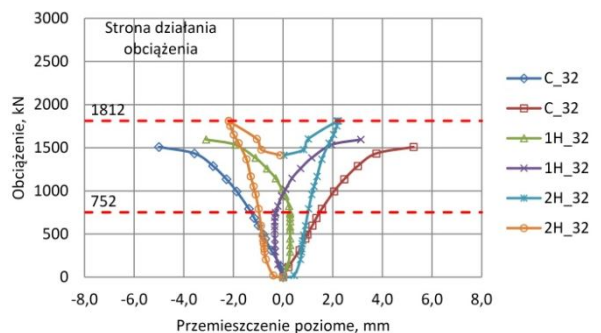
Oznaczenia:  $iH$ :  $i$  – liczba warstw wzmocnienia poprzecznego,  $jViH$ :  $j$  – liczba warstw wzmocnienia podłużnego (w płaszczyźnie zginania),  $i$  – liczba warstw wzmocnienia poprzecznego



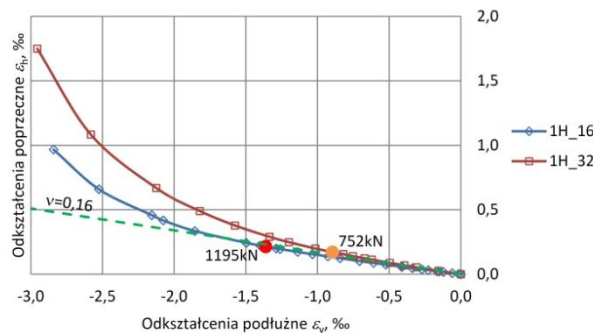
Rys. 32. Współczynnik wzmocnienia/osiabienia w zależności od mimośrodu [36 w Z6]



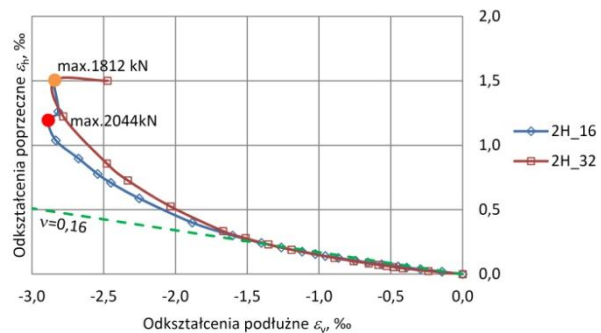
Rys. 33. Krzywa deformacji w zależności od obciążenia elementów na mimośrodku 16 mm ( $h/12$ ) [36 w Z6]



Rys. 34. Krzywa deformacji w zależności od obciążenia elementów na mimośrodku 32 mm ( $h/6$ ) [36 w Z6]



Rys. 35. Współczynnik Poissona elementów z jedną warstwą wzmocnienia poprzecznego [36 w Z6]



Rys. 36. Współczynnik Poissona elementów z dwoma warstwami wzmocnienia poprzecznego [36 w Z6]

W systemie PBO-FRCM, w którym spoiwem jest zaprawa mineralna, trudne jest do osiągnięcia, tak dobre zespolenie kompozytu z betonem, jak w systemach FRP. Zauważyłem niekorzystną deformację płaszcza z siatki PBO po stronie działania obciążenia. Kompozytowy płaszcz rozszerzał się poprzecznie szybciej niż beton, powodując jednocześnie naciągnięcia siatki po przeciwległej stronie przekroju. Na czujniku znajdującym się po stronie działania obciążenia (Rys. 29, czujnik poziomy po lewej stronie) odnotowałem odczyty ujemne, co oznacza, że czujnik

był wciskany. Nie można mówić o deformacji słupów w przeciwnym kierunku, a jedynie o efekcie ściśnięcia i wyboczenia płaszcza z siatki PBO. Efekt ten jest zauważalny dla elementów wzmocnionych tylko poprzecznie, przy obydwu mimośrodkach. Wraz ze wzrostem obciążenia obserwowane jest wtórne (opóźnione) zespolenie płaszcza z siatki PBO z betonem, spowodowanego destrukcją naprężeniową betonu (Rys. 33 i 34). Rozwój mikro-spękań w betonie, co obserwujemy na podstawie wzrostu współczynnika *Poissona* (Rys. 35 i 36), wywołuje zespolenie i współpracę obydwu materiałów oraz powstanie trójosiowego stanu naprężenia. Do tego momentu beton znajduje się w jednoosiowym stanie naprężenia. Jest to podobny efekt, to tego obserwowanego w słupach CFST (*Concrete Filled Steel Tube* – słupy betonowe w rurach stalowych). Do podobnych wniosków doszli *Ombres* i *Veere*, w pracy pt.: “Structural behaviour of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthened concrete columns under eccentric loading” którą recenzowałem w grudniu 2014 r. dla *Composites. Part B: Engineering*.

Jak już wspomniałem zastosowanie wzmocnienia wzdłuż osi słupów spowodowało wzrost sztywności podłużnej elementów. Dla słupów z podłużną warstwą siatki PBO nie zaobserwowałem podobnej deformacji płaszcza, jak to miało miejsce dla słupów tylko ze wzmocnieniem poprzecznym. Słupy wzmocnione podłużnie i poprzecznie, ściskane mimośrodkowo, wykazują znacznie większą plastyczność niż odpowiadające im słupy bez wzmocnienia podłużnego.

Tabela 3. Wyniki badań słupów mimośrodkowo ściskanych wzmocnionych siatką PBO [37 w Z6]

Słup	Nośność $N_u$ [kN]	Graniczne odkształcenia podłużne		Energia zniszczenia $E_u$ [kN mm]
		$\varepsilon_{v2}$ [‰]	$\varepsilon_{v1}$ [‰]	
C_C_0	2213,76	-2,121	-1,752	135,0
C_C_16	1651,96	-3,183	-0,052	167,2
C_C_32	1516,37	-3,135	+0,369	143,7
C_1H_0	2586,85	-2,736	-2,459	222,8
C_1H_16	1956,77	-2,845	-0,622	164,5
C_1H_32	1596,00	-2,962	+0,283	149,5
C_2H_0	2434,32	-3,200	-1,489	222,3
C_2H_16	2043,65	-2,907	-0,715	179,3
C_2H_32	1812,19	-2,827	+0,106	140,7
C_1V1H_0	2227,03	-2,392	-1,762	155,2
C_1V1H_16	1774,81	-2,941	-0,115	144,4
C_1V1H_32	1612,51	-3,112	+0,460	152,5
C_1V2H_0	2035,35	-1,734	-1,510	94,9
C_1V2H_16	1636,16	-1,842	-0,903	82,5
C_1V2H_32	1618,11	-2,890	+0,477	138,7

Oznaczenia: C\_C\_e – słup bez wzmocnienia na mimośrodku e, C\_iH\_e: i – liczba warstw wzmocnienia poprzecznego, e – wartość mimośrodu, C\_jViH\_e: j – liczba warstw wzmocnienia podłużnego (w płaszczyźnie zginania), i – liczba warstw wzmocnienia poprzecznego, e – wartość mimośrodu,  $\varepsilon_{v2}$  – odkształcenia po stronie bardziej ściskanej,  $\varepsilon_{v1}$  – odkształcenia po stronie mniej ściskanej / rozciąganej

W słupach owiniętych tylko siatką PBO zniszczenie nastąpiło przy porównywalnym poziomie odkształceń ściskania (Tabela 3). Na wartości granicznych odkształceń ściskania tych elementów nie miała wpływu wartość mimośrodu, znajdującego się w granicy rdzenia przekroju, ani intensywność wzmocnienia poprzecznego (liczba warstwa siatki PBO). Dla słupów czworo-

kątnych nie obserwuje się, tak korzystnego wpływu skrupowania, jak miało to miejsce dla elementów okrągłych [32-35 w Z6]. Miarą energii zniszczenia jest pole pomiędzy osią  $\varepsilon$  (poziomą), a wykresem odkształceń. Wartości energii zniszczenia zestawilem w Tabeli 3. Dla słupów owiniętych jedynie płaszczem z siatki PBO energia zniszczenia maleje wraz ze wzrostem mimośrodów i nie zależy od liczby warstw wzmocnienia obwodowego.

Obecność podłużnego wzmocnienia redukuje graniczne odkształcenia ściskania słupów ściskanych osiowo, przy których następuje zniszczenie przekroju, co jest raczej niekorzystne. Z kolei elementy ściskane mimośrodowo są w stanie przenieść znacznie większe odkształcenia ściskania po stronie działania siły, niż elementy ściskane osiowo. Jest to zjawisko obserwowane już w literaturze, dla słupów FRP. Zauważyłem wpływ podłużnej warstwy wzmocnienia siatką PBO na wartości energii zniszczenia słupów wzmocnionych jednocześnie podłużnie i poprzecznie (Tabela 3). Brak spadku wartości energii zniszczenia przy wzroście mimośrodu, należy tłumaczyć obecnością wzmocnienia podłużnego. Beton w strefie ściskanej został dodatkowo wzmocniony, przez co elementy wykazały większą odkształcalność podłużną przy kolejnych mimośrodkach. Widać również wpływ podwójnego owinięcia i dużej sztywności wzmocnienia.

Dzięki układowi tensometrów poziomych potwierdziłem, że miejscem od którego rozpoczyna się postępująca delaminacja wzmocnienia jest końcowy zakład kompozytu. Wartość odkształceń obwodowych zależy od poziomu wyężenia betonu wewnątrz płaszcza kompozytowego oraz jego deformacji spowodowanych degradacją betonu. Wartość tych odkształceń zależy od sposobu wzmocnienia i wartości mimośrodu.

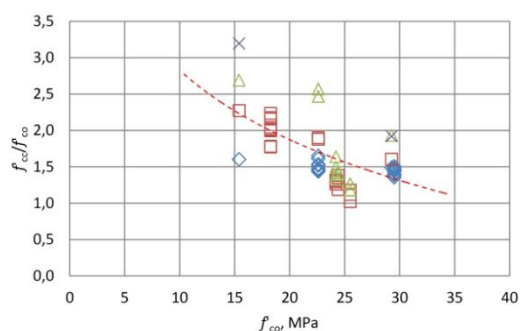
Wyniki badań słupów mimośrodowo ściskanych wzmocnionych siatką PBO na zaprawie mineralnej przedstawiłem w dwóch pracach. Jako pierwszą była praca pt.: „Behaviour of fibre reinforced cementitious matrix strengthened concrete columns under eccentric compression loading” w *Materials & Design* [36 w Z6]. Dotyczy ona nośności i deformacji słupów. Artykuł posiada: 5 cytowań według bazy *Web of Science* (w tym 3 obce), 5 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 2 obce) i 6 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 3 obce). Kolejna praca pt.: „Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns” poświęcona jest odkształcalności elementów i opublikowana została w *Construction & Building Materials* [37 w Z6]. Artykuł posiada: 2 cytowania według bazy *Web of Science* (w tym 1 obce), 3 cytowania według bazy *Scopus* (w tym 1 obce) i 3 cytowanie według bazy *Publish or Perish* (w tym 1 obce).

Po kilku latach badań, dysponując własną bazą danych, a także korzystając z badań obcych, które ukazały się w trakcie moich badań, pokusiłem się o pierwsze podsumowanie wiedzy na temat wzmocnień elementów z betonu siatką PBO na zaprawie mineralnej. Posłużyłem się badaniami dwójki autorów, którzy jako jedyni na świecie, zajmują się podobną tematyką – *Ombres'a* z University of Calabria i *Colajanni* z zespołem z University of Messina we Włoszech.

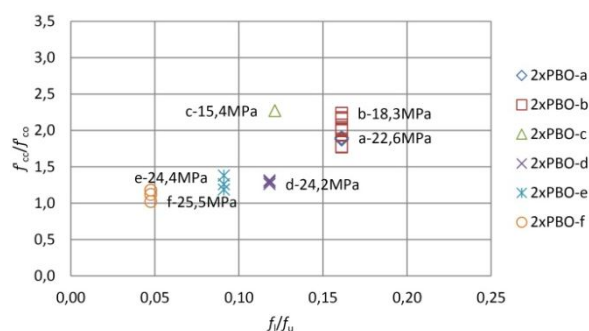
Skrepowanie betonu poprzecznym uzwojeniem sprawia, że betonowy rdzeń znajduje się w złożonym stanie naprężenia, co przekłada się bezpośrednio na przyrost jego wytrzymałości. Na otrzymaną efektywność wzmocnienia ma wpływ początkowa wytrzymałość betonu na ściskanie. Czym niższa wytrzymałość betonu na ściskanie, tym lepsze efekty uzwojenia siatką PBO (Rys. 37). Najlepsze efekty wzmocnienia, przy jednakowej liczbie warstw wzmocnienia siatką PBO, uzyskuje się dla betonów o niższych wytrzymałościach na ściskanie (Rys. 38). Jednak należy pamiętać, że im większa średnica przekroju poprzecznego, przy takiej samej liczbie warstw wzmocnienia, tym mniejszy efekt wzmocnienia. Przyrost wytrzymałości wzrasta liniowo, wraz ze wzrostem współczynnika wzmocnienia  $\rho$ :

$$\rho = \frac{4 \cdot n \cdot t}{D}, \quad (11)$$

gdzie:  $n$  – liczba warstw wzmocnienia,  $t$  – grubość kompozytu,  $D$  – średnica przekroju.



Rys. 37. Względny przyrost wytrzymałości na ściskanie ( $f_{cc}/f_{co}$ ) w stosunku do  $f_{co}$ . [41 w Z6]



Rys. 38. Względny przyrost wytrzymałości na ściskanie ( $f_{cc}/f_{co}$ ) w stosunku do  $(f_i/f_u)$  elementów wzmocnionych dwoma warstwami siatką PBO [41 w Z6]

Oznaczenia:  $ixPBO$ :  $i$  – liczba warstw wzmocnienia poprzecznego

Betonowy rdzeń ma ograniczoną ściśliwość, po przekroczeniu której następuje spadek zdolności rdzenia do przenoszenia zwiększających się naprężeń, co prowadzi do zniszczenia elementu. Do momentu, kiedy naprężenia podłużne w betonie nie przekroczą wartości wytrzymałości betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń  $f_{co}$ , odkształcenia w kompozycie pozostają niewielkie. Od momentu, kiedy  $\sigma_z > f_{co}$  następuje wzrost naprężeń poprzecznych w kompozycie i zwiększa się oddziaływanie siatki PBO na betonowy rdzeń. Decydującą o skuteczności wzmocnienia jest także jego sztywność, która wpływa na stosunek odkształceń poprzecznych (obwodowych) do odkształceń podłużnych. Im mniejsza sztywność wzmocnienia, tym większa możliwość do deformacji plastycznych i redystrybucji sił wewnętrznych. Pokazuje to, przeprowadzona w [41 w Z6] analiza zmiany współczynnika *Poissona*.

Podsumowanie to opublikowałem w *Construction & Building Materials* w pracy pt.: „Confined concrete elements with PBO-FRCM composites” [41 w Z6]. Artykuł posiada: 1 cytowanie według bazy *Web of Science* (w tym 1 obce), 1 cytowanie według bazy *Scopus* (w tym 1 obce) i 1 cytowanie według bazy *Publish or Perish* (w tym 1 obce)



#### d) Podsumowanie

Tematyka wzmocnienia konstrukcji z betonu za pomocą materiałów kompozytowych, którą zajmuję się od roku 2000, jest ciągle obecna w inżynierii budowlanej. Świadczą o tym liczne, systematycznie publikowane wyniki badań doświadczalnych i analiz teoretycznych, a także aplikacje inżynierskie na obiektach budowlanych. Ekspansja wiedzy na ten temat zbiegła się w czasie, z okresem w którym zajmuje się tą tematyką. W wielu ośrodkach naukowych na świecie i w Polsce, prowadzone były i prowadzone są badania nad coraz pełniejszym poznaniem wpływu wzmocnienia kompozytowego na nośność i pracę konstrukcji z betonu.

Badania nad wzmocnianiem elementów z betonu za pomocą siatki z włókien PBO na zaprawie mineralnej, które rozpocząłem w 2009 r. były pierwszymi w Polsce. W chwili obecnej, bazując na najnowszych publikacjach z lat 2013-2015, mogę stwierdzić, że prym w tym temacie wiodą trzy ośrodki naukowe – University of Calabria i University of Messina z Włoch oraz moja Uczelnia Politechnika Wrocławska i mój Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego.

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe prezentowanego cyklu publikacji powiązanych tematycznie pt.: **„Wzmocnianie wybranych elementów z betonu siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej”**, stanowiące mój wkład w rozwój dyscypliny budownictwo, uważam:

- 1) zapoczątkowanie w Polsce badań doświadczalnych i teoretycznych nad wytrzymałością betonu wzmocnionego siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej,
- 2) doświadczalne opisanie mechanizmu zniszczenia ściskanych osiowo oraz mimośrodowo elementów betonowych i żelbetowych wzmocnionych siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej,
- 3) zarówno doświadczalne, jak i teoretyczne opisanie zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  ściskanych osiowo elementów betonowych, wzmocnionych siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej,
- 4) przeprowadzenie analizy porównawczej zachowania się ściskanych osiowo elementów betonowych, uzwojonych matą CFRP i siatką z włókien PBO, badanych w neutralnej temperaturze +20°C oraz w wysokich temperaturach: +40°C, +60°C, +80°C, a także poddanych przed próbą niszczącą, działaniu wysokich temperatur: +60°C, +120°C i +180°C,
- 5) określenie wpływu sposobu ukształtowania wzmocnienia poprzecznego na nośność i odkształcalność ściskanych osiowo elementów betonowych, wzmocnionych siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej,
- 6) określenie wpływu podłużnego i poprzecznego wzmocnienia siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej, na pracę mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych,
- 7) opisanie wpływu destrukcji naprężeniowej betonu na pracę i efektywność wzmocnienia ściskanych osiowo oraz mimośrodowo elementów betonowych i żelbetowych wzmocnionych siatką z włókien PBO na zaprawie mineralnej,

- 8) opisanie zjawiska wtórnego (opóźnionego) zespolenia siatki z włókien PBO z betonem, od momentu kiedy naprężenia podłużne w betonie  $\sigma_z$  są większe od wytrzymałości betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń  $f_{co}$  ( $\sigma_z > f_{co}$ ).

Nie jest zadaniem systemu PBO-FRCM zastępowanie lub wyeliminowanie kompozytów żywicznych FRP. Jednak, zaprezentowane przez mnie prace pokazują duży potencjał kompozytów na bazie zapraw mineralnych, jako wzmocnienia konstrukcji z betonu. Obydwa systemy – FRP i PBO-FRCM, różni wiele, chociaż obydwa wywodzą się z tej samej idei polegającej na ograniczeniu swobody odkształceń betonu – w głównej mierze tych rozciągających, ale również ściskających.

Świadoma decyzja o wyborze systemu wzmacniania musi być podyktowana tym, że wybrany system zagwarantuje osiągnięcie zamierzonych celów zarówno doraźnie, jak i dłuższym okresie czasu. Wyborowi temu, powinna towarzyszyć pełna wiedza na temat wzmacnianego elementu, w tym taka która pozwoli przewidzieć ewentualne zagrożenia dla wzmocnionej konstrukcji i pozwoli wybrać najbardziej odpowiedni system. Na podstawie zdobytej wiedzy, ważne jest dla mnie, aby brać pod uwagę jakie korzyści i zagrożenia niosą ze sobą obydwie technologie – FRP i PBO-FRCM, i to że nie ma idealnego systemu, a dla każdego z nich można podać zarówno szereg zalet, jak i wad.

Zaprezentowany cykl prac nie wyczerpuje tematu wzmacniania elementów z betonu siatką PBO na zaprawie mineralnej. Moim zdaniem najważniejszym zagadnieniem, na najbliższą przyszłość, jest opracowanie efektywnej metody kotwienia siatki PBO na zewnętrznym zakładzie, tak aby można było wykorzystać w pełni jej właściwości wytrzymałościowe. Dopiero wtedy możliwe będzie analizowanie m.in. cech reologicznych, wpływu obciążeń zmiennych, wpływu dużych mimośrodów i smukłości wzmacnianych elementów. Temat ten jest bardzo aktualny.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych**

### **5.1. Działalność naukowo – badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora**

1 lipca 1999 r. obroniłem pracę magisterską pt.: „Projekty techniczne konstrukcji wsporczych z betonu dla napowietrznej linii energetycznej o napięciu 30 kV”, na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, na kierunku budownictwo, której promotorem był dr inż. Aleksy Łodo.

Po ukończeniu studiów podjąłem pracę jako asystent projektanta w Przedsiębiorstwie Konsultingowo – Inżynieryjnym PREDOM we Wrocławiu, w którym pracowałem do lutego 2001 r. Jednocześnie w październiku 2000 r. podjąłem studia doktoranckie na Wydziale Budownictwa

Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, w Zakładzie Konstrukcji Betonowych w Instytucie Budownictwa. W czerwcu 2001 r. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej otworzył mi przewód doktorski pt.: „Nośność żelbetowych słupów wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych”. Promotorem w przewodzie doktorskim został prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński. Pracę doktorską złożyłem do recenzji we wrześniu 2004 r. Recenzentami pracy byli prof. dr hab. inż. Maria E. Kamińska z Politechniki Łódzkiej i prof. dr hab. inż. Jerzy Hoła z Politechniki Wrocławskiej. Pracę doktorską obroniłem z wyróżnieniem, wnioskowanym przez obydwój Recenzentów, 16 lutego 2005 r.

W rozprawie doktorskiej przedstawiłem rezultaty badań doświadczalnych i analiz teoretycznych możliwości wykorzystania podłużnego wzmocnienia kompozytowego z włókien węglowych CFRP, do wzmocniania słupów żelbetowych, ściskanych osiowo i mimośrodowo. Tematyka okazała się bardzo aktualna i interesująca zarówno w aspekcie naukowym, jak i praktycznym, co zauważyli obydwój Recenzenci. W rozprawie dokonałem krytycznego przeglądu obszernego materiału źródłowego, na podstawie którego postawiłem trzy oryginalne tezy. Pierwsza z nich mówiła o tym, że możliwe jest wskazanie najczęściej występującego mechanizmu zniszczenia ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami CFRP, a na tej podstawie określenia wartości granicznych odkształceń ściskania. Kolejna zakładała, że wzmocnianie ściskanych słupów żelbetowych podłużnymi taśmami CFRP powoduje wzrost ich nośności granicznej, która zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego. Ostatnia, trzecia teza mówiła o tym, że istnieje możliwość podania zależności do obliczania nośności krępych, osiowo ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami CFRP.

Postawą rozważań, do udowodnienia postawionych tez, były badania doświadczalne podzielone na cztery etapy, w których przebadalem łącznie 31 elementów o przekroju czworokątnym. Były to elementy żelbetowe, modelowe, jak również w skali naturalnej.

Najważniejszymi osiągnięciami naukowo-badawczymi rozprawy doktorskiej było:

1. doświadczalne wykazanie najczęściej występującego mechanizmu zniszczenia ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych CFRP i określono wartość granicznych odkształceń podłużnych dla tych elementów,
2. zdefiniowanie wpływ intensywności podłużnego wzmocnienia kompozytowego taśmami CFRP, która wpływa na nośność graniczną elementów, pod warunkiem jednak, że towarzyszy mu obwodowe wzmocnienie kompozytowe,
3. pokazanie, że wzmocnianie samymi odcinkami taśm CFRP, których włókna są zorientowane równoległe do osi słupa jest niekorzystne, ze względu na przedwczesne odspojenie się kompozytu od betonu,
4. zaproponowanie zależności do określania nośności osiowo ściskanych, krępych słupów żelbetowych wzmocnianych kompozytami z włókien węglowych CFRP.

Są to oryginalne osiągnięcia, udokumentowane publikacjami naukowymi [3, 5, 7, 13, 15, 16, 19, 20 i 22 w Z6]. Artykuł w *Journal of Civil Engineering and Management* pt.: „Experimental behaviour of reinforced concrete column models strengthened by CFRP materials” [5 w Z6] z 2006 r. posiada: 16 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 9 obcych) i 28 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 13 obcych). Prace [15, 16 i 19 w Z6] były prezentowane na oficjalnych konferencjach *The International Institute for FRP in Construction* (IIFC) w Zurichu i Seulu.

## **5.2. Działalność naukowo – badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nie wchodząca w skład głównego osiągnięcia naukowego**

Po uzyskaniu stopnia doktora, od 16 lutego 2005 r., podjąłem pracę na stanowisku asystenta w Zakładzie Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Od 1 lutego 2006 r. pracuję na stanowisku adiunkta, początkowo w Zakładzie Konstrukcji Betonowych, później w Katedrze Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, a obecnie w Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Rozwijając swoje zainteresowania naukowe podjąłem tematykę zdefiniowaną w pracy doktorskiej, znacznie ją poszerzając.

W 2008 r. zostałem członkiem *The International Institute for FRP in Construction* (IIFC). Jest to międzynarodowe forum specjalistów w dziedzinie zastosowań materiałów kompozytowych w budownictwie. Uczestnicząc w oficjalnych konferencjach IIFC, a także śledząc działalność organizacji stwierdzam, że tematyka będąca przedmiotem moich zainteresowań naukowych, była i jest ciągle obecna w światowej i polskiej inżynierii budowlanej, o czym świadczy ciągle rosnąca liczba publikacji i zastosowań praktycznych.

Moje zainteresowania naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora (poza tematyką ujętą w cyklu publikacji powiązanych tematycznie) były skoncentrowane na następujących zagadnieniach:

1. w odniesieniu do tematyki ujętej w doktoracie, ocena wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP na nośność i odkształcalność słupów żelbetowych, poddanych różnemu obciążeniu osiowemu i mimośrodowemu,
2. wyznaczenie i ocena parametrów reologicznych (końcowego współczynnika pełzania) betonu wzmocnionego za pomocą taśm i mat z włókien węglowych CFRP,
3. wpływ obciążeń wielokrotnie zmiennych na pracę elementów betonowych i żelbetowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi,
4. ocena stanu technicznego, diagnostyka przyczyn uszkodzeń oraz naprawy konstrukcji betonowych,
5. ocena udziału wzmocnienia siatką PBO w nośności na ścinanie belek żelbetowych, w zależności od sposobu jego skonstruowania i zakotwienia.

## **Ad. 1.**

Analizie wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP na nośność i odkształcalność słupów żelbetowych, poddanych doraźnemu obciążeniu osiowemu i mimośrodowemu, poświęcony był grant badawczy służących rozwojowi specjalności naukowych jednostek w Politechnice Wrocławskiej. Grant został przyznany mi przez Prorektora ds. Badań Naukowych i Współpracy z Gospodarką Politechniki Wrocławskiej. Realizowałem go samodzielnie w latach 2008-2009.

Intensywność wzmocnienia definiowana jest tutaj jako stosunek pola powierzchni doklejanych wzdłuż elementu taśm CFRP do pola powierzchni przekroju betonowego. W badaniach zastosowałem trzy intensywności wzmocnienia podłużnego CFRP – 2,10%, 1,68% i 1,26%. Dla wszystkich wzmocnionych elementów zastosowałem jednokrotne, całkowite uzwojenie matą CFRP. Badania przeprowadziłem na słupach w skali naturalnej, które obciążałem doraźnie osiowo i na dwóch mimośrodkach w granicach rdzenia przekroju. Analizie poddałem wyniki badań nośności granicznej słupów w zależności od intensywności wzmocnienia podłużnego. Opisałem mechanizmy zniszczenia oraz podałem wartości sił niszczących i maksymalnych odkształceń podłużnych elementów. Zastosowanie wzmocnienia podłużnego zwiększa sztywność słupów, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie szybkości przyrostu odkształceń ściskania w stosunku do elementów kontrolnych, przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Wraz ze wzrostem intensywności wzmocnienia podłużnego wzrasta nośność graniczna, ale pod warunkiem, że towarzyszy mu kompozytowe zbrojenie obwodowe. Dla czworokątnych słupów bez znaczącego wyokrąglenia naroży, przyrost nośności należy przypisać prawie wyłącznie podłużnemu wzmocnieniu CFRP a nie wzmocnieniu poprzecznego CFRP. Trzeba być sceptycznie nastawiony, jeżeli chodzi o trójosiowy stan naprężeń spowodowany skrępowaniem betonu w przekrojach prostokątnych, szczególnie z ostrymi krawędziami (lub niewielkim wyokrągleniem), owiniętych nawet kilkukrotnie matą kompozytową. Wzmocnienie podłużne staje się bardziej efektywne w elementach mimośrodkowo ściskanych, gdzie już przy mimośrodkach siły na granicy rdzenia przekroju (a takie badałem), może się ono włączyć do współpracy przy rozciąganiu, w fazie zniszczenia słupa.

Są to oryginalne osiągnięcia, udokumentowane publikacjami naukowymi [24, 27 w Z6]. Artykuł w Archives of Civil and Mechanical Engineering pt.: "The effectiveness of CFRP materials strengthening of eccentrically compressed reinforced concrete columns" [24 w Z6] z 2011 r. posiada: 7 cytowań według bazy *Web of Science* (w tym 3 obce), 8 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 4 obce) i 10 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 5 obcych).

## **Ad. 2.**

Wyznaczeniu i ocenie parametrów reologicznych betonu wzmocnionego za pomocą taśm

i mat z włókien węglowych CFRP poświęconych jest 7 moich prac [2, 10, 17, 18, 23, 25 i 28 w Z6]. Kilkuetapowe badania realizowałem w ramach dwóch projektów badawczych. Pierwszy grant, który był pilotażowym, został przyznany mi przez Prorektora ds. Badań Naukowych i Współpracy z Gospodarką Politechniki Wrocławskiej. Realizowałem go samodzielnie w latach 2007-2008. Drugi grant zespołowy został przyznany nam przez Komitet Badań Naukowych (N506 039 32/4179). Realizowaliśmy go w latach 2007-2009 w zespole: prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński – kierownik, dr inż. Tomasz Trapko – wykonawca, dr inż. Czesław Bywalski – wykonawca.

Celem kilkuetapowych badań była ocena wpływu podłużnego i/lub poprzecznego wzmocnienia kompozytowego CFRP na wartość końcowego współczynnika pełzania elementów poddanych długotrwałemu ścisaniu osiowemu. Na podstawie badań elementów wzmocnionych jedynie poprzez owinięcie matą CFRP stwierdziłem, że intensywność wzmocnienia poprzecznego wpływa na przyrost średnich, doraźnych odkształceń podłużnych w chwili pierwszego obciążenia po wzmocnieniu, a ograniczenie przyrostu długotrwałych odkształceń ścisania należy przypisać w głównej mierze poprzecznemu wzmocnieniu kompozytowemu. Współczynnik pełzania nie zależy od intensywności wzmocnienia poprzecznego CFRP. Obecność samego poprzecznego wzmocnienia CFRP redukuje końcowy współczynnik pełzania o ok. 30% w porównaniu z elementami referencyjnymi. Z kolei w elementach, w których zastosowałem podłużne i poprzeczne wzmocnienia CFRP, liczba warstw wzmocnienia poprzecznego nie ma wpływu na przyrost długotrwałych odkształceń ścisania. W tego typu elementach zmniejszenie szybkości przyrostu odkształceń podłużnych należy przypisać prawie wyłącznie podłużnemu wzmocnieniu kompozytowemu. Dla elementów bez wzmocnienia końcowy współczynnik pełzania jest ok. 55% większy w porównaniu z elementami wzmocnionymi podłużnym taśmami CFRP i poprzeczną matą CFRP. Bez względu na intensywność wzmocnienia podłużnego i poprzecznego, charakteryzują się one zbliżonymi wartościami współczynnika pełzania.

Artykuł w *Composites. Part B: Engineering* pt.: "Investigations on rheological strains of compressed concrete elements strengthened with external composite reinforcement CFRP" [28 w Z6] z 2012 r. posiada: 4 cytowania według bazy *Web of Science* (w tym 1 obce), 5 cytowań według bazy *Scopus* (w tym 2 obce) i 7 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 3 obce). Praca [10 w Z6] była prezentowana na konferencji *The International Institute for FRP in Construction* (IIFC) w Patras w Grecji.

### **Ad. 3.**

Wpływowi obciążeń wielokrotnie zmiennych na nośność i odkształcalność ściskanych elementów betonowych, wzmocnionych materiałami CFRP poświęcona jest jedna praca [30 w Z6]. Zagadnienie to obecnie rozwinąłem o analizę pracy tarcz żelbetowych wzmocnionych siatką

PBO na zaprawie mineralnej, poddanych obciążeniu wielokrotnie zmiennemu. Obecnie badania zespołowe realizujemy w laboratorium na tarczach pełnościennych i z otworem.

W badaniach zachowania się ściskanych elementów betonowych wzmocnianych taśmami i/lub matami CFRP, podanych obciążeniom monotonicznym i wielokrotnie zmiennemu pokazaliśmy możliwość odwzorowania krzywej monotonicznej obwiednią krzywej cyklicznej, w zależności od typu wzmocnienia. Przeanalizowaliśmy wpływ typu wzmocnienia i stanu wyętwienia na wartości modułów sprężystości i odkształceń rezydualnych. Zauważyliśmy, że możliwość dostosowania się do obciążeń wielokrotnie zmiennych, ściskanych elementów wzmocnionych materiałami CFRP, zależy od sposobu i intensywności wzmocnienia. W przypadku elementów wzmocnionych wyłącznie poprzecznym uzwojeniem CFRP współpraca betonowego rdzenia i zewnętrznego płaszcza zależy od sztywności wzmocnienia. W elementach tych można zalecić stosowanie jedynie pojedynczego wzmocnienia matą, a stosowanie większej liczby warstw kompozytu należy uznać za niekorzystne, ze względu na trudności w prognozowaniu odkształceń oraz powstające w betonowym rdzeniu mikro pęknięcia.

Zastosowanie podłużnego i poprzecznego wzmocnienia CFRP zwiększa sztywność, co wpływa korzystnie na stan odkształcenia i nośność elementów poddanych obciążeniom wielokrotnie zmiennym. W elementach poddanych ściskaniu cyklicznemu zalecamy stosowanie wzmocnienia kompozytowego w postaci podłużnych taśm z minimum dwoma warstwami uzwojenia matą CFRP.

Artykuł w *Journal of Civil Engineering and Management* pt.: "Load-bearing capacity of compressed concrete elements subjected to repeated load strengthened with CFRP materials" [30 w Z6] z 2012 r. posiada: 3 cytowania według bazy *Web of Science* (w tym 2 obce), 4 cytowania według bazy *Scopus* (w tym 3 obce) i 6 cytowań według bazy *Publish or Perish* (w tym 5 obcych).

#### **Ad. 4.**

W ramach współpracy z prof. dr. hab. inż. Mieczysławem Kamińskim miałem okazję uczestniczyć w zespole eksperckim, który dokonywał, w latach 2003-2013, ocen stanu technicznego i diagnostyki powstałych uszkodzeń konstrukcji żelbetowej w CH Turzyn w Szczecinie. Wykorzystałem swoją wiedzę na temat wzmocnień kompozytowych i opracowałem kilkanaście projektów wzmocnień CFRP prefabrykowanych rygli stropowych i projekty wzmocnienia monolitycznych ścian zbiorników przeciwpożarowych w tym obiekcie. Współautorskie prace z przeglądów konstrukcji i zrealizowanych wzmocnień zostały opublikowane w [8 i 12 w Z6].

Ponadto zajmowałem się diagnostyką materiałów i konstrukcji budowlanych. Była to ocena stanu technicznego wyrobów budowlanych, współczesnych obiektów inżynierskich, jak i budowli zabytkowych. W ramach tej działalności opublikowałem jeden rozdział w książce [9 w Z6] i cztery artykuły w czasopiśmie punktowanym przez MNiSW [29, 31, 39, 40 i 44 w Z6], a także

jestem współautorem opinii i ekspertyz wymienionych w pkt. III, ppkt. M w Z5.

#### **Ad. 5.**

W ramach współpracy z mgr inż. Dorotą Urbańską, doktorantką w Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, współuczestniczę w badaniach, w których analizujemy pracę belek żelbetowych wzmocnionych na ścinanie za pomocą zewnętrznych strzemion z siatki PBO za zaprawie mineralnej. Mgr inż. Dorota Urbańska realizowała pod moim kierunkiem pracę dyplomową magisterską pt.: „Wpływ sposobu ukształtowania poprzecznego zbrojenia stalowego i kompozytowego na efektywność pracy belek ze względu na ścinanie”. Badania doświadczalne, wykonane w ramach tej pracy, pokazują że kluczowe w systemie PBO-FRCM jest zapewnienie odpowiedniego zakotwienia zewnętrznych strzemion z siatki PBO. Jak wykazały badania wstępne nie stwierdziliśmy pozytywnego wpływu, na nośności na ścinanie, ułożenia włókien PBO pod kątem mniejszym od 90 ° do osi podłużnej belki. Największą nośność otrzymaliśmy dla wzmocnienia strzemionami PBO ułożonymi pod kątem 90°. Stwierdziliśmy, że strzemiona z siatki PBO powinny być dostatecznie blisko siebie, aby nie dopuścić do propagacji zbyt wielu rys pomiędzy nimi. Czerpiąc z doświadczeń, które zdobyliśmy na wstępnym etapie badań, opracowaliśmy program dalszych badań, w których testować będziemy różne sposoby ukształtowania i zakotwienia strzemion z siatki PBO za zaprawie mineralnej w belkach o przekroju teowym

Wyniki wstępnych badań opublikowaliśmy w artykule w *Composites. Part B: Engineering* pt.: „Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites” [42 w Z6] z 2015 r. i w artykule w *Materiałach Budowlanych* pt. „Nośność na ścinanie belek żelbetowych wzmocnionych materiałami PBO-FRCM” [43 w Z6] z 2015 r.

## **6. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej, organizacyjnej i inżynierskiej po uzyskaniu stopnia doktora**

### **6.1. Działalność naukowo-badawcza**

W Tabeli 4 zestawilem, w ujęciu sumarycznym, wszystkie publikacje z wyszczególnieniem tych po uzyskaniu stopnia doktora. W Tabeli 5 umieściłem wszystkie prace punktowane przez MNiSW wraz ze wskaźnikami *impact factor* i informacją o liczbie Autorów.

12 artykułów opublikowałem w czasopismach znajdujących się w bazie JCR, w tym 6 wchodzących w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie [32, 33, 34, 36, 37, 41 w Z6] i 6 artykułów nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego [5, 24, 28, 29, 30, 42 w Z6]. Z tych publikacji 10 ma przypisany wskaźnik *impact factor* [24, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 41, 42 w Z6], w tym 6 wchodzących w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie.



Tabela 4. Zestawienie opublikowanych prac w ujęciu sumarycznym po uzyskaniu stopnia doktora

Lp.	Rodzaj pracy	Liczba publikacji w ujęciu sumarycznym	Liczba publikacji po uzyskaniu stopnia doktora
1	Publikacje ogółem	47	44
2	Artykuły w czasopismach z bazy JCR	12	12
3	Artykuły w czasopismach o zasięgu międzynarodowym, nie ujęte w bazie JCR	1	1
4	Artykuły w czasopismach o zasięgu krajowym	16	14
5	Rozdziały w książkach	4	3
6	Referaty na konferencjach międzynarodowych	9	9
7	Referaty na konferencjach krajowych	5	5

Tabela 5. Zestawienie wszystkich publikacji punktowanych przez MNiSW, wskaźników *impact factor* i liczby Autorów

Lp.	Czasopismo	Pozycja w załączniku Z6	Rok	Liczba Autorów	Punktacja MNiSW	Impact Factor
1	Inżynieria i Budownictwo	3	2006	2	6	-
2	Journal of Civil Engineering and Management *	5	2006	2	2	-
3	Materiały Budowlane	6	2006	4	6	-
4	Materiały kompozytowe w budownictwie mostowym	7	2006	3	2	-
5	Materiały Budowlane	21	2010	1	6	-
6	Journal of Materials Science and Engineering	22	2010	2	2	-
7	Inżynieria i Budownictwo	23	2010	1	6	-
8	Archives of Civil and Mechanical Engineering	24	2011	2	20	0,855
9	Kompozyty	25	2011	1	9	-
10	Przegląd Budowlany	26	2011	2	6	-
11	Inżynieria i Budownictwo	27	2011	1	6	-
12	Composites. Part B: Engineering	28	2012	3	45	2,143
13	Przegląd Elektrotechniczny	29	2012	2	15	-
14	Journal of Civil Engineering and Management	30	2012	2	50	2,016
15	Przegląd Budowlany	31	2012	3	3	-
16	Materials and Design	32	2013	1	35	3,171
17	Composites. Part B: Engineering	33	2013	1	45	2,602
18	Composites. Part B: Engineering	34	2013	1	45	2,602
19	Architektura i Budownictwo	35	2013	1	3	-
20	Materials and Design	36	2014	1	35	3,501
21	Construction & Building Materials	37	2014	1	40	2,296
22	Materiały Budowlane	38	2014	2	6	-
23	Materiały Budowlane	39	2014	4	6	-
24	Materiały Budowlane	40	2014	3	6	-
25	Construction & Building Materials	41	2014	1	40	2,296
26	Composites. Part B: Engineering	42	2015	3	40	2,983
27	Materiały Budowlane	43	2015	3	6	-
28	Materiały Budowlane	44	2015	3	6	-
Razem:					<b>497</b>	<b>24,465</b>

\* Journal of Civil Engineering and Management znajduje się w bazie JCR od 2009 r.

1 artykuł opublikowałem w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, nie umieszczonym w bazie JCR [22 w Z6]. Opublikowałem 16 artykułów w czasopismach o zasięgu krajowym. 14 artykułów po uzyskaniu stopnia doktora [3, 6, 21, 23, 25, 26, 27, 31, 35, 38, 39, 40, 43, 44 w Z6], w tym 1 wchodzący w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie [35 w Z6]. Jestem auto-

rem 4 rozdziałów w książkach, w tym 3 po uzyskaniu stopnia doktora [7, 8, 9 w Z6].

Po uzyskaniu stopnia doktora opublikowałem 14 referatów w materiałach konferencyjnych, w tym 9 na konferencjach międzynarodowych [10-12, 15-20 w Z6] i 5 na konferencjach krajowych [1, 2, 4, 13, 14 w Z6]. 4 referaty zostały opublikowane w materiałach konferencyjnych z oficjalnych konferencji *The International Institute for FRP in Construction* (IIFC) w Zurichu i Seulu [15, 16, 19, 20 w Z6], 1 referat ukazał się w materiałach z konferencji współorganizowanej przez *The International Institute for FRP in Construction* (IIFC) w Patras [10 w Z6]. Ponadto 3 prace wygłaszane na konferencjach krajowych, po uzyskaniu stopnia doktora, ukazały się jako, wymienione wcześniej, rozdziały w książkach [7, 8, 9 w Z6]. 2 referaty wygłoszone na konferencjach krajowych, po uzyskaniu stopnia doktora, ukazały się jako, wymienione wcześniej, artykuły [31, 35 w Z6].

W tabeli 6 zestawilem i podsumowałem prace punktowane przez MNiSW wraz ze wskaźnikami *impact factor* i informacją o liczbie Autorów, opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora, poza cyklem publikacji powiązanych tematycznie.

Tabela 6. Zestawienie publikacji punktowanych przez MNiSW, wskaźników *impact factor* i liczby Autorów, opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora, poza cyklem publikacji powiązanych tematycznie

Lp.	Czasopismo	Pozycja w załączniku Z6	Rok	Liczba Autorów	Punktacja MNiSW	<i>Impact Factor</i>
1	Inżynieria i Budownictwo	3	2006	2	6	-
2	Journal of Civil Engineering and Management *	5	2006	2	2	-
3	Materiały Budowlane	6	2006	4	6	-
4	Materiały kompozytowe w budownictwie mostowym	7	2006	3	2	-
5	Materiały Budowlane	21	2010	1	6	-
6	Journal of Materials Science and Engineering	22	2010	2	2	-
7	Inżynieria i Budownictwo	23	2010	1	6	-
8	Archives of Civil and Mechanical Engineering	24	2011	2	20	0,855
9	Kompozyty	25	2011	1	9	-
10	Przegląd Budowlany	26	2011	2	6	-
11	Inżynieria i Budownictwo	27	2011	1	6	-
12	Composites. Part B: Engineering	28	2012	3	45	2,143
13	Przegląd Elektrotechniczny	29	2012	2	15	-
14	Journal of Civil Engineering and Management	30	2012	2	50	2,016
15	Przegląd Budowlany	31	2012	3	3	-
16	Materiały Budowlane	38	2014	2	6	-
17	Materiały Budowlane	39	2014	4	6	-
18	Materiały Budowlane	40	2014	3	6	-
19	Composites. Part B: Engineering	42	2015	3	40	2,983
20	Materiały Budowlane	43	2015	3	6	-
28	Materiały Budowlane	44	2015	3	6	-
Razem:					<b>254</b>	<b>7,997</b>

\* Journal of Civil Engineering and Management znajduje się w bazie JCR od 2009 r.

13 publikacji jest samodzielnych, w tym 7 wchodzących w skład cyklu publikacji powiąza-

nych tematycznie. Pozostałych 31 publikacji jest współautorskich.

Na chwilę obecną (lipiec 2015 r.) zgłosiłem 2 artykuły na XV Konferencję „Zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, obiekty przemysłowe oraz hydrotechniczne”, Karpacz 19-21.10.2015 r. Artykuły opublikowane zostaną w nr 9/2015 czasopisma Materiały Budowlane. Zgłosiłem 1 artykuł do nr 10/2010 czasopisma Materiały Budowlane, które zostanie wydany z okazji 70-lecia jubileuszu Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Ponadto, po uzyskaniu stopnia doktora, jestem autorem lub współautorem 13 prac niepublikowanych: 1 raportu Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej serii PRE, 6 raportów Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej serii SPR i 5 raportów Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej serii U (Z5, pkt. II, ppkt. F).

W załącznikach 5 przedstawiłem szczegółowy wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informację o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki, po uzyskaniu stopnia doktora.

Z kolei w załączniku 6 zestawiałem publikacje z rozbiciem na te opublikowane po i przed uzyskaniem stopnia doktora, z podaniem informacji o roku publikacji, punktacji MNIŚW, obecności w bazie Journal Citation Reports (JCR) oraz o wysokości wskaźnika *impact factor* według roku publikacji. W tym samym załączniku zestawiałem liczbę cytowań publikacji po i przed uzyskaniem stopnia doktora według trzech baz – *Web of Science*, *Scopus* i *Publish or Perish*, z podziałem na cytowania własne i obce.

W Tabelach 7 i 8 zestawiałem odpowiednio – liczbę cytowań i indeks Hirsha według trzech baz – *Web of Science*, *Scopus* i *Publish or Perish*.

Tabela 7. Liczba cytowań (stan na 06.07.2015 r.)

Lp.	#	Baza <i>Web of Science</i>	Baza <i>Scopus</i>	Baza <i>Publish or Perish</i>
1	Liczba publikacji zawartych w bazie	10	14	33
2	Liczba wszystkich cytowań	44	67	156
3	Liczba cytowań własnych	22	33	107
4	Liczba cytowań obcych	22	34	49

Tabela 8. Indeks Hirscha (stan na 06.07.2015 r.)

Lp.	#	Baza <i>Web of Science</i>	Baza <i>Scopus</i>	Baza <i>Publish or Perish</i>
1	Liczba publikacji zawartych w bazie	10	14	33
2	Indeks Hirscha	5	5	7

Sumaryczny *impact factor* według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **24,465**, w tym za publikacje wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie **16,468**, a za pozostałe publikacje poza cyklem **7,997**. Sumaryczna liczba punktów według punktacji MNIŚW wynosi **497**, w tym za publikacje wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie **243**, a za pozostałe publikacje poza cyklem **254**.

Po uzyskaniu stopnia doktora uczestniczyłem w realizacji trzech projektów badawczych

(Z5, pkt. II, ppkt. J):

1. Grant Komitetu Badań Naukowych (N506 039 32/4179), który realizowałem w okresie 10.04.2007 – 09.04.2009 r. jako wykonawca,
2. Grant Prorektora ds. Badań Naukowych i Współpracy z Gospodarką Politechniki Wrocławskiej, który realizowałem samodzielnie w latach 2007-2008,
3. Grant Prorektora ds. Badań Naukowych i Współpracy z Gospodarką Politechniki Wrocławskiej, który realizowałem samodzielnie w okresie 22.10.2008 – 15.12.2009 r.

W 2006 r. otrzymałem nagrodę JM Rektora Politechniki Wrocławskiej za rozprawę doktorską. W latach 2012, 2013 i 2014 otrzymywałem nagrody JM Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność Uczelni, w tym za działalność naukową.

Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 4 referaty na konferencjach międzynarodowych i uczestniczyłem z 5 innymi referatami w konferencjach międzynarodowych. Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 5 referatów na konferencjach krajowych i uczestniczyłem z 5 innymi referatami w konferencjach krajowych (Z5, pkt. II, ppkt. L).

Na chwilę obecną (lipiec 2015 r.) zgłosiłem 1 referat na oficjalną konferencję *The International Institute for FRP in Construction IIFC – APFIS 2015/FRPRCS-12*, która odbędzie się w Nanjing w Chinach, w dniach 14-16.12.2015 r.

W ramach współpracy z przemysłem, od roku 2010 prowadzę badania i analizy nad zastosowaniem kompozytów PBO-FRCM do wzmacniania elementów z betonu. Badania są realizowane wieloetapowo. Jestem kierownikiem tych projektów. Efektem tych prac jest cykl publikacji powiązanych tematycznie (Z5, pkt. III, ppkt. F).

Opracowywałem recenzje artykułów dla czasopism z bazy JCR: Journal of Civil Engineering and Management – 1 recenzja, Construction and Building Materials – 3 recenzje, Composites. Part B: Engineering – 2 recenzje, Engineering Structures – 2 recenzje oraz czasopisma zagranicznego spoza bazy JCR: Structural Engineering International – 1 recenzja. Ponadto opracowałem 1 recenzję artykułu dla czasopisma krajowego Materiały Budowlane oraz kilka recenzji na konferencje krajowe (Z5, pkt. III, ppkt. P).

W kwietniu 2015 r. zostałem zaproszony do grona recenzentów Civil Engineering and Architecture (ISSN: 2332-1121).

Sprawuję opiekę naukową nad doktorantką mgr inż. Dorotą Urbańską, która realizuje pracę doktorską w Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mieczysława Kamińskiego (Z5, pkt. III, ppkt. K).

## **6.2. Działalność dydaktyczna**

Prowadzę następujące formy zajęć dydaktycznych na studiach stacjonarnych i niestacjonar-

nych, pierwszego i drugiego stopnia: wykłady, ćwiczenia projektowe i laboratoryjne, seminaria, z przedmiotów, takich jak: Konstrukcje betonowe – podstawy, Konstrukcje betonowe – elementy i hale, Konstrukcje betonowe – obiekty, Awarie i naprawy konstrukcji betonowych, Technologia robót betonowych.

Opracowałem programy kursów: Konstrukcje betonowe – podstawy na studiach I stopnia stacjonarnych i Konstrukcje betonowe – podstawy na studiach I stopnia niestacjonarnych. Na kursie: Awarie i naprawy konstrukcji betonowych przekazuję studentom najnowszą wiedzę na temat napraw i wzmocnień kompozytowych, zarówno tą pozyskaną z literatury, jak i własnych doświadczeń badawczych i inżynierskich.

Byłem promotorem łącznie 40 prac dyplomowych na Jednolitych Studiach Magisterskich, Uzupełniających Studiach Magisterskich, zaocznych studiach inżynierskich, stacjonarnych studiach pierwszego stopnia i stacjonarnych studiach drugiego stopnia. Opracowałem kilkanaście recenzji prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich.

W roku 2013 i 2014 dwójka moich Dyplomantów została uhonorowana nagrodami za pracę dyplomową w konkursach organizowanych przez Oddział Wrocławski Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, pod patronatem Dziekana Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Wypromowałem troje dyplomantów, którzy kontynuują studia na studiach doktoranckich.

### **6.3. Działalność organizacyjna**

Od 2008 r. jestem członkiem *The International Institute for FRP in Construction* IIFC, a od 2007 r. jestem członkiem *Polish Group The International Institute for FRP in Construction* PG IIFC. Od czerwca 2013 r. uczestniczę w międzynarodowym projekcie COST Action TU 1207 „Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction”.

Brałem udział w pracach 6 komitetów naukowych konferencji krajowych (Z5, pkt. III, ppkt. C):

1. w 3 jako sekretarz i członek: Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2012, II Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2013, III Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziałów Budownictwa KONstruktor2015 – Szklarska Poręba 2015.
2. w 2 jako sekretarz: XIII Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze” – Szklarska Poręba 2007, XV Konferencja „Zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, obiekty przemysłowe i hydrotechniczne” – Karpacz 2015.
3. w 1 jako członek: Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana BUDMIKA 2014 – Poznań 2014.

Brałem udział w pracach 7 komitetów organizacyjnych konferencji krajowych (Z5, pkt. III, ppkt. C):

1. w 3 jako przewodniczący: Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2012, II Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2013, III Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziałów Budownictwa KONstruktor2015 – Szklarska Poręba 2015.
2. w 2 jako vice przewodniczący: XIV Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, kominy przemysłowe oraz obiekty hydrotechniczne” – Karpacz 2012, XV Konferencja „Zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, obiekty przemysłowe i hydrotechniczne” – Karpacz 2015.
3. w 2 jako członek: XIII Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze” – Szklarska Poręba 2007, Konferencja „Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich” – Karpacz 2013.

Uczestniczyłem w organizowaniu Seminariów Naukowo-Technicznych Zakładu i Katedry Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

W latach 2012, 2013 i 2014 otrzymałem nagrody JM Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność Uczelni.

Byłem współredaktorem materiałów konferencyjnych z 4 konferencji krajowych (Z5, pkt. III, ppkt. G):

1. Seminarium Naukowo-Technicznego Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej „Wzmacnianie i naprawa konstrukcji betonowych oraz obiektów budownictwa ogólnego” – Boszkowo 2005,
2. Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2012,
3. II Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej – Szklarska Poręba 2013,
4. III Konferencja Studentów i Doktorantów Wydziałów Budownictwa KONstruktor2015 – Szklarska Poręba 2015.

Jestem członkiem Rady Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w kadencji 2012-2016, jako przedstawiciel nauczycieli akademickich nie będący prof. lub dr hab.

Jestem przedstawicielem Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w międzywydziałowym Centrum Naukowym Zrównoważonego Kształtowania Środowiska Zbudowanego.

Jestem Koordynatorem ds. Promocji na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Poli-

techniki Wrocławskiej w okresie 01.10.2012-31.08.2016 r.

Od 2010 r. jestem opiekun Koła Naukowego KONKRET przy Zakładzie Konstrukcji Betonowych na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Organizowałem wyjazdy seminaryjne (szkoły naukowe) i techniczne Koła Naukowego KONKRET w marcu 2011 r., we wrześniu 2012 r., w grudniu 2012 r., w maju 2013 r., w czerwcu 2014 r. i w lipcu 2015 r.

Byłem opiekunem drużyny reprezentującej Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w I (2012 r.) i II (2013-2014 r.) edycji Uniwersytetu Betonu Grupy Górażdże.

Dwukrotnie, w roku 2012 i 2014 prowadziłem warsztaty techniczne „Człowiek – najlepsza inwestycja” dla uczniów szkół średnich w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

W 2013 r. byłem opiekunem stoiska Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej na Targach Budownictwa TARBUd we Wrocławiu.

W latach 2013, 2014 i 2015 organizowałem Dni Otwarte na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

#### **6.4. Działalność inżynierska**

W ramach działalności inżynierskiej zajmowałem się badaniami materiałów i konstrukcji budowlanych. Były to prace laboratoryjne, jak również *in situ*. Jestem autorem lub współautorem raportów z badań laboratoryjnych, a także ekspertyz i opinii technicznych. Jestem współautorem projektów wzmocnień żelbetowych elementów konstrukcyjnych, za pomocą materiałów kompozytowych CFRP. Uczestniczyłem w pracach zespołów projektowych obiektów mieszkalnych, użyteczności publicznej a także obiektów przemysłowych (Z5, pkt. III, ppkt. M).

Szczegółowy wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki został zawarty w załączniku 5 (Z5).

