



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

**RADA NAUKOWA DYSCIPLINY INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Paweł Majkowski

**Badanie elementów betonowych z zbrojeniem
stalowym i kompozytowym wysokich
wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i
dynamicznym**

***Examination of concrete elements with high
strength steel and composite reinforcement
under static and dynamic load***

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCIPLINA: INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

PROMOTOR PRACY

dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. PBŚ

Politechnika Bydgoska

PROMOTOR POMOCNICZY

dr hab. inż. Jarosław Górecki

Politechnika Bydgoska

Bydgoszcz, rok 2025

Źródło finansowania

Doktorat wdrożeniowy, wg umowy nr DWD/5/0263/2021

Podziękowania

Serdeczne podziękowania kieruję do osób, które w sposób szczególny przyczyniły się do powstania niniejszej rozprawy:

Panu dr hab. inż. Maciejowi Dutkiewiczowi prof. PBŚ – za wkład czasu i pracy jaki poświęcił w cały cykl realizacji mojego doktoratu oraz za liczne merytoryczne wskazówki i rady.

Panu dr hab. inż. Jarosławowi Góreckiemu – za wsparcie w realizacji niniejszej rozprawy.

Panu mgr inż. Mariuszowi Hurylskiemu – który jako mój szef i opiekun pomocniczy z ramienia Budimex S.A. wykazał się dużym wsparciem i zrozumieniem w umożliwieniu mi pogodzenia pracy zawodowej i działalności naukowej.

Mojej żonie Magdalenie i dzieciom Róży i Franciszkowi, którzy wspierali mnie przez cały okres studiów doktoranckich i dzielnie znosili wszelkie trudności związane z ich realizacją.

Rodzicom – Celinie i Piotrowi Majkowskim, za ukształtowanie mojej edukacji w sposób, który umożliwił mi stworzenie niniejszej rozprawy doktorskiej.

WYKAZ SKRÓTÓW, SYMBOLI I JEDNOSTEK

(główne skróty, symbole, jednostki)

Symbole zgodnie z PN-EN 1992-1-1 :

- A_{s1} - pole przekroju zbrojenia rozciąganego, [m²];
- A_{s2} - pole przekroju zbrojenia ściskanego, [m²];
- f_{yd} - obliczeniowa wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, $\left[\frac{N}{m^2}\right]$;
- σ_{cs} - naprężenia ściskające w zbrojeniu ściskanym, można przyjmować $\sigma_{cs} = f_{yd}$;
- d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju, [m];
- b - szerokość przekroju zginanego, [m];
- η - współczynnik określający efektywną wytrzymałość betonu, określany zgodnie z PN-EN 1992-1-1 3.1.7(3), [-];
- f_{cd} - obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie, [N/m²],
- M_{Rd} – moment niszczący, [kNm]
- M_a – moment powodujący ugięcie, [kNm]
- M_{crack} – moment powodujący zarysowanie, [kNm]
- F_N – siła niszcząca, [kN]

Symbole zgodnie z ACI 440.1R-15 :

- φ – współczynnik redukcji nośności [-];
- A_f – pole przekroju zbrojenia [mm²];
- d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];
- β_1 – współczynnik redukcyjny zgodnie z ACI 440.1R-15 [-];
- c_b – odległość osi obojętnej do górnej krawędzi przekroju [mm];
- h – wysokość płyty [mm]
- $\varnothing$ – średnica pręta zbrojeniowego GFRP [mm]
- c – otulina zbrojenia GFRP [mm]

d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];
 ε_{CU} – graniczne odkształcenie betonu [-],
 ε_{fU} – projektowane odkształcenie przy zerwaniu zbrojenia FRP [-],
 C_E – środowiskowy współczynnik redukcyjny (uzależniony od czynników środowiskowych i warunków ekspozycji) [-];
 f_{fu}^* - wytrzymałość na rozciąganie pręta FRP [MPa];
 f_{fu} - projektowa wytrzymałość na rozciąganie FRP, zdefiniowana jako gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie pomnożona przez współczynnik redukcji środowiskowej [MPa];
 E_f – moduł sprężystości zbrojenia FRP przy rozciąganiu [MPa];
 ρ_f – stopień zbrojenia kompozytowego [%]
 ρ_{fb} – zrównoważony stopień zbrojenia kompozytowego [%]
 b – szerokość przekroju [mm].
 f_c' – wytrzymałość betonu na ściskanie, oznaczona na próbce walcowej [MPa],
 f_f – napężenie występujące w zbrojeniu FRP w strefie rozciąganej [MPa]
 M_n – nominalna wytrzymałość na zginanie [kNm];
 $M_u(\phi M_n)$ – obliczeniowa wytrzymałość na zginanie [kNm];
 M_a – moment powodujący ugięcie, [kNm]
 M_{cr} – moment powodujący zarysowanie, [kNm]

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	13
1.1. WPROWADZENIE	13
1.2. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	14
2. ANALIZA LITERATURY	16
2.1. KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ W ZAKRESIE ZBROJEŃ WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI.....	16
2.2. ZBROJENIA KOMPOZYTOWE.....	18
2.2.1. Zbrojenia kompozytowe – właściwości materiałowe.....	18
2.2.2. Właściwości materiałowe prętów GFRP	23
2.2.3. Badania wytrzymałościowe prętów GFRP	31
2.2.4. Badania płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia GFRP	39
2.2.5. Badania płyt betonowych z zastosowaniem pozostałych zbrojeń FRP.....	48
2.2.6. Badania innych elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP	51
2.3. STAL ZBROJENIOWA WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI B600B.....	55
2.4. BETON	57
2.4.1 Domieszki włókien do betonu – właściwości materiału i przebieg badania	57
2.5. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY	62
3. HIPOTEZA BADAWCZA, CEL I ZAKRES BADAŃ.....	65
3.1. HIPOTEZA BADAWCZA	65
3.2. CEL I ZAKRES BADAŃ	65
4. MATERIAŁY I METODY BADAŃ.....	67
4.1. ZBROJENIE STALOWE B600B, ZBROJENIE KOMPOZYTOWE GFRP ..	67
4.2. BETON	71
4.3. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA STALOWEGO B600B	73

4.3.1. Opis płyt poddanych badaniu	73
4.3.2. Opis procedury obliczeniowej	74
4.3.3. Opis stanowiska badawczego	77
4.3.4. Procedura badań wytrzymałościowych	78
4.4. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA KOMPOZYTOWEGO GFRP	80
4.4.1. Opis płyt poddanych badaniu	80
4.4.2. Opis procedury obliczeniowej	82
4.4.2.1. Obliczeniowa teoretyczna wytrzymałość na zginanie	83
4.4.2.2. Obliczeniowy teoretyczny moment rysujący	89
4.4.2.3. Obliczeniowe teoretyczne ugięcie	90
4.4.3. Opis stanowiska badawczego	95
4.4.4. Procedura badań wytrzymałościowych	96
5. WYNIKI	99
5.1. ZBROJENIE	99
5.2. BETON	101
5.3. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA KOMPOZYTOWEGO GFRP – PŁYTY SERII IV-VI	102
5.3.1. Charakter zniszczenia i nośność płyt - płyty serii IV-VI	102
5.3.2. Odkształcenia i zarysowania płyt	102
5.3.2.1. Przebieg badania	102
5.3.2.2. Płyty serii IV, V	102
5.3.3.3. Płyty serii VI	108
5.3.4. Porównanie wyników obliczeń nośności z wynikami eksperymentu – płyty serii IV-VI	111
5.4. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA B600B – PŁYTY SERII I-III	112
5.4.1. Charakter zniszczenia i nośność płyt – płyty serii I-III	112
5.4.2. Ugięcia płyt – płyty serii I-III	114
5.4.3. Zarysowania płyt – płyty serii I-III	116

5.4.4. Porównanie wyników obliczeń nośności z wynikami eksperymentu – płyty serii I-III	118
5.4.5. Praca płyt betonowych z zastosowaniem stali B600B pod obciążeniem dynamicznym.	119
5.4.5.1. Charakterystyka płyty	119
5.4.5.2. Ugięcia i zarysowania	119
5.4.5.3. Obserwacja odpowiedzi dynamicznej płyty S100-4 pod obciążeniem impulsowym	122
6. Dyskusja	126
6.1. Konfrontacja wyników eksperymentalnych z analizami teoretycznymi	126
6.2. Wpływ właściwości materiałowych na zachowanie elementów	128
6.3. Kierunki walidacji procedur obliczeniowych i dalszych badań	129
7. Podsumowanie i wnioski	131
7.1. Kluczowe wyniki i ich interpretacja	131
7.1.1. Elementy zbrojone stalą B600B	131
7.1.2. Elementy zbrojone kompozytem GFRP	133
7.1.3. Odpowiedź na cele badawcze i postawione hipotezy	136
7.1.4. Wkład w rozwój dyscypliny i oryginalność pracy	137
7.1.5. Kierunki dalszych badań	139
7.1.6. Potencjał wdrożeniowy badań	140
8. Literatura	141
9. Załączniki	151

STRESZCZENIE

Badanie elementów betonowych z zbrojeniem stalowym i kompozytowym wysokich wytrzymałości pod obciążeniem statycznym i dynamicznym

mgr inż. Paweł Majkowski

Słowa kluczowe: zbrojenie, beton, stal, kompozyt GFRP

Podstawę kształtowania obiektów inżynierskich stanowią konstrukcje żelbetowe. Do ich wznoszenia, stosuje się najczęściej stal zbrojeniową, która jednak w przypadku niektórych obiektów wymaga rozważania rozwiązań alternatywnych w postaci zbrojenia wysokich wytrzymałości, z których szerokiej gamy do szczegółowej analizy w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej wybrano marginalnie stosowane w konstrukcjach żelbetowych zbrojenie kompozytowe na bazie włókien szklanych – GFRP oraz wchodzącą na rynek stal zbrojeniową wysokiej wytrzymałości B600B.

Przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej eksperymentalne badania niszczące i nieniszczące elementów betonowych z zastosowaniem ww. materiałów w istotnym stopniu uzupełniają stan wiedzy w zakresie zachowania elementów pod obciążeniem zginającym. Użycie w realizowanych badaniach technologii „digital image correlation” stanowi nowatorskie podejście do monitorowania pracy konstrukcji pod obciążeniem i dostarcza szczegółowych wyników prowadzących do poszerzenia stanu wiedzy w tym zakresie.

Główny problem badawczy, określony w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej został zdefiniowany jako weryfikacja metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości – B600 B i GFRP.

Jako przedmiot badań określono płyty betonowe o wymiarach 200x50 mm i grubościach od 8 do 12 cm, zbrojone prętami kompozytowymi GFRP oraz stalą B600B. Wybór płyt betonowych jako głównego obiektu badań podyktowany był m.in.:

- dużą popularnością elementów płytowych w budownictwie – w szczególności jako fragmentów stropów,
- możliwością weryfikacji współpracy betonu z zbrojeniami wysokiej wytrzymałości,
- możliwością weryfikacji wpływu aplikacji domieszki włókien do betonu na poprawę parametrów elementu w zakresie rozwoju rys i ugięć.

Kolejno, dokonano rozpoznania badawczego właściwości materiałów wsadowych do docelowych próbek – tj. parametrów zbrojenia zarówno

kompozytowego jak i stali wysokiej wytrzymałości dokonując prób rozciągania oraz betonu wykonując badania wytrzymałości na ściskanie.

Następnie, korzystając z dedykowanego dla tego celu stanowiska badawczego przygotowane pełnowymiarowe próbki płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości poddano badaniom niszczącym i nieniszczącym.

W końcowej fazie badań, wybrane wyniki eksperymentalne porównano z wynikami obliczeń uzyskanymi według dostępnych norm i instrukcji, celem konfrontacji założeń teoretycznych z wynikami eksperymentów.

Przeprowadzone badania dostarczyły następujących danych:

- dla stosowania zbrojenia stalowego B600B :
 1. Stwierdzono bardzo dobre parametry wytrzymałościowe zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości B600B.
 2. Stwierdzono bardzo dobrą przyczepność stali B600B do betonu.
 3. Stwierdzono znaczne zapasy nośności w wyliczeniach teoretycznych opartych o dostępne normy w stosunku do wyników uzyskanych eksperymentów.
 4. Dokonano obserwacji modelu zniszczenia płyt.
- dla stosowania zbrojenia kompozytowego GFRP:
 1. Płyty zbrojone prętami GFRP wykazały w trakcie prób obciążeniowych zachowanie charakteryzujące się liniowo-sprężystą pracą.
 2. Zaobserwowano znaczne zapasy nośności zbrojenia GFRP w stosunku do wyliczeń teoretycznych.
 3. Zniszczenie płyt nastąpiło poprzez utratę nośności betonu w strefie ściskanej, a nie poprzez zerwanie zbrojenia GFRP.
 4. W trakcie badań wytrzymałościowych jednej z partii zbrojenia GFRP zaobserwowano niższe niż deklarowane przez producenta parametry wytrzymałościowe.
 5. Literatura wskazuje w licznych publikacjach na potencjalną dużą wrażliwość zbrojeń FRP (w tym również GFRP) na podwyższone temperatury i środowiska alkaliczne.
 6. Stwierdzono występowanie znacznych zarysowań i ugięć,
 7. Stwierdzono, że zwiększenie klasy betonu i stosowanie domieszki włókiem np. LPPF podnosi parametry płyty.

ABSTRACT

Examination of concrete elements with high strength steel and composite reinforcement under static and dynamic load

master of science eng. Paweł Majkowski

Key words: reinforcement, concrete, steel, GFRP composite

The basis for the formation of engineering objects are reinforced concrete structures. For their construction, reinforced steel is most often used, but in the case of some objects, alternative in terms of high-strength reinforcements, from which a wide range of marginally used in reinforced concrete structures glass fiber-based composite reinforcement - GFRP and high-strength reinforcing steel B600B entering the market were selected for detailed analysis within the framework of this doctoral thesis.

The experimental research conducted as part of this doctoral thesis with us of mentioned materials, significantly complements the state of knowledge regarding the behavior of elements under bending loads. The use of "digital image correlation" technology in the conducted research represents an innovative approach to monitoring the operation of structures under load and provides detailed results that contribute to expanding the state of knowledge in this area.

The main research problem, defined in the framework of this doctoral thesis, was defined as verification of methods of dimensioning and modeling of concrete elements with the use of high-strength reinforcement – B600 B and GFRP.

The research subject was defined as concrete slabs with dimensions of 200x50 mm and thicknesses from 8 to 12 cm, reinforced with GFRP composite rods and B600B steel. The choice of concrete slabs as the main object of research was dictated by, among others:

- the widespread use of slab elements in construction, ,
- the possibility of verifying the cooperation of high-strength concrete and reinforcement,
- the possibility of verifying the impact of fiber admixture applications on concrete on the improvement of the element's parameters in terms of crack development and deflection.

Next, the research properties of the material used for the target samples were identified, i.e., the parameters of reinforcement of both composite and high-strength steel, by performing tensile tests, and the concrete by performing compression strength tests.

Next, using a research station dedicated to this purpose, full-scale samples of concrete slabs with high-strength reinforcement were subjected to destructive and non-destructive tests.

In the final phase of the research, selected experimental results were compared with the results of calculations obtained according to available standards and instructions, in order to confront theoretical assumptions with the results of experiments.

Conducted experiments gathered following data:

- for use with B600B steel reinforcement:

1. The strength parameters of high-strength steel reinforcement B600B were found to be very good.

2. The adhesion of B600B steel to concrete was found to be very good.

3. Significant load capacity reserves were found in theoretical calculations based on available standards in relation to the results of experiments.

4. The model's plate failure was observed.

- for use with GFRP composite reinforcement:

1. Reinforced GFRP plates showed linear-elastic behavior .

2. Load reserves of GFRP were observed in relation to theoretical calculations.

3. Destruction of the slabs occurred through the loss of concrete bearing capacity in the compressed zone, not through the rupture of GFRP reinforcement.

4. During the strength tests of one batch of GFRP reinforcement, lower strength parameters than those declared by the manufacturer were observed.

5. Literature points to the potential high sensitivity of FRP (including GFRP) reinforcements to elevated temperatures and alkaline environments in numerous publications.

6. Significant scratches and deflections were observed.

7. It was found that increasing the grade of concrete and using a fiber admixture, such as LPPF, rises the parameters of the slab..

1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE

Dominującą rolę wśród materiałów konstrukcyjnych w światowym przemyśle budowlanym odgrywają konstrukcje realizowane z zastosowaniem betonu, stali i drewna. Elementy betonowe w zastosowaniu konstrukcyjnym występują najczęściej jako żelbetowe, z uwagi na korzyści jakie płyną z dobrej współpracy materiału o wysokiej wytrzymałości na ściskanie jakim jest beton oraz stali zbrojeniowej charakteryzującej się dobrą wytrzymałością na rozciąganie – to połączenie poprzez właściwe kształtowanie i projektowanie konstrukcji żelbetowych (w tym również detali zbrojeniowych) w elementach budynków i budowli pozwala na efektywne przenoszenie znacznych sił.

Rosnące wymagania architektoniczne oraz użytkowe, sprawiają, że co raz częściej przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych zachodzi konieczność poszukiwania rozwiązań alternatywnych do klasycznie stosowanej stali zbrojeniowej, pozwalających na osiąganie parametrów wytrzymałościowych przewyższających możliwości klasycznie stosowanej stali zbrojeniowej. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie są zbrojenia wysokiej wytrzymałości takie jak:

- zbrojenia stalowe wysokiej wytrzymałości – przedmiotem rozważań ujętych w niniejszej rozprawie doktorskiej jest stal B600B
- zbrojenia kompozytowe wysokiej wytrzymałości – przedmiotem rozważań ujętych w niniejszej rozprawie doktorskiej jest zbrojenie kompozytowe na bazie włókien szklanych GFRP.

Wybór ww. materiałów jako przedmiotu rozprawy doktorskiej podyktowany był m.in.:

- niską popularnością obu materiałów w przemyśle budowlanym – stal B600B jest obecnie w fazie wdrażania na rynku, a zbrojenia GFRP nie są powszechnie stosowane mimo wieloletniej dostępności,

- dużym potencjałem przedmiotowych materiałów w zakresie konstruowania elementów żelbetowych o wysokiej wytrzymałości,

- dużym potencjałem wdrożeniowym przedmiotowych materiałów w zakresie elementów stropowych, gdzie wyzwaniem dla branży jest przenoszenie dużych obciążeń, przy jednoczesnym minimalizowaniu ze względów architektonicznych ilości podpór,

- możliwością badawczego rozpoznania szeroko opisywanych w literaturze negatywnych efektów występowania znaczących ugięć i zarysowań w pracy elementów zbrojonych kompozytem pod obciążeniem oraz określeniem

możliwości redukcji tych efektów poprzez m.in. stosowanie domieszki włókien do betonu,

- możliwością wykorzystania w konstruowaniu obiektów nie tylko wysokich parametrów wytrzymałościowych, ale również innych właściwości materiałowych dotyczących w szczególności zbrojeń kompozytowych takich jak np. podwyższona odporność na korozję czy obojętność elektromagnetyczna.

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej są rozważania w zakresie stosowania zbrojeń wysokiej wytrzymałości stosowanych jako zbrojenie główne w elementach żelbetowych, bazując na następujących podstawach:

- przeglądzie literatury przedmiotu, z wykorzystaniem w szczególności aktualnych źródeł wiedzy,
- eksperymentalnym określeniu właściwości zbrojeń wysokiej wytrzymałości – zarówno stali B600B jak i zbrojenia GFRP,
- analitycznym określeniu parametrów wytrzymałościowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości – zarówno stali B600B jak i zbrojenia GFRP,
- eksperymentalnym określeniu parametrów wytrzymałościowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości – zarówno stali B600B jak i zbrojenia GFRP (w tym również z domieszką włókien do betonu).

1.2. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozdział 1 dotyczy wprowadzenia do zagadnienia będącego przedmiotem niniejszej rozprawy.

Rozdział 2 obejmuje analizę literatury przedmiotu w zakresie zagadnień dotyczących zbrojeń wysokiej wytrzymałości. Przede wszystkim, dokonuje się wprowadzenia do zagadnienia poprzez analizę literatury o charakterze przeglądowym traktującej w szczególności o właściwościach i możliwych zastosowaniach tego rodzaju materiałów w różnych warunkach pracy lub środowiskowych (przede wszystkim dot. zbrojenia kompozytowego). Kolejno dokonuje się analizy literatury w zakresie badań wytrzymałościowych – zarówno samych prętów jak i pełnowymiarowych elementów betonowych (z szczególnym naciskiem w zakresie badań płyt), w tym również z odniesieniem do literatury dotyczącej obliczeń teoretycznych w oparciu o dostępne instrukcje i normy. Omawia się również stałość właściwości zbrojenia kompozytowego w różnych zmiennych warunkach (np. zmian temperatur lub starzenia) oraz dokonuje się przeglądu literatury w zakresie stosowania włókien w elementach betonowych i wpływu ich aplikacji na różne parametry konstrukcji.

Rozdział 3 prezentuje hipotezę badawczą, cel i zakres badań. W ramach rozdziału przedstawia się główne zagadnienia objęte przedmiotem pracy, formułuje się

zarówno główny jak i pomocnicze cele badawcze, a także wskazuje się zakres badań będących przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej. Określa się również zakres w jakim przyjęte rozważania winny zostać uznane za oryginalne oraz podkreśla się zakres w jakim niniejsza rozprawa doktorska stanowi wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

Rozdział 4 omawia materiały i metody badań użyte w części eksperymentalnej – z szczególnym uwzględnieniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości – odpowiednio stali B600B oraz zbrojenia kompozytowego GFRP, opisując jednocześnie pozostałe materiały wykorzystane w badaniach tj. beton, włókna polipropylenowe. Prezentuje się także konstrukcję stanowiska badawczego wykorzystanego w próbach wytrzymałościowych płyt betonowych, omawiając jednocześnie procedurę badawczą wg której zrealizowano badania płyt. Prowadzi się obliczenia teoretyczne nośności płyt w oparciu o dostępne normy i instrukcje, w zakresie nośności, ugięć, zarysowań.

Rozdział 5 stanowi zestawienie i podsumowanie wyników badań w zakresie wszystkich przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej eksperymentów – w zakresie zarówno materiałów wsadowych (stali wysokiej wytrzymałości B600B, zbrojenia GFRP, betonu) jak również pełnowymiarowych płyt żelbetowych będących przedmiotem badań zasadniczych. Wyniki prezentuje się zarówno w formie tabelarycznej jak i wykresów obrazujących zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami. Prowadzi się porównanie wybranych danych uzyskanych w toku eksperymentów z przeprowadzonymi obliczeniami teoretycznymi.

Rozdział 6 stanowi omówienie uzyskanych wyników w odniesieniu do postawionej hipotezy badawczej oraz przeprowadzonej analizy teoretycznej poszczególnych wariantów wykonania prefabrykowanych płyt żelbetowych.

Rozdział 7 prezentuje podsumowanie rozważań objętych przedmiotem niniejszej pracy doktorskiej łączące aspekty wynikające z dokonanego rozpoznania literaturowego, analizy teoretycznej oraz przeprowadzonych eksperymentów, w efekcie czego formułuje się końcowe wnioski.

2. ANALIZA LITERATURY

2.1. KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ W ZAKRESIE ZBROJEŃ WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

W związku z nieustającą dominującą rolą konstrukcji stalowych i żelbetonowych jako wiodących materiałów konstrukcyjnych na świecie, która w obliczu wyzwań nie tylko architektonicznych, ale również czysto użytkowych stawia zadanie poszukiwania i optymalizowania metod wykorzystania materiałów mogących stanowić alternatywę dla standardowo stosowanych i dobrze rozpoznanych materiałów. Przedmiotem niniejszego przeglądu literatury są alternatywne w stosunku do klasycznej stali metody zbrojenia betonu – z szczególnym podkreśleniem dwóch rodzajów materiałów – zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych (GFRP) oraz zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości – stali B 600 B.

Dokonując przeglądu literatury zagadnienia zbrojenia kompozytowego – jako alternatywy dla klasycznie stosowanej stali zbrojeniowej, zauważyć należy, że jest to zagadnienie obecnie szeroko badane na całym świecie pozostawiające nadal szerokie pole do analiz, optymalizacji, poszukiwania właściwych procedur obliczeniowych itd., mimo że zgodnie z [1] zbrojenie kompozytowe było dostępne rynkowo w późnych latach 80 XX wieku, jako odpowiedź na rynkowy popyt na zbrojenie obojętne elektromagnetycznie. Jedne z najwcześniejszych źródeł literaturowych dowodzących zainteresowanie branży tym zagadnieniem i w efekcie rozpoznanie badawcze i teoretyczne właściwości zbrojenia kompozytowego jako alternatywy dla klasycznie stosowanej stali było prowadzone w latach 90 XX wieku czego odzwierciedleniem są publikacje traktujące ogólnie o zbrojeniu kompozytowym [2,3] oraz publikacje odnoszące się do zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych GFRP [4-6], w których autorzy wskazywali na duży potencjał tego rodzaju zbrojeń z uwagi m.in. na właściwości takie jak bardzo dobra odporność na korozję.

Prowadzone w ostatnich latach w różnych ośrodkach rozsianych po całym świecie badania, skupiają się na określeniu możliwości stosowania zbrojenia kompozytowego na dużą skalę jako realnej alternatywy dla rozwiązań standardowych. Najważniejsze obszary badawcze dotyczące zbrojenia FRP to m.in. określanie, weryfikacja i optymalizacja procedur obliczeniowych, określanie parametrów odporności ogniowej, określanie sposobu pracy i modelu zniszczenia elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi, określenie zachowania zbrojenia FRP w trudnych warunkach środowiskowych (ryzyko korozji lub ekspozycji na czynniki chemiczne). W przeciwieństwie do klasycznych konstrukcji betonowych, których sposób projektowania i wykonywania jest szeroko opisany i usystematyzowany w licznych normach, instrukcjach i podręcznikach [7-18], w zakresie zbrojeń kompozytowych występują jednostkowe normy lub instrukcje krajowe stanowiące podstawę do

projektowania elementów betonowych z wykorzystaniem zbrojeń kompozytowych [19-23], w których przedstawiono proponowane procedury obliczeniowe, współczynniki bezpieczeństwa oraz inne wytyczne dla projektantów.

Pomimo ujęcia zagadnienia zbrojeń kompozytowych w kilku obszernych pozycjach książkowych [1, 24-26] systematyzujących stan wiedzy w zakresie tego rodzaju materiałów w tym m.in. parametrów wytrzymałościowych, możliwych procedur obliczeniowych, wytycznych w zakresie stosowania alternatywne rozwiązania materiałowe dla zbrojenia betonu, elementy tego rodzaju nadal wymagają dalszych szerokich badań eksperymentalnych, celem weryfikacji i optymalizacji metod obliczeniowych, a także określenia faktycznie wymaganych współczynników bezpieczeństwa konstrukcji, które w obecnym stanie wiedzy zgodnym z [19-23] są istotnie zachowawcze.

Biorąc pod uwagę skalę prowadzonych badań i mnogość publikacji dotyczących zarówno właściwości zbrojeń kompozytowych jak i eksperymentów związanych z zastosowaniem zbrojeń FRP w różnych możliwych do wyizolowania w laboratoriach elementach (głównie belek, płyt i słupów), można spodziewać się w najbliższych latach po właściwym i szerokim rozpoznaniu badawczym znaczącej popularyzacji tego materiału i określenia zarówno optymalnych jak i bezpiecznych konstrukcyjnie procedur projektowania konstrukcji z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego.

Kolejnym kierunkiem prowadzonych badań i poszukiwań materiałów o wyższej niż standardowa wytrzymałość na rozciąganie są zbrojenia stalowe wysokiej wytrzymałości. Stal jako materiał o dobrze rozpoznanych właściwościach, pozostawia nadal pewne pole do rozwoju w kierunku uzyskiwania lepszych parametrów wytrzymałościowych, w konstrukcjach które tego wymagają, a jednocześnie nie stawiają innych wymogów takich jak podwyższona odporność na korozję czy obojętność elektromagnetyczna, gdzie odpowiedzią na zapotrzebowanie wydaje się być zbrojenie FRP. Materiałem będącym przedmiotem badań w fazie poprzedzającej wprowadzenie do obrotu rynkowego jest nowy spawalny rodzaj stali o parametrach określonych zgodnie z [27] jako charakterystycznej granicy plastyczności $R_m = 600$ MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie $R_e = 700$ MPa – zatem istotnie wyższych od standardowo stosowanej stali zbrojeniowej. Materiał ten może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie konieczne jest uzyskanie wysokich parametrów wytrzymałościowych zbrojenia, a zastosowanie zbrojeń FRP nie jest optymalne czy to z uwagi na model pracy konstrukcji czy dostępność lub brak optymalnych procedur obliczeniowych.

2.2. ZBROJENIA KOMPOZYTOWE

2.2.1. Zbrojenia kompozytowe – właściwości materiałowe

Celem właściwego zrozumienia potencjału zbrojeń kompozytowych (FRP) koniecznym jest dokonanie szerokiej analizy właściwości materiałowych tego rodzaju zbrojeń i zaobserwowanie różnic pomiędzy poszczególnymi typami włókien zastosowanych do ich produkcji, co kolejno przekłada się na charakterystyczne właściwości fizyczne i mechaniczne danego rodzaju prętów.

Znaczącą grupę artykułów stanowią materiały przeglądowe, przedstawiające zagadnienie i obecny stan wiedzy w zakresie parametrów i możliwości stosowania zbrojenia kompozytowego. W przedmiotowych pracach autorzy dokonują usystematyzowania podstawowej wiedzy w zakresie zbrojenia kompozytowego, omawiają podział zbrojeń kompozytowych ze względu na zastosowane włókna (AFRP, BFRP, CFRP, GFRP), opisują metodę produkcji tj. proces pultruzji oraz dokonują przeglądu podstawowych parametrów zbrojenia kompozytowego analizując możliwość zastosowania poszczególnych rodzajów prętów w elementach konstrukcji betonowych o różnych warunkach pracy [1,28-33].

Najważniejsze informacje stanowiące podsumowanie literatury o charakterze przeglądowym/informacyjnym, a także podstawowy zbiór informacji dotyczących zbrojenia kompozytowego oraz parametrów poszczególnych zbrojeń bazujących na zróżnicowanych rodzajach włókien użytych w procesie produkcji:

- zbrojenie kompozytowe powstaje poprzez osadzenie w żywicy polimerowej ciągłych włókien, które w skutek trwałego połączenia z zastosowaniem żywicy poksydowej, winyloestrowej lub epoksydowej uzyskują końcowy kształt i parametry [28], cały proces pultruzji w trakcie którego kształtowane są pręty z użyciem specjalistycznych sit kończy się wytworzeniem jednolitego elementu, którego skład stanowią w około 20% żywica i 80% włókna [1,34].

- rodzaj użytych do produkcji zbrojenia FRP składników tj. włókien i żywicy determinuje właściwości fizyczne i mechaniczne zbrojenia, o których szczegółowo traktują autorzy opracowania przeglądowego [29], podział zbrojeń w literaturze i obrocie rynkowym systematyzuje się wg rodzaju włókien użytych w procesie produkcji:

1. szklanych (GFRP),
2. bazaltowych (BFRP),
3. węglowych (CFRP),
4. aramidowych (AFRP),

- najpopularniejszym i najszerzej stosowanym w budownictwie obecnie rodzajem zbrojenia kompozytowego są pręty GFRP – produkowane na bazie włókien szklanych, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie (najniższą w grupie zbrojeń FRP, jednak około dwukrotnie wyższą niż klasyczna

stal zbrojenia) i relatywnie zrównoważonym kosztem produkcji. Zbrojenie GFRP wykazuje pewną podatność na działanie wysokiej temperatury (podobnie jak inne rodzaje zbrojeń FRP) co limituje stosowanie tego rodzaju zbrojenia w pewnych elementach konstrukcji, jednak dobra relacja parametrów wytrzymałościowych do ceny produktu sprawia, że stanowi popularny produkt na rynku zbrojeń FRP,

- zbrojenie FRP na bazie włókien węglowych CFRP charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi – osiągając najwyższe wyniki spośród wszystkich rodzajów zbrojeń FRP, jednocześnie z uwagi na wykorzystanie włókien węglowych w procesie produkcji wykazują pewien stopień odporności na podwyższone temperatury i agresję środowiskową, co łącznie umożliwia stosowanie tego rodzaju zbrojenia w niektórych wymagających elementach konstrukcji, a także dzięki swojej charakterystyce materiałowej znajduje szerokie zastosowanie w wykonywaniu różnego rodzaju wzmocnień istniejących konstrukcji,

- zbrojenie FRP na bazie włókien aramidowych AFRP jak wskazują autorzy [29] charakteryzuje się przede wszystkim niską gęstością przy jednocześnie występującej wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (na poziomie około 3000 MPa), co łącznie tworzy bardzo atrakcyjną relację pomiędzy masą jednostkową a wytrzymałością. Jednocześnie, jak wskazują autorzy [29] zbrojenie FRP na bazie włókien aramidowych wykazuje małą tolerancję na działanie promieni słonecznych oraz znaczne pogorszenie parametrów w warunkach ekspozycji na wilgoć, co należy uwzględniać przy planowaniu zastosowania tego materiału w elementach budowli,

- zbrojenie FRP na bazie włókien bazaltowych BFRP, jak wskazują autorzy [29] charakteryzuje się przede wszystkim bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 2800-3200 MPa przy module sprężystości 85-90 GPa, co predysponuje tego rodzaju zbrojenie do przenoszenia dużych obciążeń, w szczególności w elementach pracujących jako zginane. Autorzy [29] wskazują również, że z uwagi na zastosowanie w procesie produkcji zbrojenia BFRP elementów skał wulkanicznych ten rodzaj zbrojenia wykazuje znaczącą odporność na chemię środowiskową oraz wysoką temperaturę.

Najważniejszymi atutami zbrojenia kompozytowego o czym traktują autorzy prac [35-40] w stosunku do klasycznych rozwiązań zbrojenia stalowego , które stanowią przyczyny dążenia do popularyzacji zarówno samego materiału jak i uproszczenia i usystematyzowania procedur obliczeniowych są przede wszystkim:

- wysoka odporność na korozję,
- neutralność elektromagnetyczna,
- wysoka wytrzymałość na rozciąganie (w zależności od rodzaju włókien nawet do 3000 MPa),

- niski ciężar właściwy,
- łatwość cięcia,
- trwałość,
- dobra tolerancja uszkodzeń,
- odporność na zmęczenie.

Największymi wadami zbrojenia kompozytowego wydają się być wg obecnego stanu wiedzy o czym traktują autorzy prac :

- niski moduł sprężystości (moduł Younga) w stosunku do stali zbrojeniowej [41],
- spadek właściwości mechanicznych takich jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga w warunkach podniesionych temperatur [41-48]
- ograniczone właściwości przy ściskaniu (wytrzymałość na ściskanie stanowi od 20 do 70% wartości wytrzymałości na rozciąganie – w zależności od rodzaju pręta i producenta) [28]
- brak rezerwy plastycznej [28]

Tabela 1. zestawienie właściwości zbrojeń Stal/FRP wg [28] oraz załącznika nr 2.

Właściwość	Rodzaj zbrojenia					
	Stal*	Stal B600 B**	CFRP	AFRP	GFRP	BFRP
Granica plastyczności, MPa	276-517	600-750	-			
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	483-690	660	600-3690	1720-2540	483-1600	1100
Moduł Younga, GPa	200	200	120-580	41-125	35-51	70
Odkształcenia przy zerwaniu, %	6,0-12,0	6,0-12,0	0,5-1,7	1,9-4,4	1,2-3,1	

*klasyczna stal zbrojeniowa
** na podstawie załącznika nr 2

Autorzy pracy [49] stanowiącej przegląd wiedzy w zakresie zbrojeń FRP w zakresie parametrów oraz stosowania zbrojenia FRP wskazują m.in. , że zbrojenia tego rodzaju stanowią obiecującą odpowiedź na rozwiązanie problemu stosowania zbrojeń stalowych w środowiskach agresywnych, podkreślając, że zbrojenia stalowe są w szczególności podatne na korozję w agresywnych środowiskach, w których pracują konstrukcje takie jak mosty, tamy i konstrukcje morskie co prowadzi do degradacji betonu i w efekcie korozji zbrojenia. Autorzy jako istotne kierunki dalszych badań wskazują m.in. długoterminowe zachowanie materiałów, właściwości materiałów FRP w różnych środowiskach (w tym w szczególności agresywnych) oraz większy nacisk na projektowanie detali połączeń i zakotwień prętów FRP.

Zagadnienie korozji w elementach betonowych zbrojonych klasycznymi materiałami podnoszą również autorzy opracowania [50], wskazując, że konstrukcje żelbetowe nie są w stanie niezawodnie sprostać wymaganiom w zakresie pożądanej długiej żywotności środowiskach agresywnych, a koszty napraw związanych z korozją stali zbrojeniowej w betonie są szacowane jako najdroższe naprawy konstrukcji nadmorskich. Autorzy wskazują ponadto na bardzo duży potencjał zbrojeń FRP, wskazując liczne przykłady realizacji obiektów inżynierskich na całym świecie z zastosowaniem tego rodzaju materiału m.in. w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Japonii i Kanadzie. Autorzy w konkluzji, jednocześnie sygnalizują konieczność dalszych badań w kierunku skutecznego i efektywnego stosowania zbrojeń kompozytowych w elementach betonowych, celem wyeliminowania obaw związanych z oceną obciążenia, trwałością w czasie oraz sposobem i kosztami utrzymania i napraw tego rodzaju elementów. W ocenie autorów konieczna jest właściwa popularyzacja tego rodzaju zbrojenia w środowisku budowlanym, celem szerokiego i optymalnego wdrożenia tego materiału do stosowania.

Istotnym kierunkiem badań prowadzonych nad aplikacją zbrojenia FRP w konstrukcjach betonowych i dążeniem do jego popularyzacji jest szczegółowa analiza zachowania tego rodzaju zbrojeń w scenariuszu pracy w warunkach pożaru, która realizowana jest w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Jak wskazują autorzy [51] na podstawie prowadzonych badań elementów mostów z wykorzystaniem FRP, elementy te są bardziej podatne na działanie podwyższonych temperatur niż klasycznie stosowane stalowe.

Badania prowadzone w kierunku szczegółowego wyznaczenia nośności ogniowej poszczególnych kompozytów, ukierunkowane są również na określenie parametrów odporności ogniowej w zależności od rodzaju zastosowanych włókien, z uwagi na naturalne parametry materiału bazowego, najbardziej obiecujące wyniki wiążane są z prętami kompozytowymi na bazie włókien bazaltowych, o czym szerzej wywodzą autorzy pracy [52].

Ważnym determinantem stosowania zbrojeń FRP w konstrukcjach żelbetowych jest podatność zbrojeń kompozytowych na obniżanie wartości parametrów takich jak wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł sprężystości przy rozciąganiu (moduł Younga) w warunkach podwyższonych temperatur. Pogorszenie parametrów następuje przy temperaturach zeszklenia żywicy 65-120 °C [44], a temperatury krytyczne (400°C i więcej w zależności od rodzaju zbrojenia kompozytowego) stanowią granicę drastycznego spadku wartości ww. parametrów [44]. Jak wskazują wyniki przywołanych analiz, niezwykle istotnym kierunkiem rozwoju nowych i walidacji dostępnych procedur i instrukcji jest właściwe rozpoznanie i modelowanie elementów żelbetowych z zastosowaniem zbrojenia FRP w warunkach wysokich temperatur (w tym pożaru), co stanowi konieczny krok do zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji w tym zakresie.

Istotnym zagadnieniem w projektowaniu konstrukcji betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP jest dostępność krajowych norm i instrukcji, wśród których obecnie wiodącą rolę odgrywają instrukcje ACI opracowane w Stanach Zjednoczonych [19,53] oraz CSA w Kanadzie [22,23], które opisują szereg możliwych przypadków w projektowaniu konstrukcji z zastosowaniem zbrojeń kompozytowych. Jak wykazują jednak liczne opracowania instrukcje te często prezentują zachowawcze podejście redukując wyniki obliczeń nośności współczynnikami bezpieczeństwa, które mogą być oceniane jako nadmierne. Poza wiodącymi w zakresie projektowania konstrukcji z zastosowaniem FRP normami, opracowano również lokalne instrukcje krajowe m.in. w Wielkiej Brytanii, Japonii, Norwegii i Włoszech [1,33].

Jak wskazują autorzy opracowania [54], traktującego o konieczności walidacji dostępnych procedur umożliwiających właściwe wyznaczenie teoretycznej nośności na ścinanie elementów żelbetowych zbrojonych FRP, dostępne instrukcje można sprowadzić do 3 grup: (I) będące modyfikacją wzorów stosowanych w przypadku konstrukcji żelbetowych, (II) będące modyfikacją istniejących procedur projektowych dla elementów zbrojonych prętami FRP oraz (III) wzorów opracowanych w oparciu o analizę wyników badań doświadczalnych i zastosowania różnych narzędzi obliczeniowych [34,54]. Autorzy [54] w konkluzji artykułu wskazują, że doprowadzenie procedur do stanu właściwie odwzorowującego pracę konstrukcji betonowych zbrojonych FRP wymaga wielu analiz i optymalnego rozpoznania mechanizmów zniszczenia.

Jedną z najbardziej obszernych i najczęściej poruszanych w literaturze przedmiotu instrukcji do projektowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP jest amerykańska instrukcja „ACI 440.1R GUIDE” [19] opisująca wytyczne projektowe w przedmiotowym zakresie. Do założeń przedmiotowej instrukcji odnoszą się autorzy artykułów [55-58], dokonując analiz zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego. Autorzy pracy [56], którzy w swojej analizie skupili się na

badaniu właściwości mechanicznych samego zbrojenia kompozytowego oraz analizie teoretycznej betonowego elementu zginanego – określając w wnioskach z badań wytyczne instrukcji ACI 440.1R GUIDE [19] jako zachowawcze, wskazując na konieczność prowadzenia szerokich badań oraz opracowania krajowych wytycznych do projektowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP.

Autorzy zwracają również uwagę na występujące w instrukcji założenie idealnej przyczepności zbrojenia kompozytowego na styku z betonem, którą jako problem w szczególności dla prętów gładkich opisali autorzy artykułu [57]. Zagadnienie przyczepności kompozytowego zbrojenia bazaltowego do betonu szeroko przeanalizowali realizując stosowną procedurę badawczą autorzy artykułu [59] – w swojej pracy sformułowali założenia współpracy materiałów w konstrukcjach żelbetonowych oraz obecnie obowiązującą metodykę przy badaniach przyczepności dla prętów i drutów stalowych, kolejno przeprowadzając analizę eksperymentalną zagadnienia z zastosowaniem bazaltowych prętów kompozytowych (BFRP). W konkluzji swojej pracy, autorzy na podstawie przeprowadzonej analizy badawczej dochodzą do wniosków, że pręty bazaltowe (bazaltowo – epoksydowe) odznaczają się mniejszą przyczepnością niż porównywalne stalowe, jednak nie są to wartości znacząco niższe. Zwiększenie szorstkości powierzchni pręta powoduje polepszenie przyczepności w betonie i dla użytych w badaniu rodzajów pręta ma większe znaczenie niż jego uźebrowanie. Taki wniosek zdecydowanie łagodniej podchodzi do zagadnienia braku właściwej przyczepności prętów kompozytowych gładkich do betonu, który w konkluzji autorów artykułu [57], wskazywany był jako potencjalna przyczyna osiągnięcia w skutek eksperymentu nośności tylko na poziomie 40 procent założeń teoretycznych.

Wobec przeprowadzonego powyżej wprowadzenia do tematyki zbrojeń FRP jako co raz bardziej realnej nabierającej popularności alternatywy klasycznych zbrojeń stalowych, należy mieć na uwadze szerokie spektrum zagadnień badawczych wymagających szerokiej i właściwej analizy, które powinno pozwolić na optymalne i bezpieczne wzmocnienie konstrukcji betonowych prętami FRP. Ponadto zauważyć należy, że pomimo licznych opracowań badawczych dotyczących zbrojenia kompozytowego, nadal pozostaje szeroki zakres zagadnień wymagających dalszych badań laboratoryjnych oraz poddaniu weryfikacji istniejących i stworzeniu nowych procedur obliczeniowych.

2.2.2. Właściwości materiałowe prętów GFRP

Materiałem kompozytowym, który został przewidziany do realizacji badań objętych niniejszą pracą doktorską jest zbrojenie kompozytowe GFRP. Zbrojenie kompozytowe na bazie włókien szklanych jest jednym z najbardziej spopularyzowanych rodzajów zbrojeń FRP, których parametry wskazane w [40, 58, 60] takie jak wysoka odporność na korozję, wysoką wytrzymałość na rozciąganie, niski ciężar właściwy oraz dobre właściwości niemagnetyczne w

połączeniu z relatywnie wysoką dostępnością na rynku czynią ten rodzaj materiału alternatywą dla klasycznej stali zbrojeniowej.

Zalety zbrojenia GFRP wykazują również autorzy opracowania [61], przytaczając jednocześnie inne atuty m.in. wysoką odporność chemiczną prętów, wysoki stosunek wytrzymałości do wagi, stosunkowo niski moduł sprężystości oraz liniowy wykres odkształcenie-naprężenie aż do zerwania. Ponadto, autorzy opracowania [62], którzy przeprowadzili eksperymentalne badania belek zbrojonych GFRP i porównali wyniki z tożsamymi elementami zbrojonymi klasyczną stalą, wskazują poza korzystnymi parametrami wskazanymi w opracowaniach [58,60-61] również na wynikającą z łącznego występowania przywołanych parametrów zbrojenia GFRP potencjalnie istotnie wyższą żywotność elementów zbrojonych GFRP i zmniejszenie kosztów konserwacji w czasie (m.in. z uwagi na znacznie mniejszą od zbrojenia stalowego wrażliwość na czynniki środowiskowe), co w połączeniu z pozostałymi właściwościami zbrojenia GFRP w ocenie autorów pracy [62] stanowi obiecującą alternatywę dla zbrojenia stalowego.

Jak wykazują prowadzone badania, zbrojenie kompozytowe na bazie włókien szklanych jest przedmiotem badań laboratoryjnych i może znajdować zastosowanie w różnych elementach konstrukcyjnych budynków – belkach [62-63], słupach [63-64] oraz płytach betonowych [65-80], dla których z uwagi na konieczność określenia optymalnych wskaźników zbrojenia przekroju niezwykle istotnym jest uzyskanie odpowiednich warunków pracy płyt i osiągnięcie bezpieczeństwa konstrukcji – zarówno stanu użyteczności jak i nośności. Ponadto, należy mieć na uwadze, że płyty (stropy) stanowią bardzo duży udział betonu w konstrukcji, zatem optymalizacji zużycia materiałów – tu zarówno zbrojeniowych jak i betonu dla tych elementów jest niezwykle istotna, wobec czego metodami optymalizacji zużycia materiałów niezbędnych do wykonania elementów stropowych mogą być nie tylko poszukiwania alternatywnych rodzajów zbrojenia takich jak GFRP, ale również rozważania nad stosowaniem kanałów w płytach o których traktują opracowania [81-82], które to rozważania przeniesiono również do eksperymentów przeprowadzonych z płytami zbrojonymi GFRP [72,77], analizując tym samym możliwości obniżenia masy całkowitej elementów oraz ilości zużytego betonu. Zbrojenie GFRP ze względu na swoje charakterystyczne parametry znajduje zastosowanie również w różnego rodzaju nietypowych zastosowaniach – w pracy [60] analizując połączenie w przekroju pomiędzy betonem infra-lekkim a betonem wysokiej wytrzymałości, poprzez wzmocnienie siatkami GFRP, wskazują, że tego rodzaju wzmocnienie z uwagi na wysoką wytrzymałość na rozciąganie siatek GFRP oraz dobrą odporność na korozję okazuje się wysoce skuteczne.

Kolejnym aspektem istotnym dla popularyzacji zbrojenia GFRP jest jednoznaczne i szerokie określenie zalet i wad tego zbrojenia w różnych warunkach pracy. Jak wynika z przeglądu literatury tematu m.in. opracowań [67-

79] gdy rozpatrywano przypadki pracy w modelu zginania elementy, a zbrojenie GFRP pracowało na rozciąganie osiągało bardzo dobre wyniki wytrzymałości, istotnie lepsze od klasycznej stali zbrojeniowej potwierdzając tym samym wysokie parametry wytrzymałości na rozciąganie deklarowane przez producentów. Zagadnienie eksperymentalnej analizy parametrów zbrojenia GFRP pod obciążeniem ściskającym podjęli autorzy opracowania [36], w skutek której autorzy określili eksperymentalnie moduł Younga dla zbrojenia GFRP na średnim poziomie 47,51 GPa, co stanowi wartość istotnie (około czterokrotnie) niższą od zbrojenia stalowego.

Niektóre ośrodki badawcze na świecie prowadzą szerokie badania eksperymentalne mające na celu popularyzację i zwiększenie zaufania do zbrojenia GFRP wśród inżynierów. Przykładem bogatego spektrum badań wytrzymałościowych dla samych prętów GFRP oraz elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia na bazie włókien szklanych są badania opisane w [83]. Zespół badaczy podsumowuje eksperymenty zrealizowane dla 60 próbek zbrojenia GFRP poddanych próbie rozciągania, 24 belek zbrojonych GFRP, 20 słupów zbrojonych GFRP.

Autorzy [83] w podsumowaniu swoich badań, wskazują, że zbrojenie GFRP stanowi dobrą alternatywę do zbrojenia betonu w szczególności w warunkach, w których problemem z uwagi na klasę ekspozycji jest korozja zbrojenia. Autorzy wskazują również, że w skutek przeprowadzonych badań określili wytrzymałość zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych na ściskanie na poziomie przekraczającym 700 MPa, co stanowi około 60% wytrzymałości na rozciąganie. Autorzy zauważyli również, że w elementach zbrojonych GFRP istotny wpływ na efekt zginania i ugięcia ma dobór zbrojenia poprzecznego, określając również, że w specyficznych warunkach pracy (np. konieczności unikania korozji zbrojenia) należy rozpatrywać stosowanie zbrojenia głównego stalowego i zbrojenia poprzecznego z GFRP – jako odpowiedzi na miejsca typowego powstawania ubytków otuliny betonu.

Tematykę korozji zbrojenia stalowego w warunkach agresywnego środowiska morskiego podnoszą nie tylko autorzy opracowania [50] w kontekście zbrojeń FRP w ogóle, ale również autorzy opracowań [84-85] w odniesieniu konkretnie do zbrojeń kompozytowych na bazie włókien szklanych, wskazując, zbrojenia GFRP jako właściwą odpowiedź na tego rodzaju problemy. Autorzy wskazują, że korozja powstaje po odsłonięciu zbrojenia, które powodowane jest obciążaniem powodowanym uderzaniem fal, które ma charakter nierównomierny. Badacze podnoszą również, że w skutek zjawiska korozji występującego w warunkach agresywnego środowiska morskiego znacząco spada trwałość długoterminowa tego rodzaju konstrukcji.

Zbrojenie kompozytowe na bazie włókien szklanych zastosowane w konstrukcjach żelbetowych, wykazuje ponadto zadawalającą długoterminową trwałość, szczególnie w warunkach ekspozycji na trudne warunki środowiskowe

takie jak woda morska czy rzeczna, o czym traktują m.in. autorzy opracowań [86-88].

Opracowaniem wskazującym na problematykę degradacji konstrukcji betonowych i korozji zbrojenia w warunkach pracy w środowiskach agresywnych jest praca [89]. Autorzy wskazują, że przedmiotowe zjawisko stanowi problem o zasięgu światowym, a skracanie w skutek ww. awarii żywotności elementów żelbetowych prowadzi do istotnego obniżania parametrów konstrukcji a w skrajnych przypadkach wręcz do zagrożenia ich bezpieczeństwa. W opracowaniu [89] wskazuje się, że rozwiązaniem problemu korozji w agresywnych środowiskach może być stosowanie zamiast klasycznej stali zbrojeniowej prętów B/GFRP, które wykazują odporność na korozję oraz potencjał do zwiększenia trwałości konstrukcji. Autorzy odnoszą się przeglądowo do badań przeprowadzonych przez innych badaczy w zakresie pracy zbrojenia B/GFRP w trudnych warunkach ekspozycji.

Autorzy [89] opisują następujące badania wraz z wnioskami: analiza mikromorfologii po ekspozycji na agresywne środowisko, na podstawie artykułu [90], która wykazała że po ekspozycji na agresywne środowisko zbrojenia GFRP nastąpiła degradacja matrycy żywicznej, odsłonięcie włókien i w efekcie ich korozja; weryfikacja wytrzymałości na rozciąganie prętów BFRP po zanurzeniu w roztworze alkalicznym na okres 360 dni, na podstawie artykułu [91], która wykazała, że po takim czasie ekspozycji wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia wynosiła 18,9% wartości pierwotnej, wobec czego wykazano występowanie degradacji zbrojenia BFRP w tego rodzaju warunkach; weryfikacja wytrzymałości prętów B/GFRP na rozciąganie i ściskanie po zanurzeniu w roztworze AS/pH12.8 w temperaturze 20°C przez 90 dni, na podstawie artykułu [92], która wykazała, że po takim czasie ekspozycji wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia wynosiła 98,56% wartości pierwotnej, a interlaminarna wytrzymałość na ściskanie 77,06% wartości pierwotnej; weryfikacja wytrzymałości prętów GFRP na rozciąganie i interlaminarnej wytrzymałości na ścinanie po zanurzeniu w roztworze AS/12.8 w temperaturze 60°C przez 42 dni, na podstawie artykułu [93], która wykazała, że po takim czasie ekspozycji wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia wynosiła 99,0% wartości pierwotnej, a interlaminarna wytrzymałość na ścinanie 94,4% wartości pierwotnej; weryfikacja wytrzymałości prętów BFRP na rozciąganie i interlaminarnej wytrzymałości na ścinanie po zanurzeniu w roztworze AS/12.8 w temperaturze 60°C przez 230 dni, na podstawie artykułu [94], która wykazała, że po takim czasie ekspozycji wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia wynosiła 95,4% wartości pierwotnej, a interlaminarna wytrzymałość na ścinanie 91,1% wartości pierwotnej.

Autorzy artykułu [89] na bazie własnych analiz oraz badań zrealizowanych w ramach opracowań [90-94], wskazują w podsumowaniu, że wiele czynników zewnętrznych w tym takich jak fizyczne, chemiczne i serwisowe w złożony sposób wpływa na długoterminową wydajność i trwałość prętów B/GFRP, wobec

czego zrozumienie i właściwe zbadanie tego wpływu jest kluczowe dla efektywnego projektowania konstrukcji betonowych wzmacnianych zbrojeniem kompozytowym, przewidzianych do pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Autorzy [89] wskazują ponadto, że środowisko alkaliczne jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na degradację prętów B/GFRP, gdzie degradacja postępuje szybko w szczególności w temperaturze powyżej 40°C, a także zwiększa się pod obciążeniem. Czynniki istotnymi dla odporności prętów B/GFRP na degradację w ocenie autorów [89] są właściwy dobór żywicy i włókien i optymalizacja interakcji między nimi, rodzaj dobieranych włókien i żywicy oraz optymalizacja składu matrycy żywicznej. Autorzy [89] w podsumowaniu podkreślają, że mimo, że zbrojenia B/GFRP stanowią obiecującą alternatywę dla stali zbrojeniowej w warunkach agresywnej ekspozycji, to konieczne są dalsze analizy i badania w kierunku długoterminowej trwałości konstrukcji betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego w trudnych warunkach środowiskowych, w szczególności w przypadku ekspozycji na roztwory alkaliczne.

Publikacjami odnoszącymi się podobnie jak [89] do zagadnienia degradacji konstrukcji betonowych oraz korozji zbrojenia w konstrukcjach narażonych na niekorzystne warunki ekspozycji jest opracowanie [85,95-96], traktujące o trwałości prętów zbrojenia GFRP w konstrukcji betonowej po 15-20 latach ekspozycji na trudne warunki środowiskowe.

Artykuł [85] odnosi się do pracy konstrukcji w strefie pływów morskich oraz korelacji obserwacji z przyspieszonymi testami starzeniowymi. Przedmiotem analizy były pręty GFRP zatopione w betonowych kolumnach, które poddawane były wpływowi agresywnego środowiska morskiego przez około 20 lat w Jubail w Arabii Saudyjskiej. Dla przedmiotowych prętów GFRP badano długoterminową wydajność, spadek wytrzymałości w czasie, strukturę w ujęciu mikroskopowym, skład chemiczny, korelację pomiędzy wynikami długoterminowej ekspozycji polowej a wynikami przyspieszonych testów starzeniowych. Badanie miało na celu ocenę trwałości prętów GFRP jako alternatywy dla tradycyjnego zbrojenia stalowego w konstrukcjach narażonych na trudne warunki środowiskowe.

Wnioski z przeprowadzonych badań w ramach artykułu [85] wskazują, że żebrowane pręty GFRP wykazały mniejsze spadki wytrzymałości na ścinanie poprzeczne w porównaniu z prętami powlekanyymi piaskiem, stwierdzona redukcja wytrzymałości zawiera się w przedziale 15,6-21,9%. Stwierdzono również, że możliwe do zaobserwowania są efekty degradacji zbrojenia GFRP m.in. uszkodzenia włókien, matrycy polimerowej i ich połączenia. W ramach przeprowadzonej analizy stwierdzono, że korelacje między długoterminową ekspozycją polową a przyspieszonymi warunkami starzenia w odniesieniu do retencji wytrzymałości na ścinanie, dla obu typów prętów GFRP wykorzystują wykładnicze krzywe zaniku wytrzymałości, a zbrojenie GFRP niezależnie od typu

podstawie badań i weryfikacji terenowej uznano za wykazujące zadawalającą trwałość długoterminową w konstrukcjach narażonych na agresywne czynniki środowiskowe takie jak np. woda morska.

Autorzy publikacji [85] wskazują ponadto, w odniesieniu do artykułów o podobnej tematyce [95-96], że ograniczona degradacja zbrojenia GFRP w warunkach pracy w środowisku agresywnym nie prowadzi do poważnych problemów strukturalnych, w przeciwieństwie do korodującego zbrojenia stalowego, wobec czego stanowi dobrą alternatywę dla stali zbrojeniowej oraz wykazuje większy potencjał do zapewnienia właściwej trwałości elementów betonowych w trudnych warunkach eksploatacji.

Kolejnym zagadnieniem, będącym przedmiotem badań naukowców jest połączenie pomiędzy prętami FRP a betonem, którego problematykę analizowali autorzy prac [97], którzy w swojej pracy odnoszą się do wcześniejszych badań o podobnych charakterze przeprowadzonych przez zespół autorów pracy [98], wskazując jednocześnie na konieczność korekty metodologii badania wyciągania pręta zaproponowanej w artykule [98]. W ramach przeprowadzonych badań skorzystano z prętów kompozytowych GFRP oraz betonu geopolimerowego na bazie popiołu lotnego. W ramach zaproponowanych badań autorzy określili cele jako zrozumienie mechanizmu połączenia pomiędzy prętami GFRP a betonem GPC; zbadanie wpływu różnych parametrów takich jak długość zakotwienia zbrojenia, średnica pręta zbrojeniowego i klasa betonu na właściwości połączenia; określenie zależności pomiędzy poślizgiem a siłą wiązania oraz porównanie właściwości połączenia w betonie GPC w stosunku do klasycznych mieszanek betonowych.

Autorzy [97] przygotowali próbki prętów do badania „pullout” zatopione w betonowych cylindrach o wysokości 170 mm i średnicy 100 mm, w których pręty zakotwiono odpowiednio na długości trzech, sześciu i dziewięciu średnic nominalnych zbrojenia (średnice odpowiednio 12,7 mm i 15,9 mm) będącego przedmiotem badania. Próbkę wykonano z betonów GPC oraz klasycznego, osiągając wytrzymałości na ściskanie rzędu 25 MPa i 45 MPa. Dla każdej z kombinacji parametrów wskazanych powyżej, przygotowano trzy nominalnie identyczne próbki i przeprowadzono badania niszczące wyciągania pręta z betonu z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej.

W trakcie prowadzonych badań, autorzy [97] monitorowali siłę przyłożoną do pręta, poślizg pręta względem powierzchni betonu oraz tryby zniszczenia próbek celem oznaczenia średniej wytrzymałości połączenia oraz zależności między poślizgiem a naprężeniem.

Autorzy [97] konkludują, że zachowanie prętów GFRP w betonie GPC nie odbiega znacząco od zachowania prętów GFRP i stalowych w klasycznym betonie – występują podobne etapy cyklu obciążenia tj. początkowa sztywność, nieliniowe zachowanie przed osiągnięciem szczytowego naprężenia i osłabienie

po osiągnięciu obciążenia niszczącego. Autorzy wskazują, że dla prętów GFRP zatopionych w betonie GPC zaobserwowano wyższe średnie wytrzymałości połączenia – wynosiły odpowiednio 15,8 MPa dla betonu GPC oraz 14,3 MPa dla zwykłej mieszanki. Autorzy zaobserwowali również, że wraz z zwiększeniem długości zakotwienia siła zrywająca rośnie oraz zmienia się model zniszczenia (w zakresie czego wykazują analogię do wyników badań opisanych w pracy [98] tj. w obu opracowaniach wskazano dwa modele zniszczenia tj. poprzez wyciągnięcie pręta lub rozłupanie betonu), przy jednoczesnym spadku wytrzymałości połączenia, która głównie zależy od klasy wytrzymałości betonu na ściskanie (co jest zbieżne z wnioskami autorów artykułu [40], którzy również badali podobne połączenie). Autorzy konkludują, że beton GPC może być efektywnym materiałem do współpracy z zbrojeniem GFRP, ponieważ wykazuje w ich ocenie lepsze parametry połączenia niż klasyczny beton na bazie cementu portlandzkiego oraz co warto podkreślić posiada szereg parametrów (np. odporność na siarczany i kwasy, niewielkie wartości skurczu i pęcznienia) predysponujących ten materiał do stosowania w warunkach, w których zbrojenie GFRP stanowi realną alternatywę dla stali zbrojeniowej.

Połączenie zbrojenia kompozytowego GFRP z betonem badali również autorzy pracy [99] realizując podobnie do badaczy odpowiedzialnych za opracowanie artykułu [97]. Zrealizowali analizę porównawczą, polegającą na wykonaniu badania pullout na sześciennych próbkach betonu o wymiarach 250 x 250 x 250 mm, w których zatopiono dla różnych próbek odpowiednio pręty GFRP lub stalowe o średnicy 25 mm. Autorzy w ramach wniosków z przeprowadzonego badania wskazują, odnosząc się do uśrednionych wyników badań wytrzymałości połączenia dla prętów GFRP równego 6,54 MPa oraz połączenia dla prętów stalowych 8,22 MPa, że wytrzymałość połączenia zbrojenia z betonem jest istotnie o ponad 20% mniejsza dla zbrojenia GFRP niż stalowego, w obu przypadkach zniszczenie połączenia nastąpiło poprzez rozłupywanie. Autorzy wskazują, że różnica wytrzymałości połączenia wynika z charakterystyki powierzchni prętów GFRP i stalowych, na co wskazują również autorzy [40].

Modyfikację badań związanych z właściwościami połączenia pomiędzy prętami z GFRP a betonem zaproponowali autorzy [40], zweryfikowali stałość parametrów wiązania po ekspozycji na trudne warunki środowiskowe. Dokonano weryfikacji zachowania połączenia w warunkach ekspozycji na roztwór soli fizjologicznej oraz roztwór alkaliczny. Stwierdzono, że spadek wytrzymałości wiązania wynosił odpowiednio od 1,3 do 21,4% dla roztworu soli fizjologicznej oraz od 26,5 do 38,8% dla roztworu alkalicznego, co wskazuje na to, że środowisko alkaliczne ma większy wpływ na degradację zbrojenia GFRP.

Badania dotyczące weryfikacji procesów zachodzących w skutek osadzenia zbrojenia GFRP w betonie przeprowadzili autorzy [6], badając zachowanie zbrojenia w warunkach osadzenia w mokrym betonie zaproponowali urealnienie środowiska laboratoryjnego do faktycznych warunków pracy zbrojenia w betonie,

co miało przede wszystkim pozwolić na ocenę wpływu betonu na właściwości mechaniczne i fizyczne oraz mikrostrukturę zbrojenia GFRP. Badacze w ramach swoich eksperymentów podjęli zagadnienie zasymulowania procesu przyspieszonego starzenia – przygotowano próbki zbrojenia kompozytowego GFRP (parametry każdej z próbek - średnica 12,7 mm, długość 1440 mm) w dwóch grupach – tj. zbrojenia niekondycjonowanego jako referencyjne oraz kondycjonowanego poprzez zanurzenie prętów otulonych zaprawą cementową w wodzie o temperaturach odpowiednio 23, 40 i 50°C oraz czasie 60, 120, 180 i 240 dni, dla których zbadano wytrzymałość na rozciąganie przed i po ekspozycji, a także dokonano weryfikacji mikrostruktury zbrojenia GFRP.

W ramach zrealizowanych badań będących przedmiotem pracy [6] pręty zbrojeniowe GFRP poddawano statycznej próbie rozciągania realizowanej w oparciu o wytyczne [100], powtarzając proces odpowiednio dla każdej z temperatur, dla 6 prętów w cyklu co 60 dni (ostatnie badanie zrealizowano po 240 dniach). W toku realizowanego badania, dla każdej z próbek rejestrowano obciążenie i wydłużenie aż do zniszczenia.

Autorzy pracy [6] w ramach podsumowania wskazują, że retencja wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia GFRP w skutek sezonowania w wodzie wodociągowej była niewielka, w szczególności w odniesieniu do podobnych badań realizowanych w roztworach alkalicznych [89-94], gdzie ubytek wytrzymałości na rozciąganie po zanurzeniu w roztworze był znaczny. Stwierdzono ponadto, że starzenie się prętów w wilgotnym betonie nie wykazało wpływu na spadek modułu Younga ani na zmiany mikrostruktury prętów GFRP. Wyniki badań sugerują, że właściwości prętów GFRP w betonie pomimo procesu starzenia wykazują stałość parametrów mechanicznych i fizycznych.

Autorzy artykułu [101] zrealizowania badania porównawcze trwałości prętów GFRP w betonie oraz symulowanym środowisku betonowym, mającą na celu podobnie do innych badań ocenę właściwości fizycznych, mechanicznych i mikrostruktury w warunkach wysokiej wilgotności – podobnie do autorów prac [97-98] oraz środowisk agresywnych np. alkalicznych – podobnie do autorów prac [89-94]. W ramach wniosków z przeprowadzonych badań, autorzy pracy [101] dochodzą do zbliżonych wniosków jak badacze odpowiedzialni za opracowania [89-94,97-98] tj. największego negatywnego wpływu roztworów alkalicznych na trwałość zbrojenia GFRP, przy marginalnym wpływie wody wodociągowej i roztworów soli na właściwości fizyczne i mechaniczne materiału. Autorzy [101] podkreślają również istotę właściwego doboru i zachowania otuliny w trakcie robót betoniarskich, jako elementu stanowiącego dobrą barierę dla ekspozycji zbrojenia GFRP na niekorzystne czynniki środowiskowe.

Analizę długoterminowej wydajności zbrojenia GFRP w konstrukcjach takich jak mosty i suche doki przeprowadzili autorzy opracowania [102], dokonując weryfikacji prętów pobranych z belek pomostowych mostu w Teksasie po 15 latach eksploatacji, badając spadek wytrzymałości mechanicznej oraz

charakterystykę mikrostrukturalną. Autorzy wykazali, że wytrzymałość poprzeczna na ścinanie w badanej próbce spadła po 15 latach o 23% w porównaniu z próbkami kontrolnymi, a analiza mikrostrukturalna wykazała degradację prętów GFRP na co wskazywały w szczególności stan włókien oraz połączeń włókno-matryca. Autorzy wskazują również, że w ich ocenie w skutek przeprowadzonych badań prawdopodobieństwo rozkładu polimeru jest niskie. W ramach wniosków z analizy artykułu [102] można wskazać, że degradacja zbrojenia GFRP po 15 latach użytkowania nie jest znacząca.

Jak wynika z analizy literatury przedmiotu w zakresie właściwości materiałowych zbrojenia GFRP, należy stwierdzić, że stosownie do analizowanych opracowań, tego rodzaju zbrojenie posiada bardzo dobre parametry pracy w trudnych warunkach środowiskowych, takich jak ekspozycja na agresywne środowisko wodne morskie czy rzeczne [86-88], przy zachowaniu dobrej trwałości długoterminowej, co predysponuje ten materiał do stosowania w określonych konstrukcjach narażonych na ryzyko korozji, w których stanowi dobrą alternatywę dla stali zbrojeniowej.

2.2.3. Badania wytrzymałościowe prętów GFRP

Jednym z najbardziej istotnych benefitów, stanowiących argumentację dla stosowania zbrojenia GFRP w konstrukcjach żelbetowych jest jego bardzo wysoka wytrzymałość na rozciąganie, stanowiąca zgodnie z [29,103-104] około dwukrotność możliwych dla klasycznej stali zbrojeniowej parametrów do osiągnięcia w tym aspekcie.

Badania mające na celu potwierdzenie parametrów zbrojenia kompozytowego w zakresie deklarowanych przez producentów wartości prowadzą badacze w licznych ośrodkach na świecie, które to badania stanowią dedykowane przedmiotowym parametrom opracowania lub część składową badań elementów współpracujących z betonem. Do podstawowych parametrów będących przedmiotem kart materiałowych i tym samym badań eksperymentalnych mających na celu badawczą ich weryfikację należą zwykle wytrzymałość na rozciąganie (badania ujęto w [103-104]) moduł sprężystości przy rozciąganiu (moduł Younga) oraz wytrzymałość na ściskanie (badania ujęto w [83,105-107]).

Realizowane są również badania w zakresie zmodyfikowanym lub wykraczającym poza standardowe karty materiałowe producentów takim jak na przykład wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości przy rozciąganiu (moduł Younga), wytrzymałość na ścinanie i zginanie w warunkach podniesionych lub obniżonych temperatur (badania ujęto w [42-44]).

W ramach badań, które opisano w pracy [103], których głównym celem badawczym była ocena możliwości wykorzystania zbrojenia GFRP w kolumnach w warunkach symulowanego trzęsienia ziemi tj. stałego obciążenia osiowego

kolumn i cyklicznego przemieszczenia bocznego , przeprowadzono również badania samego zbrojenia GFRP celem określenia parametrów wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości przy rozciąganiu. Badanie przeprowadzono w oparciu o [108] na próbkach zbrojenia GFRP o średnicach nominalnych 12 i 16 mm uzyskując wyniki zaprezentowane w tabeli 2.

Tabela 2. wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości przy rozciąganiu zbrojenia GFRP zgodnie z artykułem [103].

Średnica pręta GFRP (mm)		Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	Moduł sprężystości przy rozciąganiu (GPa)
nominalna	zmierzona		
12	12.25	1050,0	58,5
16	15.75	970,0	52,7

Badania opisane w artykule [104] skupiają się wyłącznie na parametrach zbrojenia GFRP , w tym w szczególności wytrzymałości na rozciąganie. W ramach realizowanych badań autorzy przeprowadzili badania parametrów na trzech próbkach, dla trzech różnych średnic zbrojenia (łącznie 9 prętów) o średnicach odpowiednio 10, 12 i 25 mm. W skutek przeprowadzonych badań oznaczono wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio stosownie do średnic 10 mm – 814,16 MPa, 12 mm – 781,08 MPa oraz 25 mm – 748,21 MPa i zaobserwowano , że wytrzymałość na rozciąganie malała wraz z wzrostem średnicy zbrojenia (co jest zbieżną obserwacją z wynikami badań [103] zestawionymi w tabeli 2) . Autorzy [104] wskazali również, że wartość modułu sprężystości przy rozciąganiu (modułu Younga) wzrastała wraz z wzrostem średnic, a większe średnice generalnie wykazywały większą odporność na deformację.

Badania odpowiedzi prętów kompozytowych GFRP i BFRP na działanie ściskania statycznego i dynamicznego zrealizowali autorzy opracowania [105], realizując ocenę wytrzymałości na ściskanie oraz model zniszczenia tego rodzaju prętów. W ramach badań zrealizowano testy obciążenia statycznego (zrealizowane przy małych, kontrolowanych wartościach obciążenia) na 76 próbkach prętów GFRP, dla których każdorazowo długość pręta była dwukrotnie większa od jego średnicy aby pominąć efekt wyboczenia. Obciążenie przykładano do próbek przy trzech różnych wartościach, określając obciążenie niszczące i model zniszczenia. Z kolei celem zobrazowania obciążenia dynamicznego, przeprowadzono procedurę zrzucanego młota, symulując maksymalną prędkość uderzenia 10 m/s oraz energię kinetyczną na poziomie 2,5 kJ. Próbie dynamicznej poddano łącznie 21 prętów GFRP oraz 12 prętów BFRP.

W skutek przeprowadzonych w ramach [105] badań, określono, że zbrojenie GFRP osiągnęło wyższe parametry wytrzymałości na ściskanie (w przedziale 300-600 MPa – osiągnięto zatem nieznacznie niższe wyniki wytrzymałości na ściskanie niż w [83] gdzie określono parametr jako powyżej 700 MPa) niż zbrojenie BFRP dla którego maksymalny parametr wyniósł 470 MPa, a większość prętów wykazała wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz z wzrostem średnicy zbrojenia. Głównym obrazem zniszczenia była degradacja poprzez rozwarstwienie zewnętrznych warstw włókien bez zmiążdżenia rdzenia. Dodatkowo zgodnie z założeniami autorów, z uwagi na stosunek długości próbek do średnicy nie zaobserwowano wyboczenia prętów. Autorzy wskazują ponadto, że w testach statycznych wytrzymałość na ściskanie wykazywała niewielką zależność od prędkości obciążenia, natomiast w testach dynamicznych zaobserwowano zależność wytrzymałości od prędkości obciążenia, którą dodatkowo różnicowały średnice i rodzaj włókien. Autorzy podkreślają, że zarówno zagadnienie przenoszenia przez zbrojenie kompozytowe obciążeń ściskających jak i odpowiedź elementów zbrojonych kompozytem na obciążenia dynamiczne wymaga dalszych badań.

O wytrzymałości zbrojenia GFRP na ściskanie traktują również autorzy opracowania [106], którzy w ramach swoich badań przeprowadzili badanie wytrzymałości na ściskanie na 35 próbkach prętów GFRP o przedziale średnic od 13 do 20,7 mm, próbki obciążano aż do zniszczenia monitorując parametry obciążenia, odkształcenia i przemieszczenia. W skutek zrealizowanych badań niszczących uzyskano wyniki wytrzymałości na ściskanie prętów GFRP w przedziale od 559 do 940 MPa. Badania podobnie do eksperymentu [83] nie wykazały wyboczenia jako formy zniszczenia. Autorzy określili, że wartość wyznaczonej eksperymentalnie wytrzymałości na ściskanie prętów GFRP stanowiła wartość powyżej 55% deklarowanej wytrzymałości na rozciąganie co koreluje z wynikami badań [83] gdzie tę wartość określono jako powyżej 60%.

Problematyka zachowania się zbrojenia GFRP w warunkach podwyższonych temperatur jest bardzo istotnym zagadnieniem w kontekście zagadnienia odporności pożarowej konstrukcji betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych (czy szerzej kompozytów w ogóle). Jak wskazują autorzy [44], którzy przeglądowo analizują zagadnienie parametrów zbrojenia GFRP w warunkach podniesionych temperatur, jest to materiał wysoce wrażliwy na działanie wysokich temperatur co w efekcie prowadzi do pogorszenia parametrów m.in. wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości przy rozciąganiu. Autorzy [44] wskazują ponadto, że najbardziej niekorzystny wpływ na parametry mechaniczne zaczyna się w momencie narażenia zbrojenia GFRP na pracę w temperaturze powyżej temperatury zeszklenia żywicy, która kształtuje się w przedziale 65-120 °C, oraz na podstawie [45], że przy temperaturze 500°C następuje praktycznie liniowy spadek parametrów wytrzymałości na rozciąganie do zera, a moduł sprężystości utrzymuje swoje parametry do temperatur na poziomie 300-400 °C.

Zespołem badawczym, który podjął temat wytrzymałości na rozciąganie oraz właściwości przyczepności prętów GFRP po ekspozycji na podwyższone temperatury byli autorzy opracowania [108]. Jako cel przeprowadzonych badań postawiono eksperymentalne określenie parametrów zbrojenia GFRP po ekspozycji na wysokie temperatury m.in. wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości, przyczepności do betonu. Pręty w ramach badań analizowano w dwóch wariantach – w temperaturze pokojowej oraz warunkach podwyższonych temperatur tj. poddano ekspozycji na działanie podwyższonych temperatur – odpowiednio 100 °C, 200 °C i 400 °C, kolejno wychłodzono i zrealizowano badania niszczące, których wyniki porównano z wynikami tożsamyh badań dla zbrojenia w temperaturze pokojowej.

W ramach analizy, autorzy [42] przeprowadzili badanie wytrzymałości na rozciąganie – próbki użyte do badania stanowiły pręty GFRP o średnicy 19 mm, których oba końce zostały zamcowane na 286 mm w stalowych tulejach wypełnionych wysokowytrzymałą mieszanką cementu ekspansywnego, piasku i wody – badanie przeprowadzono w warunkach temperatury pokojowej oraz ekspozycji na podwyższone temperatury w przedziale do 100 °C, 200 °C i 400 °C. Próbkki w warunkach temperatury pokojowej obciążono aż do zerwania, a w warunkach podniesionych temperatur zostały obciążone siłą 80,0 kN stanowiącą ok 42% średniej siły zrywającej w warunkach temperatury pokojowej, co miało zobrazować obciążenie eksploatacyjne w warunkach pożaru. Kolejno próbki schłodzono i po schłodzeniu obciążono aż do zerwania.

Kolejnym badaniem zrealizowanym przez autorów [42] był test wyciągania, próbki do badania stanowiły pręty GFRP o średnicy 19 mm z jednym końcem zabetonowanym na głębokość 95 mm w cylindrze betonowym o średnicy 152 mm i wysokości 305 mm. Badanie przeprowadzono przy założeniach analogicznych do badania wytrzymałości na rozciąganie tj. próbki w temperaturze pokojowej poddano stopniowemu obciążeniu aż do wyciągnięcia pręta, a próbki w warunkach podwyższonych temperatur poddano ekspozycji na temperatury w przedziale do 100 °C, 200 °C i 400 °C, następnie wychłodzono i po wychłodzeniu poddano stopniowemu obciążeniu aż do wyciągnięcia pręta.

W ramach przeprowadzonych badań, autorzy [42] uzyskali następujące wyniki zestawione w tabeli poniżej oraz zaznaczyli, że eksperymentalnie oznaczone w warunkach temperatury pokojowej wartości wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości oraz siły wyciągającej były zgodne z danymi deklarowanymi przez producenta.

Tabela 3. Wyniki badań dot. artykułu [42].

Temperatura	Wytrzymałość na rozciąganie		Moduł sprężystości		Siła wyciągająca	
	MPa	%	GPa	%	kN	%
T pokojowa	648,9	100,00	39,603	100,0	11,3	100,0
T 100 °C	566,1	87,24	38,969	98,39	10,9	96,46
T 200 °C	633,8	97,67	38,388	96,93	8,5	75,22
T 400 °C	535,7	82,56	32,839	82,92	3,1	27,43

W ramach wniosków z przeprowadzonych badań autorzy [42] wskazują, że wszystkie zweryfikowane eksperymentalnie parametry rezydualne tj. wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości, siła wyciągająca maleją wraz z wzrostem temperatury ekspozycji, od czego jedynym wyjątkiem w przeprowadzonym badaniu jest wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze 200 °C. Jednocześnie autorzy zauważają, że zbrojenie GFRP poddane ekspozycji na działanie wysokich temperatur w przedziale do 400 °C i kolejno schłodzeniu zachowuje znaczącą część swojej wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości, wskazują również, że przy ogrzaniu prętów do temperatury 400 °C i późniejszym ochłodzeniu drastycznie spada przyczepność prętów GFRP do betonu, co sprawia, że ten parametr w tych warunkach staje się nierzetelny i trudny do przewidzenia. Autorzy [42] podkreślają również, że przyczepność do betonu jest kluczowym elementem oceny wytrzymałości elementów betonowych po pożarze i powinna być starannie uwzględniana przy ocenie dalszej możliwości użytkowania elementów z zastosowaniem GFRP po ekspozycji na wysokie temperatury.

Kolejnym zespołem badawczym podejmującym problematykę zachowania prętów zbrojeniowych GFRP w warunkach zróżnicowanych temperatur są autorzy pracy [43], realizując badania mające na celu określenie wpływu ekstremalnych temperatur na degradację prętów GFRP będących wewnętrznym zbrojeniem betonu. W ramach realizowanych eksperymentów za cel postawiono ocenę zmian właściwości mechanicznych zbrojenia GFRP w warunkach niskich temperatur (przedział od 0 do – 100 °C) oraz podwyższonych (przedział od 23 do 315 °C) tj. stabilności wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia przy zerwaniu oraz modułu sprężystości. Dodatkowo badacze przeprowadzili analizę mikrostruktury zbrojenia GFRP w celu zbadania degradacji włókien, matrycy i połączenia między nimi pod wpływem ekstremalnych temperatur.

Próbki przygotowane do badania [43] stanowiły pręty GFRP o nominalnej średnicy 12,7 mm, dla których zawartość szkła stanowiła 81,5% masy, zastosowano matrycę winyloestrową. Próbki podzielono na serię referencyjną oraz serię kondycjonowaną, w ramach której pręty zostały nasycone wodą poprzez całkowite zanurzenie w wodzie o temperaturze 50 °C do osiągnięcia nasycenia 0,65% zawartości wilgoci. Próbki poddano badaniom w następujących temperaturach obniżonych symulujących warunki klimatu północnego -100°, -80°, -60°, -40°, -20° i 0°C oraz temperaturach podniesionych symulujących krótkotrwałe warunki rozwoju pożaru 50°, 100°, 150°, 200°, 250° i 325°C. Próbki poddano mechanicznym próbom – wytrzymałości na rozciąganie, na ścinanie poprzeczne i wytrzymałości na zginanie. Uzyskane wyniki badań zestawiono w poniższej tabeli.

Tabela 4. Wyniki badań dot. artykułu [43].

Temperatura	Wytrzymałość na rozciąganie		Wytrzymałość na ściannie		Wytrzymałość na zginanie	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
T referencyjna 25°C	756,0	100,00	199,0	100,00	1093,0	100,00
T -100 °C	897,0	118,65	304,0	152,76	1843,0	168,62
T -80 °C	838,0	110,85	281,0	141,21	1750,0	160,11
T -60 °C	785,0	103,84	255,0	128,14	1516,0	138,79
T -40 °C	791,0	104,63	227,0	114,07	1325,0	121,23
T -20 °C	784,0	103,70	219,0	110,05	1288,0	117,84
T 0 °C	754,0	99,74	211,0	106,03	1101,0	100,73
T 50 °C	757,0	100,13	198,0	99,50	1088,0	99,54
T 100 °C	674,0	89,15	177,0	88,94	922,0	84,36
T 150 °C	532,0	70,37	176,0	88,44	255,0	23,33
T 200 °C	513,0	67,86	114,0	57,29	142,0	13,00
T 250 °C	464,0	61,38	56,0	28,14	106,0	9,69
T 300 °C	405,0	53,57	50,0	25,13	74,0	6,77
T 350 °C	353,0	46,69	44,0	22,11	65,0	5,95

W ramach wniosków z przeprowadzonych badań autorzy opracowania [43] wykazują, że niskie temperatury powodują wzrost wytrzymałości zbrojenia GFRP, a temperatury podniesione powodują jej spadek, który staje się bardzo znaczący w szczególności dla wytrzymałości na zginanie przy temperaturach powyżej 100° C. Autorzy przeanalizowali również zachowanie modułu sprężystości przy zginaniu dla badanych próbek, określając, że w niskich temperaturach poniżej -50° C wartość modułu wykazuje tendencję wzrostową, w przedziale od -40 do 50 ° C utrzymuje relatywnie stabilną wartość, a począwszy od temperatury powyżej 120 ° C, którą autorzy wskazują jako odpowiadającą temperaturze zeszklenia polimeru następuje znaczący spadek modułu sprężystości. W temperaturze bardzo wysokiej tj. powyżej 300 ° C wartość modułu sprężystości przy zginaniu znacząco spada, co jest skutkiem degradacji matrycy polimerowej. W warunkach bardzo wysokiej temperatury 350 ° C zaobserwowano mikropęknięcia w polimierze spowodowane termiczną degradacją matrycy, której zmierzony ubytek masy wyniósł 18%. Autorzy [43] podkreślają, że warunki pracy były bardziej ekstremalne niż w rzeczywistych zastosowaniach, z uwagi na wcześniejsze kondycjonowanie prętów, w rzeczywistych warunkach pracy i otuleniu prętów w betonie obserwowane reakcje byłyby wolniejsze.

Badania w zakresie reakcji zbrojenia kompozytowego GFRP na działanie wysokiej temperatury przeprowadzili również autorzy artykułu [43]. Analizie poddano zbrojenie kompozytowe wyprodukowane na bazie włókien szklanych, w trzech wariantach materiałowych tj. z zastosowaniem kolejno żywicy epoksydowej, winyloestrowej oraz poliestrowej), a także w dwóch modelach badawczych prętów kompozytowych jako samodzielnej próbki badawczej oraz prętów zalanych w betonie. Pręty kompozytowe poddano ekspozycji wysokich temperatur odpowiednio 150 °C, 300 °C, and 350 °C. W konkluzji przeprowadzonych badań, autorzy stwierdzają, że ekspozycja prętów na temperaturę 350 °C stanowi wartość graniczną, przy której znacząco spada wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, a powłoka żywiczna ulega degradacji generując szkodliwe i toksyczne efekty spalania. W wariantcie badań zbrojenia zabezpieczonego 20 mm otuliną betonową, zaobserwowano podłużne pęknięcia betonu na skutek podwyższonej temperatury, nie wystąpiła jednak znacząca degradacja samego zbrojenia. Badacze zauważyli również zależność pomiędzy rodzajem użytego rodzaju żywicy do produkcji prętów, a odpornością na działanie podwyższonych temperatur – w konkluzji badań stwierdzono, że zdecydowanie najlepsze właściwości w kontekście odporności na działanie temperatury posiadały pręty wykonane z zastosowaniem żywicy epoksydowej.

Dalsze badania zachowania zbrojenia GFRP zbliżone do [42-43] do których nawiązują autorzy [44] wskazując przykładowe zaobserwowane utraty wytrzymałości na rozciąganie – wg badania [46] pręty GFRP traciły odpowiednio 40 i 60% swojej pierwotnej wytrzymałości na rozciąganie w temperaturach 250 i 400 °C, a ich wytrzymałość zaczynała spadać w temperaturze powyżej 60 °C, z

kolei w badaniu [43] stwierdzono spadek wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia GFRP w temperaturze 315 °C o około 53% oraz o 75% w temperaturze 400 °C. W badaniu [48] zaobserwowano redukcję wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia GFRP o odpowiednio 22% przy temperaturze 120 °C oraz 67% przy temperaturze 500 °C.

Warto podkreślić, że jak wynika z analizy literatury, deklarowane przez producentów zbrojenia GFRP bardzo dobre parametry wytrzymałości na rozciąganie, na poziomie około dwukrotnie większym od przeciętnych parametrów stali zbrojeniowej znajdują potwierdzenie w wynikach realizowanych badań [103-104]. Należy mieć jednocześnie na względzie przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych z zastosowaniem zbrojenia GFRP określane laboratoryjnie parametry wytrzymałości na ściskanie, których wyniki są istotnie niższe od deklarowanej wytrzymałości na rozciąganie.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe prętów GFRP ujawniają istotną dysproporcję między ich bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie [103-104] a znacznie niższą wytrzymałością na ściskanie [105-106]. Wartości wytrzymałości na ściskanie prętów GFRP uzyskiwane w badaniach niszczących mieszczą się w przedziale od 55% do 60% deklarowanej wytrzymałości na rozciąganie, co stanowi istotną rozbieżność

Istotną obserwacją w zakresie szerokiego stosowania zbrojenia GFRP w konstrukcjach żelbetowych – w szczególności segmencie budynkowym jest zachowania kompozytu szklanego w warunkach podniesionych temperatur, które wg badań podsumowanych w [42-43, 46 48, 109] wykazują znaczny spadek parametrów w zakresie wytrzymałości na rozciąganie (na poziomie kilkudziesięciu procent przy temperaturach zbliżonych do 400°C), modułu sprężystości przy rozciąganiu, przy czym najbardziej niekorzystny wpływ na parametry mechaniczne zaczyna się powyżej temperatury zeszklenia żywicy (65-120 °C).

Podsumowując zagadnienie parametrów wytrzymałościowych zbrojenia GFRP, przy ich projektowaniu w elementach betonowych należy mieć na uwadze nie tylko bardzo wysokie parametry w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, ale również ograniczenia wynikające z niższej wytrzymałości na ściskanie oraz wrażliwości na wysokie temperatury , co może determinować ich zastosowanie w określonych warunkach obciążenia i ekspozycji, np. w modelowaniu obciążeń w scenariuszu rozwoju pożaru w obiektach kubaturowych.

Potencjalne obszary dalszych badań w zakresie właściwości prętów GFRP mogłyby skupić się np. na dalszej analizie wpływu wilgoci oraz zmiennych temperatur w ujęciu długoterminowym na stałość właściwości zbrojenia kompozytowego (w tym wpływie łącznym tych czynników); poszukiwaniu metod modyfikacji powierzchni zbrojenia GFRP celem poprawy ich przyczepności i trwałości połączenia z betonem.

2.2.4. Badania płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia GFRP

Przedmiotem głównych badań stanowiących zakres badawczy niniejszej pracy doktorskiej są płyty betonowe z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości m.in. w wariacie wzmacniania płyt zbrojeniem GFRP. Wobec powyższego, dokonano szczegółowego rozpoznania literatury w zakresie badań o zbliżonym charakterze. Stwierdzono, że realizowane są badania płyt betonowych z zastosowaniem GFRP w różnych konfiguracjach z klasyczną stałą zbrojeniową, przeważają badania w których płyty pracują pod obciążeniem w modelu czteropunktowego zginania albo przykładane jest obciążenie symulujące przebiecie płyty.

Zagadnienie stosowania zbrojenia kompozytowego jako alternatywy dla klasycznie stosowanej stali na podstawie badań doświadczalnych podejmują autorzy w kilku ośrodkach badawczych, czego wyrazem są prace [65-80] bazujące na doświadczalnej weryfikacji parametrów elementów pełnowymiarowych płyt w warunkach obciążenia, w modelu zginania płyty. Opracowaniem analizującym aspekt teoretyczny zamiennego do zbrojenia stalowego stosowania prętów GFRP jest praca [47], w której autorzy przeprowadzają przegląd stosowanych instrukcji do projektowania tego rodzaju elementów wskazując m.in. na [19,22-23] wraz z oceną ich dokładności, ocenę FRP jako trwałej alternatywy dla stali zbrojeniowej z uwzględnieniem stanów granicznych nośności i użyteczności, analizę projektową różnych typów płyt oraz porównanie właściwości stali i FRP w tym zastosowaniu. Autorzy w podsumowaniu wskazują m.in. na występowanie znacznych rozbieżności pomiędzy poszczególnymi instrukcjami do projektowania elementów zbrojonych FRP oraz na stan graniczny użyteczności jako kluczowy parametr który należy uwzględnić w projektowaniu płyt. Autorzy wskazują ponadto, że zbrojenie kompozytowe pomimo wyższych kosztów jednostkowych z uwagi na bardzo dobre parametry możliwe do wykorzystania w specyficznych warunkach pracy może być atrakcyjną alternatywą dla zbrojenia stalowego, jednak z uwagi na szerokie spektrum parametrów i w ocenie konserwatywne podejście do współczynników bezpieczeństwa proponowanych w instrukcjach konieczne jest prowadzenie dalszych szerokich badań nad zastosowaniem zbrojeń FRP w elementach betonowych i w efekcie wypracowanie uniwersalnych standardów.

Tematykę badań odpowiedzi płyt betonowych z zastosowaniem zbrojeń GFRP na obciążenie dynamiczne podejmują autorzy pracy [65]. Przedmiotem badań jest odpowiedź na obciążenia jednokierunkowo zbrojonych płyt betonowych o wymiarach 400 x 100 x 18 cm. W ramach badań przeprowadzono próby z wykorzystaniem dwóch pełnowymiarowych próbek. W skutek przyłożenia do płyt siły (poprzez uderzenie ciałem obcym) uzyskano wyniki, określające, że odkształcenie dla płyt zbrojonych prętami GFRP jest mniejsze w badanych okolicznościach o 25% od odkształceń dla płyt zbrojonych prętami stalowymi a czas tłumienia był o 37,5% krótszy dla płyt zbrojonych GFRP. Badania o

zbliżonym charakterze są przedmiotem opracowania [80], w ramach którego badaniom poddano trzynaście płyt o wymiarach 1000 x 1000 x 75 mm (2 bez zbrojenia, 5 z zbrojeniem stalowym, 6 z zbrojeniem GFRP) oraz dwie płyty o wymiarach 1000 x 1000 x 100 mm zbrojone stalą. W ramach przeprowadzonych eksperymentów badano odpowiedź przedmiotowych płyt na obciążenie dynamiczne, w tym w szczególności sposób zniszczenia, rozwój pęknięć, przemieszczenie oraz odkształcenie w czasie, które kolejno porównano pomiędzy różnymi rodzajami płyt tj. płytami bez zbrojenia lub zbrojonymi różnymi materiałami. W skutek przeprowadzonych badań stwierdzono dobrą zgodność pomiędzy analizą numeryczną i wynikami eksperymentu, a także określono, że zwiększenie stopnia zbrojenia lub grubości płyty wpływa korzystnie na odpowiedź elementu na obciążenie dynamiczne. Stwierdzono ponadto, że płyty z zbrojeniem GFRP osiągnęły lepsze wyniki niż płyty zbrojone stalą.

Kolejnym zespołem, który przeprowadził badania płyt betonowych zbrojonych prętami GFRP są autorzy opracowania [66]. Przedmiotem badań były pełnowymiarowe próbki scharakteryzowane wymiarami 600 x 450 x 50 mm, rozpiętość efektywna wynosiła 580 mm, a obciążenie przykładano punktowo – w środku płyty. W pracy poddaje się analizie odpowiedź badanych elementów z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego na obciążenie statyczne i cykliczne oraz porównuje się z płytami z zastosowaniem klasycznego zbrojenia stalowego. Jak wykazały badania, moment eksperymentalny był wyższy od momentu obliczeniowego – odpowiednio dla płyt z zbrojeniem stalowym o 19,4% a dla płyt z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych o 28,35%. Ponadto, autorzy pracy w ramach przeprowadzonych eksperymentów wykazali, że tożsame płyty zbrojone GFRP wykazały nośność wyższą o 3,6% oraz odkształcenie wyższe o 34,6% w stosunku do płyt zbrojonych stalą.

Płyty betonowe jednokierunkowo zbrojone prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych, poddane czteropunktowemu zginaniu były przedmiotem badań autorów opracowania [74]. W ramach eksperymentu przygotowano 8 pełnowymiarowych próbek płyt, o wymiarach 2400 x 1000 mm i wysokości 150 mm, próbki zabetonowano dwiema klasami betonu uzyskując odpowiednio dla klas wyniki wytrzymałości na ściskanie w przedziałach od 35,9 do 37,5 MPa oraz od 45,0 do 46,3 MPa. W ramach realizowanego badania płyty poddano czteropunktowemu zginaniu, obserwowano pracę płyt w warunkach obciążenia w odniesieniu do stanów granicznych użytkowości i nośności, aż do momentu zniszczenia płyt, które charakteryzuje się jako kruche zniszczenie. W podsumowaniu autorzy wskazują, że stopień zbrojenia przekroju jest kluczowym aspektem mającym wpływ na nośność elementów betonowych zbrojonych GFRP, jednocześnie podkreślają, że z uwagi na niski moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego wpływ zwiększenia stopnia zbrojenia na zmniejszenie skali powstawania rys w przekroju pod obciążeniem jest marginalny. Autorzy w podsumowaniu sugerują przy projektowaniu płyt betonowych z zastosowaniem tego rodzaju zbrojenia, stosowanie większego stopnia zbrojenia, celem

zabezpieczenia mniej nagłego modelu zniszczenia, czyli zniszczenia betonu w strefie ściskanej elementu, a nie zerwanie rozciąganych prętów GFRP, który w ocenie autorów jest bardziej korzystny dla bezpieczeństwa konstrukcji.

Przedmiot badań będących tematem artykułu [78] stanowią badania eksperymentalne jedenastu płyt betonowych o wymiarach 1750 x 700 mm i zmiennej grubości od 100 do 150 mm, spośród których dziewięć zbrojono prętami GFRP, a dwie klasyczną stalą. Klasę betonu oznaczoną na próbkach sześciennych dla przedmiotowych płyt po 28 dniach określono jako średnią wytrzymałość na poziomi 66,3 MPa. Płyty poddano obciążeniu w dwóch punktach o rozstawie 500 mm w maszynie wytrzymałościowej, celem określenia ich odpowiedzi na obciążenie – w szczególności oznaczenia momentu niszczącego, maksymalnego ugięcia oraz układu pęknięć. Autorzy badania w podsumowaniu, wskazują, że model zniszczenia płyt jest zróżnicowany – płyty o małym stopniu zbrojenia ulegają kruchemu zniszczeniu, a płyty o dużym stopniu zbrojenia ulegają zmiężdżeniu betonu w strefie ściskanej połączone z zerwaniem zbrojenia GFRP. Zaobserwowano ponadto, występowanie większych ugięć w płytach zbrojonych kompozytem szklanym w stosunku do analogicznych płyt zbrojonych stalą. Autorzy wskazują ponadto na dobrą zgodność (na poziomie 86%) obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentalnymi.

Modyfikację modelu badawczego płyty jednokierunkowo zbrojonej zbliżonego do eksperymentów opisanych w opracowaniach [65-66,74,78] zaproponowali autorzy pracy [79]. W modelu badawczym płyty jednokierunkowo zbrojonej prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych zaproponowali wprowadzenie otworów. W przypadku dwóch płyt wzmocnionych taśmami polimerowymi na bazie włókien węglowych, dwie kolejne płyty posiadały otwory bez wzmocnień CFRP, a jedna płyta została wykonana jako pełna bez otworowania. W ramach badania przygotowano 5 pełnowymiarowych próbek płyt o gabarytach 2650 x 750 mm i grubości 150 mm, rozpiętość między podporami przy badaniu wynosiła 2500 mm, średnia wytrzymałość na ściskanie próbek betonu użytego do wykonania płyt wynosiła 35 MPa po 28 dniach. Cele badania wskazane przez autorów to w szczególności określenie jak otwory wpływają na nośność graniczną, sztywność i odkształcenia płyt zbrojonych GFRP oraz ocena skuteczności wzmocnienia krawędzi otworów z zastosowaniem taśm CFRP. W skutek przeprowadzonej próby wytrzymałościowej i poddaniu płyt czteropunktowemu zginaniu aż do ich zniszczenia – wszystkie płyty uległy zniszczeniu poprzez zniszczenie betonu w strefie ściskanej, za wyjątkiem płyty pełnej, która uległa zniszczeniu pod punktem obciążenia przy czym nie zaobserwowano zerwania prętów GFRP. Zaobserwowano, że wzmacnianie otworów w płytach taśmami CFRP okazało się skutecznym sposobem dla zwiększenia nośności oraz sztywności płyt z otworami, a odkształcenie zbrojenia GFRP w przedmiotowych płytach zostało skutecznie zredukowane dzięki zastosowaniu wzmocnień wykonanych z CFRP (redukcja na poziomie 23-25%). W skutek przeprowadzonych eksperymentów, zaobserwowano, że w porównaniu

z płytą pełną nośność płyty z otworami w środku rozpiętości zmniejszyła się o około 41% dla jednego otworu, i około 43% dla dwóch otworów. Autorzy w konkluzji sygnalizują, że wyniki analizy MES osiągnęły dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi.

Badania nad zachowaniem płyt betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych oraz porównawczo płyt z zbrojeniem stalowym pod obciążeniem statycznym w modelu pracy czteropunktowego zginania przeprowadzili autorzy opracowania [76]. Badane płyty (przygotowano 16 pełnowymiarowych próbek z czego 14 zbrojono za pomocą GFRP a 2 klasycznej stali) miały wymiary 4000 x 1200 mm, przy zróżnicowanej grubości 150 i 200 mm, zbadana średnia wytrzymałość betonu na ściskanie na próbkach walcowych wyniosła 33 MPa. W ramach wniosków z badań autorzy wskazują, że ugięcia i odkształcenia płyt zbrojonych GFRP były co do zasady wyższe, niż płyt zbrojonych stalą oraz wskazują, że w ich ocenie instrukcja [19] zbyt konserwatywnie podchodzi do procedury obliczeniowej wyznaczania nośności granicznej, przy czym wskazują, że w ich ocenie bardziej adekwatne okazują się być wytyczne obliczeniowe zawarte w instrukcjach [21-22].

Kolejnym zespołem badawczym prowadzącym doświadczalną weryfikację odpowiedzi na zginanie płyt betonowych zbrojonych jednokierunkowo prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych są autorzy opracowania [77]. Badaniu poddano dwa typy płyt – płyty pełne oraz płyty z otwartymi kanałami w środku wysokości płyty – odtwarzające typową konstrukcję prefabrykowanych płyt strunobetonowych. W ramach badania dokonano eksperymentalnego sprawdzenia odpowiedzi na czterech płyt o wymiarach 2400 x 750 mm o grubości 175 mm i oznaczonej badawczo średniej wytrzymałości na ściskanie betonu o wartości 51,8 MPa na czteropunktowe zginanie. W badaniu zastosowano dwie płyty pełne – zbrojone GFRP oraz dwie płyty kanałowe – z których jedną zazbrojono GFRP, a drugą klasyczną stalą. W skutek przeprowadzonych badań, autorzy przedstawili wnioski zbieżne z opracowaniem [76] w zakresie wykazywania przez płyty zbrojone GFRP większych ugięć i odkształceń w stosunku do płyt zbrojonych klasyczną stalą. W ramach opracowania przeanalizowano również różnice pomiędzy odpowiedzią na zadane obciążenia płyty pełnej i płyty kanałowej (w obu przypadkach zbrojonych GFRP). W skutek ww. analizy porównawczej, stwierdzono, że płyta z pustymi kanałami wykazała redukcję sztywności po pęknięciu o 60% w stosunku do płyty pełnej oraz nośność płyty kanałowej była tylko o 9% niższa od nośności płyty pełnej, co dowodzi, że stosowanie pustych kanałów w płytach zbrojonych GFRP może być dobrym sposobem na redukcję ciężaru własnego przy stosunkowo niewielkiej utracie nośności. Dodatkowo, badacze wskazują, że utrata nośności płyty kanałowej z zastosowaniem GFRP w stosunku do płyty pełnej była mniejsza niż utrata nośności płyty kanałowej z zastosowaniem stali zbrojeniowej w stosunku do teoretycznej płyty pełnej zbrojonej stalą (płyty nie wykonano- zamodelowano) –

wskazując, że to nieliniowe właściwości GFRP przyczyniły się do uzyskania korzystniejszych wyników analizy dla tego materiału.

Przedmiotem badań zespołu projektowego będącego autorami opracowania [69] były płyty jednokierunkowo zbrojone, z zastosowaniem w płytach na głównym kierunku działania obciążeń kombinację prętów wykonanych z klasycznej stali zbrojeniowej oraz prętów GFRP. Celem badania było określenie wpływu zastosowania GFRP jako częściowego zamiennika zbrojenia stalowego. Przedmiotem badań były trzy pełnowymiarowe próbki płyt o wymiarach 1500 x 550 x 120 mm, poddane czteropunktowemu zginaniu. W skutek przeprowadzonego eksperymentu, stwierdzono, że zastąpienie części prętów zbrojenia stalowego prętami GFRP podnosi wytrzymałość na zginanie płyty, przy jednoczesnym wzroście ugięcia.

Eksperyment o zbliżonym charakterze do [69] oraz [74] tj. poddanie płyt betonowych z zbrojeniem GFRP czteropunktowemu zginaniu przeprowadzili autorzy opracowania [73], w artykule porównawczo zaprezentowano również wyniki badań dla płyt zbrojonych klasyczną stalą. Przygotowano do badań 8 płyt (4 zbrojone GFRP, 4 klasyczną stalą) o tożsamy wymiarach 2000 x 600 mm, przy grubości 125 mm, wytrzymałość na ściskanie betonu użytego w opracowaniu zgodnie z przedstawionymi wynikami to około 30 MPa. Połowa przygotowanych próbek została wykonana z zastosowaniem klasycznego betonu, a połowa z domieszką Alccofine, stosowano również piasek M-sand. W skutek przeprowadzonych badań stwierdzono, że dodatek Alccofine wpływa korzystnie na właściwości mechaniczne betonu natomiast stosowanie piasku M-sand pozostaje obojętne lub pomijalnie wpływa na zmianę wytrzymałości betonu. W zakresie badań wytrzymałościowych płyt zaobserwowano, że płyty zbrojone GFRP uległy kruchemu zniszczeniu, podczas gdy próbki zbrojone stalą zbrojeniową wykazały stopniowe zniszczenie tj. wystąpiło ugięcie oraz absorpcja energii przed zniszczeniem. Autorzy opracowania podkreślają, że zachodzą znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentu a kalkulacją teoretyczną przeprowadzoną w oparciu o [19]. Powyższe, powoduje w ocenie autorów konieczność doprecyzowania wytycznych projektowych dla zbrojenia kompozytowego, ponieważ w ramach badania zaobserwowano, że prowadzenie obliczeń w oparciu o dostępne instrukcje na przykład [19] prowadzi do znaczącego niedoszacowania wytrzymałości elementów betonowych z zbrojeniem kompozytowym. W ocenie autorów celem dalszej poprawy parametrów wytrzymałościowych i optymalizacji stosowania GFRP jako alternatywy dla zbrojenia stalowego badanych płyt należałoby kontynuować badania, zwiększając ilość zbrojenia przy jednoczesnym zmniejszeniu jego rozstawu.

Badania płyt o podobnym charakterze do opracowań [69,73-74] polegające na doświadczalnej weryfikacji wytrzymałości płyt betonowych na zginanie przeprowadzili autorzy opracowania [75]. Przeprowadzona doświadczalna

weryfikacja wytrzymałości płyt na zginanie przeprowadzono dla dwóch pełnowymiarowych próbek płyt o wymiarach 1500 x 600 mm i wysokości 125 mm, dla zbrojenia pierwszej z próbek wykorzystano klasyczną stal zbrojeniową, natomiast drugą z nich na kierunku głównym zbrojono prętami GFRP oraz wzmocniono jako zbrojenie dodatkowe/rozdzielcze geokrątką kompozytową. Do wykonania płyt użyto betonu o zbadanej doświadczalnie wytrzymałości na ściskanie na próbkach walcowych równej 25,58 MPa. Autorzy opracowania zamodelowali próbki będące przedmiotem badań w systemie Abaqus, uzyskując znaczną zbieżność modelu numerycznego i wyników eksperymentalnych – dla płyty zbrojonej stalą w ramach eksperymentu wykazano teoretyczny zapas nośności na poziomie 5%, natomiast dla płyty zbrojonej prętami GFRP i geokrątką na poziomie 13% oraz dla ugięcia odpowiednio 10% dla próbki zbrojonej klasyczną stalą oraz 30% dla próbki w której zastosowano elementy kompozytowe. Powyższe w ocenie autorów wskazuje, że teoretycznie wyznaczane wartości graniczne wykazują większe zapasy w zakresie ugięcia niż nośności tego rodzaju elementów zbrojonych GFRP.

Badania płyt betonowych z zastosowaniem klasycznego zbrojenia stalowego, zbrojenia kompozytowego oraz włókien stalowych z zakończeniem hakowym przeprowadzili autorzy pracy [67]. W ramach przeprowadzonych badań laboratoryjnych testowano próbki – płyty betonowe o wymiarach 1000 x 1500 x 75 mm – z czego pierwsza z nich stanowiła płytę pełną zbrojoną stalą, druga i trzecia płyty żebrowane, zbrojone odpowiednio klasyczną stalą i prętami GFRP. Płyty poddano trójpunktowemu zginaniu. W wyniku przeprowadzonych badań, autorzy wskazują, że płyta żebrowana z zastosowaniem wkładek GFRP w stosunku do płyty żebrowanej z klasycznym zbrojeniem stalowym wykazała o 119,2% większą nośność oraz o 92,3 % większe ugięcie. Zdaniem autorów, stosowanie włókien stalowych jako domieszki do betonu przy tego rodzaju elementach konstrukcji korzystnie wpływa na szereg parametrów takich jak: zmniejszenie powstawania pęknięć, zwiększenie wytrzymałości betonu na rozciąganie, zwiększenie absorpcji energii, zwiększenie odporności na obciążenia dynamiczne, poprawa dyktulności i odporności na kruche zniszczenie.

Autorzy opracowania [67] przeprowadzili badania wytrzymałości płyt na zginanie, charakterystycznym parametrem tego badania poza zastosowaniem jako zbrojenia prętów GFRP było wykonanie próbek z betonu o wysokiej wytrzymałości – 60 MPa (średnia wytrzymałość próbek betonu użytego do badania wynosiła po 28 dniach 66,3 MPa). W badaniu użyto pełnowymiarowych próbek płyt o wymiarach 1750 x 700 mm o zróżnicowanej wysokości od 100 do 150 mm. Płyty zbadano na stanowisku odwzorowującym zginanie czteropunktowe, rozstaw pomiędzy siłami przyłożonymi przez maszynę obciążeniową wynosił 500 mm. W ramach przeprowadzonego badania stwierdzono obraz zniszczenia poprzez kruche zniszczenie oraz zerwanie prętów GFRP. Stwierdzono ponadto, że zachowanie płyt było liniowo sprężyste aż do zniszczenia. Autorzy dodatkowo odnieśli wyniki eksperymentu do wyliczeń

teoretycznych, stwierdzając zgodność na poziomie 86%, dowodząc tym samym znaczny poziom zapasu współczynników bezpieczeństwa zalecanych w instrukcjach obliczeniowych w stosunku do doświadczalnie określonych parametrów zbrojenia GFRP.

W ramach opracowania [72] autorzy przeprowadzili badania pełnowymiarowych płyt z rdzeniem drążonym wzmocnionych prętami GFRP, które dodatkowo zostały sprężone przed badaniem – przygotowano cztery próbki, badaniu poddano trzy z uwagi na uszkodzenie jednej z nich. Płyty grubości 150 mm, długości 4200 mm oraz rozpiętości między osiami kanałów 142 mm, wykonane z betonu o wytrzymałości charakterystycznej 80 MPa. Próbki poddano działaniu obciążenia równomiernie rozłożonego, co spowodowało zginanie płyt. Autorzy opracowania wskazują w wnioskach m.in. maksymalna siła sprężająca dla prętów GFRP nie powinna przekraczać 30% deklarowanej dla materiału wytrzymałości na rozciąganie (f_u) ze względu na ryzyko ich pęknięcia; obserwuje się bezpośrednią zależność pomiędzy wzrostem obciążenia granicznego a siłą sprężającą tylko do poziomu 20 % deklarowanej dla materiału wytrzymałości na rozciąganie (f_u) oraz nie rekomenduje się przekraczania tego poziomu, który ocenia się jako optymalny; pręty GFRP sprężane siłami w ramach wskazanych w artykule przedziałów nie wykazywały utraty przyczepności do betonu.

Badania laboratoryjne związane z rozpoznaniem wytrzymałości na przebicie płyt żelbetowych zbrojonych wkładkami GFRP przeprowadzili autorzy opracowania [68]. Przedmiotem badań są trzy pełnowymiarowe próbki płyt o gabarytach 1500 x 1500 x 100 mm z zlokalizowanym centrycznie słupkiem o wymiarach 150 x 150 mm, stanowiącym miejsce przyłożenia siły w badaniu. Każda z płyt została wykonana z innej klasy betonu – odpowiednio 30 (beton zwykłej wytrzymałości), 60 oraz 90 MPa (betony podwyższonej wytrzymałości). Płyty były podparte w sposób swobodny na sztywnej ramie stalowej wzdłuż wszystkich czterech krawędzi, obciążenie przyłożono centrycznie do płyt poprzez słupek o przekroju kwadratowym. Autorzy zaobserwowali, że zwiększenie wytrzymałości betonu odpowiednio z 30 MPa do 60 MPa oraz z 60 MPa do 90 MPa prowadzi do wzrostu nośności na przebicie odpowiednio o 5,6% oraz 8,9 %. Obraz zniszczenia dla przeprowadzonych eksperymentów to w każdym z trzech przypadków kruche zniszczenie, charakteryzujące się obwodowymi pęknięciami wokół słupa. Autorzy wskazują ponadto, że wpływ sztywności zbrojenia na nośność na przebicie jest większy, przy betonach o zwykłej wytrzymałości.

Badania płyt z zastosowaniem zbrojenia GFRP przeprowadzili również autorzy [70] badając płyty dwukierunkowo zbrojone (z zastosowaniem stali zbrojeniowej lub prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych), o wymiarach 900 x 900 mm oraz 1200 x 1200 mm o zdywersyfikowanych grubościach 10 i 12 cm (dla obu wymiarów płyt). Podobnie jak w badaniach będących przedmiotem pracy [68] jako obraz zniszczenia rozpoznano kruche zniszczenie, ponadto analogicznie do [68] stwierdzono, że parametrami wpływającymi na nośność na przebicie płyt

zbrojonych kompozytem szklanym są stopień zbrojenia oraz moduł sprężystości zastosowanych prętów GFRP, jednocześnie autorzy zarówno [68] jak i [70] wskazują, że dostępne instrukcje do projektowania niedostatecznie opisują metody obliczeniowe dla określenia nośności na przebicie płyt zbrojonych GFRP. Opracowanie [48] wykazuje dodatkowo analizę porównawczą płyt zbrojonych GFRP do płyt zbrojonych klasyczną stalą zbrojeniową, określając że dla płyt z zastosowaniem kompozytu wytrzymałość na przebicie jest istotnie niższa – różnica wynosi około 52-55%, płyty te wykazały ponadto większe odkształcenie.

Badania płyt z zastosowaniem zbrojenia stalowego (siatka dolna i górna) oraz prefabrykowanych krat GFRP jako zbrojenia na przebicie (zlokalizowano w środku wysokości płyty, pomiędzy siatkami zbrojenia stalowego) przeprowadził zespół badaczy, który opublikował w ramach ich podsumowania dwa artykuły [110-111]. W ramach badania przetestowano łącznie osiem płyt betonowych o wymiarach 1100 x 1100 mm i zdywersyfikowanej grubości 115 lub 150 mm z zlokalizowanym w centralnej części płyty słupkiem o wymiarach 300 x 300 x 300 mm do którego przyłożono obciążenie celem zasymulowania przekazywania obciążenia punktowo na płytę, siedem płyt zbrojono stalą zbrojeniową z wkładką przebiciową z kraty GFRP, jedną płytę wykonano bez wkładki, oznaczona na próbkach wytrzymałość na ściskanie zawierała się w przedziale od 28,6 MPa do 31,8 MPa, wskazując jako średnią wartość 29,7 MPa. W ramach badania zasymulowano model pracy płyty poprzez przebicie obciążeniem przyłożonym od góry płyty za pośrednictwem słupka o wys. 300 mm, płyty zamocowano na trzech krawędziach. W skutek przeprowadzonych badań, autorzy wskazali, że aplikacja krat GFRP w przestrzeni pomiędzy zbrojeniem górnym i dolnym płyty poprawia nośność na przebicie, a skala poprawy zależna jest od rozmiaru kraty oraz jej grubości, autorzy wskazują jednocześnie, że położenie kraty w przekroju ma istotny wpływ na wyniki wytrzymałościowe – najbardziej korzystne jest umiejscowienie kraty w dolnej części przekroju tj. w rozciąganej części płyty, co istotnie zwiększa nośność płyty na przebicie. Autorzy wskazują ponadto, że w płytach w których zastosowano kraty GFRP w funkcji zbrojenia na przebicie, wystąpiło bardziej kontrolowane pękanie oraz większe ugięcie przed ostatecznym zniszczeniem elementu.

Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury, prowadzone są również badania nad zastosowaniem w płytach betonowych sprężonego zbrojenia GFRP, co opisują autorzy opracowania [112]. W ramach swoich eksperymentów przeprowadzili badania segmentowych prefabrykowanych płyt betonowych możliwych do zastosowania np. w podkładach pontonowych, gdzie kluczowe są właściwości odporności na korozję zbrojenia GFRP w agresywnych warunkach morskich. W ramach badania przygotowano sześć pełnowymiarowych płyt, składających się z trzech segmentów o gabarytach 1000 x 600 x 125 mm. Wielkogabarytowe próbki poddano próbom zginania, w dwóch modelach orientacji płyt – w pierwszym wariantcie trzy płyty ułożono poziomo dla których sprężenie to odpowiednio – dla pierwszej (płyta referencyjna) sprężenie ręczne

(dokręcenie), dla drugiej sprężenie z siłą 10,5 kN, dla trzeciej sprężenie z siłą 64 kN, w drugim ułożeniu pionowo (krawędziowo) – płyty postawiono na krawędzi szerokości 125 mm dla których sprężenie to odpowiednio – dla pierwszej (płyta referencyjna) sprężenie ręczne (dokręcenie), dla drugiej sprężenie z siłą 21 kN, dla trzeciej sprężenie z siłą 45 kN. W obu wariantach płyty zostały poddane zginaniu czteropunktowemu pod obciążeniem statycznym, doprowadzając do ich zniszczenia. Autorzy w ramach podsumowania wskazali, że w obu przypadkach zachowanie badanych płyt było liniowo-sprężyste, natomiast w przypadku ułożenia krawędziowego ugięcie płyt od ciężaru własnego było istotnie mniejsze o około 70 procent. Autorzy wskazują, że niezależnie od orientacji płyt uległy zniszczeniu przy podobnym poziomie obciążenia, ponadto zaobserwowano, że w miarę wzrostu siły sprężającej występowało zmniejszenie ugięcia płyt oraz model pracy płyty segmentowej wykazywał zbliżoną pracę do płyty monolitycznej. Autorzy wskazują, że wyższy poziom sprężenia spowodował wzrost nośności płyt o około 10% oraz ograniczał rozwój powstawania rys. W konkluzji badacze wskazują, że dostępne instrukcje obliczeniowe m.in. [19] zaniżają nośność elementów betonowych, wobec czego autorzy zaproponowali współczynnik redukcyjny urealniający przewidywaną nośność do wyników badań eksperymentalnych, proponując rewizję równania dostępnego w [19], jednocześnie wskazując na konieczność prowadzenia dalszych badań nad elementami zbrojonymi kompozytem, celem dalszego rozwoju i urealnienia procedur obliczeniowych tego rodzaju konstrukcji.

Zbrojenie kompozytowe GFRP jest przedmiotem szerokiego zainteresowania badaczy w zakresie aplikacji w konstrukcjach pracujących w warunkach agresywnego środowiska morskiego, z tego względu przeprowadzone zostały badania opisane w [84-85] dotyczące badania płyt betonowych, symulujących konstrukcję oraz model pracy podkładów pontonowych. W badaniu opisanym w [84] płyty zostały poddane czteropunktowemu zginaniu, natomiast w badaniu opisanym w [85] czystemu skręcaniu. W podsumowaniu eksperymentu będącego przedmiotem [84] autorzy wskazują, że zastosowanie wycięcia w płycie zmniejszyło jej nośność, co zostało w części zredukowane poprzez zastosowanie podwójnej siatki zbrojenia GFRP, a zwiększanie stopnia zbrojenia zwiększało nośność. Autorzy [84] wskazują, że wyniki badań eksperymentalnych dla płyt litych wykazały wyższą nośność niż wartości teoretyczne wyznaczone wg [19,22], natomiast w odniesieniu do płyt z wycięciem wartości teoretyczne nośności wyznaczone wg [19,22] okazały się zbyt małe. Analogiczny wpływ obecności wycięcia na krawędzi płyty na jej zachowanie zaobserwowali autorzy badania [85], wg ich analizy obecność wycięcia spowodowała gorszą odpowiedź płyty na skręcanie, a obecność podwójnej warstwy zbrojenia GFRP oraz zwiększenie stopnia zbrojenia w płycie ją poprawiała. Badacze odpowiedzialni za opracowanie obu analiz [84-85] wskazują na konieczność realizacji dalszych badań oraz dalszej pracy nad doskonaleniem procedur obliczeniowych, co pozwoliłoby bardziej efektywnie odzwierciedlać przewidywaną odpowiedź elementów betonowych zbrojonych GFRP w różnych warunkach obciążeń.

Tematyka badania płyt wraz z ich właściwym i optymalnym projektowaniem jest niezwykle istotna, ponieważ stanowi pole do szerokiego stosowania i zastępowania zbrojeń stalowych zbrojeniami kompozytowymi, z uwagi na pracę w modelu zginanym, gdzie zbrojenia kompozytowe wykazują bardzo dobre parametry – w większości przypadków wyższe parametry nośności od płyt zbrojonych stalą, przy czym kluczowym parametrem jest stopień zbrojenia przekroju.

Autorzy opracowań w tym zakresie, często obok doceniania wyników badań wytrzymałościowych, podkreślają konieczność prowadzenia dalszych szerokich badań oraz dążenia do optymalizacji modeli obliczeniowych proponowanych w instrukcjach, ponieważ jak wynika z wielu badań współczynniki bezpieczeństwa dla tego rodzaju konstrukcji pozostawiają margines zapasu nośności.

Liczne badania płyt betonowych zbrojonych GFRP w modelu pracy zginanej konsekwentnie wskazują na większe ugięcia i odkształcenia w porównaniu z płytami w których zastosowano klasyczne zbrojenie stalowe, co jest bezpośrednią konsekwencją niższego modułu sprężystości przy rozciąganiu zbrojenia GFRP w stosunku do stali, a przypadki badań płyt z obecnością otworów w strukturze, wskazują że powodują one redukcję nośności i zwiększenie odkształcenia, których negatywny wpływ może zostać zredukowany poprzez zastosowanie dodatkowych wzmocnień w postaci np. wkładek zbrojeniowych.

Jak wynika z powyższego, projektowanie płyt zbrojonych GFRP wymaga starannego doboru stopnia zbrojenia i uwzględnienia ograniczeń związanych z ugięciami, a także ewentualnych specyficznych rozwiązań w przypadku występowania otworów, ponieważ wpływ ich występowania zdaje się mieć większy wpływ na pracę konstrukcji niż w przypadkach płyt zbrojonych stalą.

Potencjalne kierunki dalszych badań i analiz w obszarze płyt betonowych z zbrojeniem kompozytowym to m.in. dążenie do określenia optymalnych proporcji rozwiązań hybrydowych stal/kompozyt w celu osiągnięcia efektywnej pracy danego elementu; dalsza analiza metod wzmocniania otworów celem ograniczenia ich negatywnego wpływu na pracę płyt zbrojonych kompozytem; analiza dostępnych w istniejących instrukcjach procedur obliczeniowych celem ich lepszego dostosowania do faktycznych nośności i modelu pracy konstrukcji.

2.2.5. Badania płyt betonowych z zastosowaniem pozostałych zbrojeń FRP

Celem szerszego rozpoznania stanu wiedzy w zakresie badań płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP, co może prowadzić do lepszego poznania zagadnienia pracy zbrojenia FRP w elementach betonowych dokonano również analizy eksperymentów z zastosowaniem innych niż GFRP prętów kompozytowych.

Autorzy artykułu [57] przeprowadzili eksperyment, polegający na badawczej weryfikacji wytrzymałości czterech płyt betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi (dwie z zastosowaniem prętów uźebrowanych na bazie włókien bazaltowych, dwie z zastosowaniem prętów na bazie włókien węglowych gładkich), a także mający na celu weryfikację zachowania w podobnych warunkach obciążenia płyt wykonanych z zastosowaniem różnych rodzajów zbrojenia FRP bazującego na włóknach węglowych oraz bazaltowych. Przed rozpoczęciem badań na podstawie teoretycznej analizy porównawczej, założono, że w skutek zaplanowanych badań niszczących płyty betonowe z zastosowaniem prętów FRP powinny wykazać wyższą nośność niż tradycyjnie zbrojone stalą, z uwagi na lepsze parametry wytrzymałościowe zbrojenia FRP w stosunku do zbrojenia stalowego. W wyniku przeprowadzonych badań, stwierdzono, że obraz zniszczenia płyt z zastosowaniem zbrojenia bazaltowego był zgodny z założeniami teoretycznymi określonymi na bazie instrukcji ACI 440.1R [19] (jednocześnie potwierdziły się założenia o znacznie większej nośności w stosunku do płyt zbrojonych prętami stalowymi), natomiast płyty zbrojone prętami FRP na bazie węgla wykazały nośność na poziomie 40 procent wyliczeń teoretycznych – co w ocenie autorów opracowania było efektem słabego połączenia pomiędzy prętami kompozytowymi a betonem w strukturze płyt (co autorzy opracowania wiąże z zastosowaniem prętów o gładkiej strukturze). Wnioskiem autorów opracowania z przeprowadzonego eksperymentu, jest obserwacja, że szczególnie istotne w określeniu parametrów nośności płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego jest uzwojenie zbrojenia – w ocenie autorów określone w instrukcji ACI 440.1R wytyczne do projektowania są właściwe dla prętów uźebrowanych, podczas gdy z uwagi na brak możliwości osiągnięcia właściwej przyczepności prętów zbrojeniowych i betonu w przypadku stosowania prętów gładkich nie są prawidłowe.

Badania opisywane w artykule [57] są kontynuacją pracy zespołu badawczego, który kilka lat wcześniej przeprowadził badania płyt betonowych zbrojonych prętami z włókien bazaltowych opublikowanych w pracy [129]. Badacze wykonali dwie próbki - płyt betonowych jednoprzęsłowych oraz dwuprzęsłowych zbrojonych prętami z włókien bazaltowych i obciążyli analogicznie do badań opisanych w artykule [57] dwiema jednakowymi siłami skupionymi wg poniższego schematu:

Autorzy w założeniach do realizowanych zadań skupili się na zagadnieniu ugięcia płyt betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie włókien bazaltowych, które wg danych producenta charakteryzują się modulem sprężystości na poziomie (90 GPa), który jest ponad dwukrotnie mniejszy od modułu sprężystości stali zbrojeniowej określanego na poziomie (200 GPa), wobec czego w ocenie autorów należało spodziewać się znacznych ugięć przygotowanych płyt. Wnioski z przeprowadzonego badania dowodzą, że zgodnie z przewidywaniami bazującymi na deklarowanym przez producenta module sprężystości, określone eksperymentalnie ugięcia miały bardzo duże wartości, a

mechanizm ugięcia w obu seriach płyt odpowiadał kruchemu miażdżeniu betonu w strefie ściskanej. Wobec przeprowadzonych badań i analizy teoretycznej, autorzy dochodzą do wniosku, że zbrojenie kompozytowe nie stanowi atrakcyjnej alternatywy dla stali zbrojeniowej w elementach betonowych zginanych, ponieważ jedyną możliwością uzyskania oczekiwanych parametrów ugięć i nośności w tego typu elementach konstrukcji byłoby znaczne zwiększenie stopnia zbrojenia belek czy płyt, co powodowałoby utratę walorów ekonomicznych stosowania zbrojenia kompozytowego.

Badania nad płytami betonowymi z zastosowaniem elementów kompozytowych przeprowadzili również autorzy artykułu [113], wykonując element badawczy reprezentujący kształtem i konstrukcją element przęsła mostowego, w różnych wariantach tj. 3 elementy zbrojone z zastosowaniem materiałów kompozytowych na bazie włókien węglowych (włókniną, siatką, zbrojenie rozproszone), pozostałe bez zbrojenia w ogóle. Badanie polegało na analizie zmęczeniowej próbek pod obciążeniem. Zrealizowane badania wykazały, że zbrojenie siatką jak i włókniną kompozytową na bazie włókien węglowych w konstrukcjach mostowych, jest równie efektywne pod względem parametrów zmęczeniowych.

Badania płyt betonowych zbrojonych prętami na bazie włókien węglowych przeprowadzili autorzy opracowania [114]. W ramach zrealizowanego eksperymentu próbom poddano cztery pełnowymiarowe płyty (trzy zbrojone kompozytem na bazie włókien węglowych oraz jedną klasyczną stalą) o wymiarach 3300 x 1000 mm i wysokości 250 mm, rozpiętość efektywna przy badaniu wynosiła 3000 mm, a oznaczona wytrzymałość na ściskanie wynosiła 45 MPa. Przygotowane płyty podzielono na dwie partie i poddano badaniom w dwóch modelach obciążeń tj. dla jednej z płyt czteropunktowemu zginaniu w ramach którego płyty obciążono symetrycznie w 1/3 rozpiętości przykładając obciążenie w odległości 1000 mm od siebie oraz dla pozostałych płyt (tj. dwóch zbrojonych kompozytem CFRP oraz jednej zbrojonej stalą jako materiał porównawczy) przyłożono obciążenie na środku elementu za pośrednictwem kwadratowej stalowej płytki o wymiarach 300 x 300 x 25 mm, w skutek przeprowadzonego obciążenia płyt doprowadzono do ich zniszczenia.

W skutek obserwacji pracy płyt pod obciążeniem oraz modelu ich zniszczenia, autorzy [114] konkludują, że model pracy płyt zbrojonych CFRP można scharakteryzować jako dwuliniowo sprężysty aż do momentu zniszczenia oraz wykazują, że sztywność płyt zbrojonych kompozytem znacząco zmniejszyła się po inicjacji zarysowań w stosunku do klasycznych płyt z zbrojonych stalą. Autorzy wskazują ponadto, aby zapewnić właściwą odpowiedź płyt na zginanie celem kontroli ugięć, konieczne jest dobieranie odpowiednio wysokich wskaźników zbrojenia CFRP w przekroju. Autorzy zaobserwowali także znacząco większe wielkości powstających rys oraz wartości ugięć podczas obciążania płyt zbrojonych kompozytem w stosunku do elementów, w których zastosowano zbrojenie stalowe.

Główne wnioski z przeanalizowanych w ramach przeglądu literatury badań płyt z zbrojeniami FRP innymi niż GFRP, są zbliżone do badań dotyczących prętów na bazie włókien szklanych – wskazuje się na dobre parametry wytrzymałościowe oraz konieczność dokładnej kontroli ugięć, których większe wartości są charakterystyczne dla płyt zbrojonych BFRP i CFRP ze względu na ich niższy moduł sprężystości przy rozciąganiu w porównaniu do zbrojenia stalowego .

Szczególną uwagę zwracają badania na kluczową rolę przyczepności między prętami FRP a betonem, gdzie zastosowanie prętów gładkich może prowadzić do znacznego obniżenia nośności w stosunku do analiz teoretycznych . Zatem, wybierając rodzaj zbrojenia FRP do płyt betonowych, należy uwzględnić nie tylko wytrzymałość włókien, ale również charakterystykę powierzchni prętów i prognozowaną jakość ich połączenia z betonem , co ma bezpośredni wpływ na efektywność przenoszenia naprężeń i ogólną odpowiedź konstrukcji.

Analogicznie do wniosków płynących z części przeglądu literatury dotyczących badań w zakresie płyt zbrojonych GFRP, autorzy badań dotyczących płyt z zastosowaniem zbrojeń BFRP i CFRP sygnalizują konieczności dalszej pracy nad instrukcjami obliczeniowymi, celem ich optymalizacji i urealnienia współczynników obliczeniowych.

Potencjalne kierunki dalszych badań i analiz w obszarze płyt betonowych z zbrojeniem kompozytowym innym niż GFRP tożsame z propozycjami dla płyt z zbrojeniem GFRP, zawartymi w podsumowaniu podrozdziału 2.2.4.

2.2.6. Badania innych elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP

Mając na uwadze, że zbrojenie FRP jest szeroko badane na całym świecie celem właściwego i niezawodnego rozpoznania parametrów, a także aktualizacji i uszczegółowienia procedur obliczeniowych w ramach niniejszego przeglądu literatury rozpoznano wybrane pozycje literaturowe dotyczące różnego rodzaju badań wytrzymałościowych z zastosowaniem pozostałych rodzajów zbrojeń FRP – w tym również w rozwiązaniach hybrydowych (połączenia stali i kompozytu). Warta uwagi jest skala prowadzonych badań w kontekście stosunkowo niewielkiej popularności tego rodzaju materiałów na rynku budowlanym, co w dalszej perspektywie powinno doprowadzić do szerokiego rozpoznania, popularyzacji i docelowego wdrożenia materiału jako realnej alternatywy dla stali zbrojeniowej.

Analizę zastosowania elementów zbrojeń FRP w elementach betonowych w oparciu o wytyczne instrukcji [19] przeprowadzili również autorzy opracowania [55]. W swojej pracy przeprowadzili teoretyczną analizę polegającą na zamodelowaniu w programie komputerowym ANSYS 6 belek betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych, celem określenia zgodności ugięć zamodelowanych elementów z danymi teoretycznymi

ujętych w instrukcji [19]. Każda z belek posiadała zróżnicowany stopień zbrojenia. W rezultacie przeprowadzonej analizy, określono, że zamodelowane w programie ANSYS belki posiadają ugięcia zgodnie z założeniami teoretycznymi opartymi na instrukcji [19], stwierdzono również, że wzrost stopnia zbrojenia kompozytowego na bazie włókien szklanych zastosowanego w przekroju belki zmniejsza wartość ugięcia.

W skutek dokonanego przeglądu literatury zapoznano się również z badaniami nad elementami betonowymi zbrojonymi prętami FRP w modelu pracy ściskanej. Jednym z opracowań badawczych traktujących o modelu pracy elementu ściskanego jest artykuł [33]. W przywołanej pracy autorzy analizują próbki ściskane elementów z zastosowaniem zbrojenia na bazie włókien bazaltowych oraz szklanych, a także zbrojenia stalowego. W przedmiotowym artykule przedstawiono analizę teoretyczną pracy elementów betonowych ściskanych i kolejno przeprowadzono badania laboratoryjne niszczące celem porównania wyników, w skutek której osiągnięto różnicę pomiędzy wynikami teoretycznymi i badawczymi na poziomie 6 do 9 procent, co stanowi niewielką rozbieżność – co podkreślają autorzy w wnioskach z badań. Autorzy zwracają uwagę, że zbrojenie kompozytowe pomimo pewnych ograniczeń w stosowaniu, posiada również bardzo dobre parametry odporności na korozję, co powinno być również brane pod uwagę przy analizowaniu możliwości zastosowania zbrojenia FRP w elementach betonowych oraz wskazują na potrzebę dalszego – szerszego badania eksperymentalnego tego typu zbrojenia celem uzyskania większej próby badawczej.

Badania zachowania konstrukcyjnego słupów betonowych zbrojonych w warunkach ściskania w skutek przyłożenia osiowego obciążenia przeprowadzili autorzy pracy [64]. W ramach badania przygotowano próbki 24 słupów o wymiarach 1000 x 200 x 200 mm każdy, z których 18 wzmocniono zbrojeniem GFRP a pozostałych 6 stalowym, wyniki próbek betonu w zakresie wytrzymałości na ściskanie mieściły się w przedziale pomiędzy 35,0 MPa a 40,5 MPa. Do wyprodukowania betonu użyto ponadto recyklingowego kruszywa grubego. W ramach badań próbki podzielono na cztery grupy zróżnicowane pod względem użytego materiału zbrojeniowego (GFRP lub stal) oraz rozstawu strzemion, próbki stopniowo obciążono aż do zniszczenia. Autorzy opracowania w ramach wniosków z przeprowadzonych eksperymentów, wskazują, że zastosowanie zbrojenia GFRP poprawiło wytrzymałość słupów na ściskanie w stosunku do analogicznych elementów zbrojonych klasyczną stalą. Wytrzymałość elementów uległa dalszej poprawie w skutek zastosowania do wyprodukowania mieszanki recyklingowanego kruszywa grubego (RCA) – zgodnie z wynikami badań spowodowało to dalszą poprawę o około 25-35%. Autorzy wskazują ponadto, że uzyskane wyniki badań wykazały wyższe parametry wytrzymałościowe niż analizy numeryczne. Zarówno zastosowanie zbrojenia GFRP zamiast stali zbrojeniowej oraz zastosowanie kruszywa RCA wpłynęło korzystnie na pracę konstrukcji pod obciążeniem poprzez zmniejszenie szerokości rys. Dodatkowo

potwierdzono, że zmniejszenie rozstawu zbrojenia poprzecznego (strzemion) skutkowało zwiększeniem wytrzymałości oraz zmniejszeniem zginania słupów pod obciążeniem.

Badania związane z analizą właściwości termicznych i mechanicznych prętów z kompozytu polimerowego wzmocnionymi włóknami bazaltowymi (BFRP) przeprowadzili autorzy opracowania [41], odnosząc się w swojej pracy m.in. do charakterystyki materiałowej porównawczo do zbrojenia stalowego, wskazując, że zbrojenie BFRP cechuje przede wszystkim wysoka wytrzymałość na rozciąganie, odporność na korozję, niska waga i obojętność elektryczna, podkreślając jednocześnie wady zbrojenia BFRP tj. niższą wytrzymałość na ściskanie, niski moduł sprężystości oraz pogorszenie właściwości mechanicznych nawet w warunkach nieznacznie podwyższonych temperatur.

Autorzy [41] za cel swoich badań obrali eksperymentalną analizę właściwości mechanicznych i termicznych zbrojenia BFRP mającą na celu lepsze zrozumienie ich potencjału i ograniczeń jako alternatywy dla zbrojenia stalowego. Przedmiotem badań były wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł sprężystości w temperaturze pokojowej, a także wytrzymałość na ściskanie w dwóch wariantach temperatury pokojowej i podwyższonej (w przedziałach około 100°C i około 200°C). W ramach badania wykorzystano pręty o trzech różnych średnicach 8, 10 i 12 mm z zawartością włókien na poziomie 77% oraz matrycą epoksydową, dla których zrealizowano badania wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie oraz analizę DMA celem określenia temperatury zeszklenia. Dokonano weryfikacji odkształceń i obliczenia modułu sprężystości w temperaturze pokojowej z zastosowaniem techniki Digital Image Correlation (DIC).

Średnie uzyskane w skutek badań opisanych w pracy [41] wartości wytrzymałości na kształtowały się następująco – wytrzymałości na rozciąganie zawierały się w przedziale od 930,5 do 1073,1 MPa w temperaturze pokojowej; wytrzymałości na ściskanie w warunkach temperatury pokojowej mieściły się w przedziale od 441,2 MPa do 504,3 MPa, w podwyższonej temperaturze (około 97,3 °C) w przedziale 87,1-153,3 MPa, a przy temperaturze około 191,0°C w przedziale 34,1 – 49,2 MPa. Oznaczono również średnie wartości modułu sprężystości – przy rozciąganiu zawierał się w przedziale od 43,4 GPa do 44,6 GPa, a przy ściskaniu w przedziale od 31 do 38,4 GPa.

W ramach wniosków, autorzy [41] zaznaczają, że oznaczona wartość modułu sprężystości przy ściskaniu były około 15-30% niższe niż przy rozciąganiu, podkreślając jednocześnie, że nawet najwyższa wartość modułu sprężystości dla BFRP dostępna w literaturze na poziomie 90,4 GPa jest znacznie niższa od typowej wartości dla stali zbrojeniowej tj. około 210 GPa. Autorzy konkludują, że wyznaczona badawczo wartość nośności na ściskanie jest znacznie niższa niż wytrzymałości na rozciąganie, ponadto uzyskane w badaniu wartości wytrzymałości na ściskanie w warunkach podwyższonych temperatur spowodowały istotny spadek wytrzymałości na ściskanie. Wyznaczona

laboratoryjnie temperatura zeszklenia BFRP wyniosła 107,5 °C. Zespół badawczy zaznacza, że właściwości zbrojenia BFRP mogą różnić się w zależności od rodzaju matrycy i włókien oraz proporcji materiałów wsadowych, a niski moduł sprężystości może prowadzić do nadmiernych ugięć i rozwarcia rys w elementach zginanych. Wskazują ponadto, że niska temperatura zeszklenia może ograniczyć obszary zastosowania BFRP z uwagi na utratę właściwości mechanicznych w warunkach podwyższonych temperatur.

Istotnym kierunkiem badań nad właściwościami i potencjalnym szerokim spektrum stosowania materiałów kompozytowych jest zastosowanie materiałów FRP w zakresie napraw lub rewitalizacji elementów żelbetowych, w szczególności z uwagi na bardzo dobre parametry wytrzymałościowe elementów wyprodukowanych z zastosowaniem włókien węglowych. Do zagadnienia w swojej pracy odnoszą się autorzy artykułu [115] podejmując rozważania w zakresie stosowania elementów FRP w naprawach elementów obiektów budowlanych i analizując trwałość długoterminową tej stosunkowo nowej metody naprawczej.

Nowatorskim kierunkiem prowadzonych badań jest zagadnienie opisane w [116], gdzie autorzy poddają badaniom hybrydę zbrojenia kompozytowego i stalowego, tj. pręt składający się z zewnętrznej warstwy polimeru wzmocnionego włóknem szklanym GFRP z wewnętrznym rdzeniem z pręta stalowego. Tego rodzaju eksperymenty mogą prowadzić do efektywnego połączenia właściwości stali i kompozytu, a w efekcie doprowadzić do optymalizacji i ukierunkowania prac projektowych dla konkretnie oczekiwanych parametrów pracy zbrojenia.

Zauważyć należy, że zbrojenia FRP dają szerokie spektrum zastosowań i niezwykle istotnym jest dobranie stosownych rozwiązań materiałowych, zarówno do modelu pracy w konstrukcji obiektu, warunków pracy oraz spodziewanych czynników środowiskowych np. o agresywnej charakterystyce.

Badania belek i słupów zbrojonych FRP wykazują analogiczne tendencje jak w przypadku badań płyt tj. stosowanie zbrojeń FRP (niezależnie od rodzaju włókien) może poprawiać parametry wytrzymałościowe elementów betonowych, jednak często wiąże się z większymi odkształceniami i ugięciami w porównaniu do elementów zbrojonych stalą, przy jednoczesnym ograniczaniu szerokości i rozwoju rys. Co istotne, badania wskazują na dobrą zgodność wyników eksperymentalnych dla elementów takich jak belki i słupy z analizami teoretycznymi opartymi na istniejących wytycznych, co sugeruje rosnące zrozumienie mechanizmów pracy tego rodzaju elementów betonowych zbrojonych FRP, niezależnie od ich typu. Niemniej jednak, podobnie jak w badaniach płyt, dalsza optymalizacja procedur obliczeniowych pozostaje istotnym wyzwaniem o czym traktują autorzy badań wytrzymałościowych w zakresie belek i słupów zbrojonych FRP.

2.3. STAL ZBROJENIOWA WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI B600B

Drugim obok zbrojenia GFRP materiałem będącym przedmiotem badań oraz analiz objętych niniejszą pracą doktorską jest zbrojenie stalowe wysokiej wytrzymałości – stal B600B. Jest to materiał będący obecnie w ostatniej fazie przygotowania do szerokiego wejścia na rynek, w zakresie którego występują nieliczne publikacje.

Stal zbrojeniowa to materiał konstrukcyjny dobrze znany i opisany w licznych instrukcjach, normach, podręcznikach czy wytycznych – materiał powszechnie uznawany za właściwie opisany, zbadany i posiadający w wytycznych do projektowania urealnione współczynniki bezpieczeństwa. Jest to również materiał posiadający pewne ograniczenia takie jak np. podatność na korozję, wysoki ciężar właściwy, brak obojętności elektromagnetycznej itd., a które z uwagi na właściwości fizyczne materiału nie mogą zostać wyeliminowane. Alternatywą dla konstrukcji, dla których przedmiotowe parametry stanowią istotną przeszkodę w osiągnięciu właściwego i zamierzonego funkcjonowania są zbrojenia kompozytowe. Parametrem zbrojenia stalowego, który może zostać poprawiony i nad którym pracują producenci jest wytrzymałość stali na rozciąganie, co w efekcie może rozszerzyć spektrum konstrukcji, w których zbrojenie stalowe może być z powodzeniem stosowane.

Jak wskazują autorzy opracowania [27] nowym rodzajem spawalnej stali zbrojeniowej jest stal zbrojeniowa B 600 B, której parametry to charakterystyczna granica plastyczności $R_m = 600$ MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie $R_e = 700$ MPa. Autorzy opracowania [27] w swoich analizach skupili się na weryfikacji parametrów stali nowego rodzaju, badając: spawalność, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie po zerwaniu, wydłużenie przy maksymalnej sile oraz badania wytrzymałości na zginanie złączy doczołowych. Badania realizowano na próbkach o średnicach od 10 do 32 mm. W ramach przeprowadzonych badań i analiz potwierdzono, że materiał może być spawany ręcznie metodą łukową elektrodą otuloną oraz spełnia wymagania [17], a wygląd spoin wykonanych tą metodą przedstawiał typowe cechy dla tej metody spawania. Autorzy, w ramach przeprowadzonych badań oznaczyli doświadczalnie następujące parametry: granica plastyczności R_m w przedziale pomiędzy 606 a 630 MPa (zróżnicowane w zależności od średnicy badanego pręta) oraz wytrzymałości na rozciąganie R_e w przedziale pomiędzy 690 a 722 MPa (zróżnicowane w zależności od średnicy badanego pręta). W konkluzji, autorzy stwierdzają, że będąca przedmiotem badań stal nowej klasy spełnia wymagania dla klasy C stali zgodnie z [7]. Podsumowując, badania wykazały, że nowa stal charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicznymi, zarówno rozpatrywanymi jako właściwości materiału bazowego, jak i wykonanych z niej złączy spawanych.

Badania elementów betonowych z wykorzystaniem nowego rodzaju stali B 600 B przeprowadzili autorzy opracowania [117]. Przedmiotem badań było 45 pełnowymiarowych płyt żelbetowych o wymiarach 2000 x 500 mm i zmiennej grubości od 80 do 120 mm, określona na podstawie badań charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie wyniosła 46,8 MPa, dla określenia której przebadano 195 kostek o wymiarach 15x15x15 cm. Celem zaplanowanych badań była wszechstronna analiza zachowania się płyt zbrojonych nowym rodzajem stali B 600 B pod obciążeniem w warunkach czteropunktowego zginania w tym m.in. odkształceń betonu, badanie charakteru pęknięcia w obszarze stałego momentu zginającego, analiza zachowania betonu w strefie ściskanej w elementach zginanych zbrojonych stalą B 600 B, ocenę wpływu grubości i stopnia zbrojenia płyt na ich nośność i odkształcalność, porównanie wyników eksperymentalnych i analiz numerycznych (w tym identyfikacja rezerw nośności w modelu numerycznym) oraz zbadanie różnic w pracy płyt zbrojonych nowym rodzajem stali w stosunku do elementów zbrojonych klasyczną stalą. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły zapasy rezerwy nośności w modelu numerycznym, w skutek czego stwierdzono, że faktyczna nośność elementów jest wyższa, niż wskazują na to wyniki obliczeń, a co za tym idzie implikuje to konieczność do dalszego rozwoju modelu numerycznego.

Badania związane z eksperymentalną weryfikacją właściwości nowej stali zbrojeniowej typu B600B prowadzili również autorzy opracowania [118]. Celem realizowanych badań jest szczegółowa analiza przyczepności pomiędzy prętami zbrojeniowymi klasy B600B a betonem wysokiej wytrzymałości klasy C 50/60. Autorzy uzasadniają konieczność zrealizowania przedmiotowych badań faktem, że granica plastyczności dla stali zbrojeniowej klasy B600B przekracza wartość 600 MPa, zatem wychodzi poza zakres dla którego wytyczne projektowe specyfikuje [7]. Dodatkowo jak wskazują autorzy [118] wiedza w zakresie przyczepności między stalą a betonem jest kluczowa dla możliwości precyzyjnego określenia odkształcalności stali i betonu, a co za tym idzie ustalenia przebiegu odkształceń i scenariusza pęknięcia konstrukcji żelbetowych. Badania przeprowadzono metodą wyciągania „pull-out test” zgodnie z rekomendacjami [119], na prętach stalowych o dwóch różnych średnicach 16 i 32 mm oraz próbkach betonowych o wymiarach odpowiednio 160x160x160 dla stali o średnicy 16 mm oraz 320 x 320 x 320 dla stali o średnicy 32 mm – mierzono siłę wyciągającą oraz przemieszczenie pręta względem betonu. Przeprowadzono również badania materiałów użytych do badania – stali zbrojeniowej B600B – statyczną próbę rozciągania na 6 próbkach o długości 800 mm dla każdej średnicy pręta oraz badania betonu na próbkach cylindrycznych (badania betonu potwierdziły projektowaną klasę wytrzymałości na ściskanie). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały następujące uśrednione parametry użytych materiałów granica plastyczności R_m odpowiednio dla stali średnicy 16 mm wynosiła 630 MPa, dla średnicy 32 mm wynosiła 627 MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie R_e odpowiednio dla stali średnicy 16 mm wynosiła 725 MPa, dla średnicy 32 mm wynosiła 729 MPa, moduł Younga określono jako 206 GPa dla

stali średnicy 16 mm oraz 198 GPa dla stali średnicy 32 mm, wydłużenie przy maksymalnej sile wyniosło odpowiednio 10,3% dla średnicy 16 mm oraz 10,1% dla średnicy 32 mm. Wnioski z przeprowadzonych badań dostarczyły informacji, że wartości eksperymentalnie oznaczone wartości przyczepności między stalą klasy B600B a betonem są znacznie wyższe niż wartości obliczeniowe na podstawie [7], wobec czego autorzy konkludują, że stal nowej klasy B600B posiada bardzo dobre parametry przyczepności między stalą a betonem, a w wyniku przeprowadzonej statycznej próby rozciągania zbrojenia potwierdzone deklarowane parametry wytrzymałościowe zbrojenia.

Jak wynika z omawianych prac [27, 117-118] nowe i wysokowytrzymałe rodzaje stali zbrojeniowej charakteryzują się podwyższonymi właściwościami mechanicznymi w stosunku do klasycznie stosowanych klas stali zbrojeniowej, w tym w szczególności wyższą granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie (których to wartości w skutek eksperymentów okazały się w wszystkich omawianych przypadkach wyższe niż teoretyczne). Zastosowanie wysokowytrzymałościowej stali zbrojeniowej takiej jak B600B w konstrukcjach może prowadzić do wysoce efektywnego i ekonomicznego wykorzystania stali w przekrojach betonowych. Stal B600B jak wynika z przytoczonych opracowań, powinna spełniać wymagania istniejących norm i standardów projektowych, jak również wykazuje dobre przystosowanie do spawania. Przeprowadzone w ramach opracowań [117-118] potwierdzają dobre parametry badanego materiału, potwierdzając możliwość ich efektywnego stosowania w budownictwie.

2.4. BETON

2.4.1 Domieszki włókien do betonu – właściwości materiału i prowadzone badania

Istotnym kierunkiem badań, który również wiąże się z zagadnieniem właściwości elementów betonowych i poprawy tych właściwości w zależności od warunków pracy i potrzeb jest stosowanie domieszek włókien do betonu oraz kolejno poszukiwanie optymalnego ich rodzaju oraz objętości aplikacji w odniesieniu do oczekiwanych efektów.

W zakresie stosowania betonu z zbrojeniem strukturalnym, szeroko wypowiedział się autor w pracy [120]. Autor w pracy omawia przeglądowo rodzaje włókien stosowanych do wzmacniania betonu, charakteryzując podstawowy podział ze względu na rodzaj zastosowanego surowca:

- włókna z metali – w tym wiodące włókna stalowe, definiowane zgodnie z [121]
- włókna polimerowe – definiowane zgodnie z [122],
- tekstylne włókna szklane.

Autor [120] omawia podstawowe zasady projektowania i doboru mieszanki betonowej z zastosowaniem włókien, a także prezentuje strukturę zbrojenia rozproszonego oraz określa pozytywny wpływ stosowania włókien na właściwości mechaniczne i fizyczne betonu takie jak:

- podwyższona odporność na powstawanie rys i pękanie,
- podwyższona odporność zmęczeniowa,
- podwyższona udurowienie,
- często podwyższona wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie
- ujednolicenie właściwości betonu (dzięki równomiernemu rozproszeniu włókien w mieszance betonowej),
- możliwość przenoszenia obciążeń nawet po zarysowaniu,
- wzrost ciągliwości,
- hamowanie powstawania zarysowań wskutek skurczu plastycznego,
- poprawa mrozoodporności,
- potencjał do redukcji stopnia zbrojenia głównego w elementach żelbetowych.

W podsumowaniu autor [120] podkreśla, że uzyskanie zakładanych przez projektanta właściwości fibrobetonu wymaga zastosowania właściwego składu mieszanki, technologii wykonania oraz pielęgnacji, a samo zagadnienie szerszego stosowania fibrobetonów w budownictwie wymaga przede wszystkim opanowania nowych sposobów charakteryzowania materiału oraz dopracowania metod obliczania elementów konstrukcji z zastosowaniem omawianych elementów.

Zagadnienie zbrojenia elementów betonowych z zastosowaniem włókien rozproszonych podnoszą również autorzy wystąpienia [123]. W swojej pracy przedstawiają wyniki badań zginanych płyt żelbetowych wykonanych z betonu wysokowartościowego o wskaźniku woda/spoiwo równym 0,2 z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych uzyskane z wykorzystaniem systemu ARAMIS, do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów odkształceń. Płyty zbrojono siatkami z prętów $\phi 8$ mm, a czynnikiem zmiennym w badaniach była procentowa zawartość dodatku włókien do betonu. W skutek przeprowadzonych przez autorów badań, dokonano potwierdzenia założeń teoretycznych mówiących o wzroście wytrzymałości betonu na rozciąganie w elementach zginanych płytowych, powodowanego zastosowaniem włókien stalowych i polipropylenowych. Autorzy w wnioskach z przeprowadzonych badań, podkreślają również, że zastosowanie włókien w badanych elementach znacząco łagodzi obraz zniszczenia płyt, powodując, że zniszczenie ma charakter stopniowy i bardziej plastyczny, ponieważ powstające w elemencie rysy są

mostkowane przez włókna – co może mieć istotne znaczenie dla eksploatacji elementów betonowych w budownictwie.

Opracowaniem traktującym o badaniu wpływu różnych proporcji objętościowych domieszek włókien stalowych do betonu w odniesieniu do właściwości i zachowania płyt betonowych jest artykuł [124]. Autorzy dokonali eksperymentalnej weryfikacji parametrów betonu z domieszką włókien stalowych – zrealizowano badania wytrzymałości na ściskanie 84 kostek betonowych (w tym części po ekspozycji na podwyższone temperatury 400 i 600 °C), które pobrano z betonu przeznaczonego do wykonania 15 próbek płyt o wymiarach 1300 x 500 mm, zdywersyfikowanej grubości (80,120,160 mm) i zróżnicowanej zawartości objętościowej włókien stalowych, zbrojonych prętami stalowymi o średnicach 10 i 12 mm. Płyty poddano testowi zginania pod obciążeniem w maszynie wytrzymałościowej oraz kolejno poddano ocenie poddane wyniki w odniesieniu do płyt bez domieszki włókien.

Jak wskazują autorzy [124] w podsumowaniu przeprowadzonych badań, stosowanie włókien do betonu znacząco poprawia parametry betonu takie jak : wytrzymałość na rozciąganie betonu, poprawa odporności na pękanie, zwiększenie plastyczności, zwiększenie odporności na uderzenia, redukcja stopnia zbrojenia, lepsze zachowanie w podwyższonych temperaturach, poprawa trwałości.

Badania o zbliżonej charakterystyce do badań przeprowadzonych przez autorów [124] przeprowadzili badacze odpowiedzialni za opracowanie artykułu [125], z zastrzeżeniem przeprowadzenia prób wytrzymałościowych na elementach betonowych – belkach z domieszką rozproszonego zbrojenia stalowego, a nie jak miało to miejsce w artykule [124] płytach.

Autorzy [125] przeprowadzili oznaczenie wytrzymałości betonu z domieszką włókien stalowych na próbkach cylindrycznych (średnica 150 mm, wysokość 300 mm), a badanie wytrzymałościowe na belkach o wymiarach 150x150x700 mm (zbrojonych klasyczną stalą) oraz porównano z próbkami kontrolnymi (bez stosowania włókien).

W ramach wniosków, podobnie do badań opisanych w [124], autorzy [125] wskazują na poprawę właściwości betonu wskutek aplikacji włókien m.in. w zakresie: wzrostu wytrzymałości na ściskanie, wzrostu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wzrostu wytrzymałości na zginanie, zwiększenie odporności na powstawanie i rozwój zarysowań. Autorzy [125] wskazują na 2% objętości mieszanki jako maksymalny poziom aplikacji włókien w zastosowaniach konstrukcyjnych, ponieważ powyżej tej wartości występuje spadek wytrzymałości betonu na ściskanie, który autorzy wiążą z gorszą urabialnością betonu wynikającą z aplikacji zbyt dużej objętości włókien, podkreślają jednocześnie istotny charakter pogłębiania badań w zakresie określenia optymalnego doboru dozowania i długości włókien.

Opracowaniem traktującym o eksperymentalnym badaniu betonu zbrojonego włóknami polipropylenowymi (PP) jest opracowanie [126]. Badacze w ramach eksperymentu przeprowadzili badania wytrzymałościowe na próbkach betonowych sześciennych oraz cylindrycznych, po 7 i 28 dniach, poddając je próbie wytrzymałości na ściskanie. Autorzy zbadali domieszkę włókien na poziomie 1,5%, 1,75% oraz 1,85% masy cementu użytej do wyprodukowania mieszanki i uzyskali wyniki zaprezentowane w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badań wytrzymałości próbek betonowych z domieszką włókien PP zgodnie z badaniem [126].

1	Wytrzymałość na ściskanie, MPa		
	Zawartość włókien	Po 7 dniach	Po 28 dniach
	Brak	23,20	33,42
	1,5% włókien PP	23,35	33,91
	1,75% włókien PP	23,60	34,33
	1,85% włókien PP	23,13	32,70
2	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa		
	Zawartość włókien	Po 7 dniach	Po 28 dniach
	Brak	nie badano	2,78
	1,5% włókien PP	nie badano	3,05
	1,75% włókien PP	nie badano	3,19
	1,85% włókien PP	nie badano	3,27
3	Wytrzymałość na zginanie, MPa		
	Zawartość włókien	Po 7 dniach	Po 28 dniach
	Brak	nie badano	5,80
	1,5% włókien PP	nie badano	6,25
	1,75% włókien PP	nie badano	6,60
	1,85% włókien PP	nie badano	6,52

Jak wynika z tabeli 5 oraz jak wykazują autorzy w wnioskach, poprawa właściwości mechanicznych betonu takich jak wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałości na zginanie następuje do poziomu objętości włókien w betonie stanowiącym 1,75% masy cementu, po czym zaczyna spadać. Wobec tego autorzy wskazują współczynnik na poziomie 1,5%-1,75% jako optymalny wpływający również korzystnie na redukcję pęknięć i skurczu betonu. Autorzy wskazują również, że wraz z wzrostem objętości włókien w mieszance spada jej urabialność.

Badania płyty betonowej o wymiarach 3200x500 mm oraz grubości 100 mm z domieszką włókien polipropylenowych (PP) w ilości 1,5% objętości betonu w warstwie wierzchniej (50 mm) płyty przeprowadzili autorzy [127] i porównali z badaniem płyty betonowej o tożsamy wymiarach bez dodatku włókien. Próbkę

umieszczono w maszynie wytrzymałościowej i poddano działaniu obciążenia przyłożonego centralnie, aż do zniszczenia. W ramach wniosków z przeprowadzonego badania, autorzy wskazują, że zastosowanie w górnej warstwie płyty (np. jako nadbetonu) domieszki włókien PP, korzystnie wpływa zarówno na nośność jak i plastyczność płyty w tym modelu pracy.

Kolejnym rodzajem włókien możliwych do aplikacji w betonie są włókna poliwinylowe alkoholu (PVA), których analizę wpływu na właściwości betonu w dwóch różnych długościach (6 i 12 mm) przeprowadzili autorzy badania [128]. Celem badawczym autorów było określenie, jak różne frakcje objętościowe (0,25%, 0,5% oraz 1,0% w objętości całej mieszanki) wpływają na właściwości betonu. W ramach realizowanych badań przeprowadzono testy wytrzymałości na ściskanie na próbkach cylindrycznych o wymiarach 100x 200 mm, które zabetonowano w siedmiu seriach – seria kontrolna bez włókien oraz 3 serie dla każdej z długości (6 i 12 mm) o odpowiednim nasyceniu (0,25%, 0,5% oraz 1,0%). Dla każdej mieszanki przygotowano 6 próbek, co łącznie dało 42 cylindry.

W ramach wniosków, autorzy [128] wskazują, że w odniesieniu do betonu kontrolnego (bez dodatku włókien), dodatek włókien zazwyczaj zwiększał wytrzymałość na ściskanie, a optymalną frakcją okazała się 0,25%, która spowodowała wzrost wytrzymałości na ściskanie o 16%. Autorzy wskazali, że generalnie lepszy wpływ na właściwości betonu miały krótsze włókna (6mm). Zaobserwowano ponadto, że przy wyższym udziale frakcji włókien w betonie tj. na poziomie 1%, wytrzymałość na ściskanie zaczynała spadać, a urabialność ulegała pogorszeniu. Autorzy sugerują również, że przyrost wytrzymałości na ściskanie w betonach z domieszką włókien może rosnąć wraz z starzeniem się betonu.

Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury w zakresie dotyczącym stosowania domieszek do betonu w postaci włókien różnego rodzaju (stalowych, polipropylenowych, poliwinylowych alkoholu – PVA), aplikacja tego rodzaju dodatków potwierdza jednoznacznie korzystny wpływ na właściwości mieszanki takie jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie, co potwierdzają badania laboratoryjne opisane w artykułach [124-128]. Jak wynika z przywołanych badań różne rodzaje włókien mogą w różnym stopniu wpływać na poszczególne parametry, ogólnym trendem jest poprawa właściwości mechanicznych i reologicznych mieszanki betonowej.

Istotnym czynnikiem, jest stosowny dobór procentowy włókien do objętości mieszanki, ponieważ jak wynika z przeanalizowanych badań [126-128] zbyt duży udział frakcji włókien w betonie prowadzi do spadku wytrzymałości na ściskanie i urabialności mieszanki. Wobec powyższego, ważnym jest właściwy dobór stosowanych włókien nie tylko ze względu na rodzaj surowca, ale także określenie optymalnego stosunku domieszki włókien do całej objętości mieszanki betonowej.

Jak wynika zarówno z analizy pozycji przeglądowych jak i zrealizowanych badań, stosowanie domieszek włókien w betonie stanowi skuteczną metodę modyfikacji i poprawy jego właściwości, jednak wymaga uwzględnienia rodzaju włókien i ich optymalnej objętości w kontekście oczekiwanych efektów, technologii wykonania i modelu pracy poszczególnych wzmacnianych elementów.

2.5. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY

Na podstawie zrealizowanego przeglądu literatury, dotyczącego w szczególności zbrojeń wysokich wytrzymałości – kompozytowych z naciskiem na GFRP oraz zbrojenia stalowego B600B, zaznaczyć należy, że są to materiały o dobrych parametrach wytrzymałościowych, wpisujących się w pojęcie wysokich wytrzymałości, ponieważ podstawowa wytrzymałość na rozciąganie dla obu materiałów jest istotnie wyższa niż standardowo stosowanej stali zbrojeniowej.

Podkreślić należy, że zbrojenie kompozytowe stanowi realną i zyskującą na popularności alternatywę dla stali zbrojeniowej, przede wszystkim na swoje właściwości, które znajdują podstawę nie tylko w literaturze zagadnienia ale również badaniach laboratoryjnych takie jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie, obojętność elektromagnetyczna, wysoka odporność na korozję, dobra tolerancja na uszkodzenia, niski ciężar właściwy stanowią istotne argumenty do stosowania tego rodzaju materiału, w warunkach w których jego parametry przemawiają na korzyść zbrojenia kompozytowego.

Projektując elementy betonowe z zastosowaniem zbrojenia FRP, należy mieć jednak na uwadze, że jest to materiał, który posiada istotne ograniczenia w stosunku do klasycznie stosowanej stali zbrojeniowej takie jak niski moduł sprężystości przy rozciąganiu, stosunkowo niska wytrzymałość na ściskanie oraz istotna utrata stałości głównych parametrów wytrzymałościowych w warunkach podniesionych temperatur stanowiące wady tego materiału w szczególności w pewnych elementach/modelach pracy konstrukcji. Są to obszary wymagające dalszych badań, nie tylko ze względu na konieczność lepszego poznania zachowania tych parametrów w różnych warunkach pracy, ale również z uwagi na osiągnięte często rozbieżne wyniki w opisywanych badaniach.

Zagadnieniem istotnie podkreślanym w wielu pozycjach literaturowych dotyczących zbrojenia FRP jest ograniczona liczba instrukcji obliczeniowych oraz istotnie zachowawcze podejście do zagadnienia współczynników bezpieczeństwa czy zapasów nośności w istniejących instrukcjach. Wymaga to szerszego spojrzenia na tematykę procedur obliczeniowych elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP i ich rozwoju, w kierunku modyfikacji istniejących procedur oraz tworzenia nowych modeli obliczeniowych. Jest to bardzo istotny kierunek badań, ponieważ uzyskanie optymalnych modeli obliczeniowych pozwoli na optymalne projektowanie konstrukcji betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego, co otworzy drogę do popularyzacji oraz powszechnego stosowania tego materiału.

Dalsze badania i analizy w kierunku szeroko pojętej popularyzacji zbrojenia kompozytowego w elementach betonowych, muszą ugruntować tego materiału jako alternatywy bezpiecznej, ekonomicznie uzasadnionej i optymalnie projektowej. Aby to osiągnąć konieczna jest dalsza praca nad procedurami obliczeniowymi, która pozwoli na wypracowanie konkretnych zmian, uzupełnień i uszczegółowień do istniejących procedur obliczeniowych z uwzględnieniem specyficznych właściwości zbrojenia FRP oraz dotychczasowych wyników badań m.in. w zakresie:

- analizy istniejących norm i instrukcji pod kątem ich adekwatności do projektowania elementów zbrojonych FRP, z szczególnym naciskiem na wartości współczynników bezpieczeństwa i zapasów nośności,
- procedury obliczeniowe powinny lepiej uwzględniać zachowanie prętów zbrojeniowych FRP w warunkach podniesionych lub obniżonych temperatur, a model obliczeniowy powinien uwzględniać zmienność parametrów wytrzymałościowych w takich warunkach,
- procedury obliczeniowe powinny lepiej uwzględniać zachowanie prętów zbrojeniowych FRP w środowisk agresywnych, w tym w szczególności roztworów alkalicznych,
- weryfikacji wymagają procedury obliczeniowe pozwalające na ocenę ugięć i odkształceń elementów betonowych zbrojonych FRP,
- należy zidentyfikować jednoznaczne wytyczne w zakresie projektowania detali i zakotwień w elementach zbrojonych FRP,

Konieczne jest również jasne skatalogowanie, w jakich konkretnie elementach konstrukcji, rodzajach konstrukcji i warunkach ekspozycji stosowanie zbrojenia FRP jest ekonomicznie i technicznie uzasadnione jako rozwiązanie lepsze od klasycznej stali, które na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury wskazuje się jako:

- konstrukcje, dla których wymagana jest wysoka wytrzymałość na rozciąganie,
- elementy cienkościenne takie jak płyty, belki gdzie wysoka wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia FRP może być efektywnie wykorzystana, a negatywny efekt znacznych ugięć zniwelowany poprzez zwiększenie stopnia zbrojenia w przekroju.
- konstrukcje narażone na środowiska agresywne, korozyjne (takie jak konstrukcje morskie, rzeczne),
- konstrukcje, dla których wymagana jest neutralność elektromagnetyczna,

W poszukiwaniu alternatywnych metod zbrojenia betonu, w sytuacjach w których oczekiwane są wysokie parametry wytrzymałościowe przy jednocześnie jasno

określonych parametrach pracy np. w warunkach podniesionych temperatur dobrym rozwiązaniem okazuje się być stal zbrojeniowa klasy B600B., charakteryzująca się wyższą niż klasyczna stal granicą plastyczności (około 600 MPa) oraz wytrzymałością na rozciąganie (około 700 MPa), które w ramach badań eksperymentalnych okazały się wyższe, niż deklarowane przez producenta.

Ponadto, jak wykazały badania w zakresie stali B600B, materiał ten posiada bardzo dobre parametry przyczepności stali do betonu (wyższe niż wartości obliczeniowe oparte na istniejących normach) ,a stosowanie go w konstrukcjach betonowych może prowadzić do efektywnego i ekonomicznego wykorzystania stali w przekroju.

Jak wynika ponadto z przeprowadzonego przeglądu literatury, niezwykle istotnym czynnikiem w uzyskaniu efektywnego wykorzystania zbrojeń wysokiej wytrzymałości w elementach betonowych (zarówno FRP jak i stali B600B) jest właściwy dobór mieszanki betonowej oraz uzyskanie odpowiedniej przyczepności i wytrzymałości połączenia zbrojenia z betonem. Wnioskiem płynącym z przeprowadzonego przeglądu literatury w zakresie mieszanek betonowych, jednoznacznie wynika , że dobrym rozwiązaniem dla poprawy parametrów mieszanki (m.in. wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie) jest stosowanie domieszek włókien różnych rodzajów (stalowych, polipropylenowych, poliwinylowych alkoholu PVA). Przy projektowaniu mieszanki z zastosowaniem włókien należy dążyć do optymalnego nasycenia procentowego mieszanki domieszką włókien, ponieważ zbyt duża aplikacja włókien może prowadzić do pogorszenia zarówno parametrów mieszanki jak i jej urabialności.

3. HIPOTEZA BADAWCZA, CEL I ZAKRES BADAŃ

3.1. HIPOTEZA BADAWCZA

Istniejące procedury obliczeniowe elementów z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości są zachowawcze, w szczególności poprzez stosowanie współczynników bezpieczeństwa i ograniczają nośność teoretyczną przekrojów w porównaniu do rzeczywistych wyników eksperymentalnych,

Weryfikacja procedur obliczeniowych dla elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości prowadzi do zwiększenia efektywności projektowania,

W elementach żelbetowych z zbrojeniem wytrzymałości stal B600B i kompozyt GFRP rzeczywista nośność płyt uzyskana w badaniach laboratoryjnych jest wyższa niż wyznaczana teoretycznie wg dostępnych procedur obliczeniowych,

Aplikacja włókien LPPF do betonu w elementach z zbrojeniem wysokiej wytrzymałości poprawia zachowanie elementów pod obciążeniem zwiększając ich nośność i opóźniając rozwój rys,

Zastosowanie zbrojenia wysokiej wytrzymałości w elementach żelbetowych prowadzi do lepszych parametrów nośności i trwałości w porównaniu do standardowych rozwiązań

Wykorzystanie technologii „digital image correlation” w badaniach elementów betonowych z zbrojeniem wysokiej wytrzymałości umożliwia dokładne mapowanie przemieszczeń i rozwoju rys co poprawia dokładność wyników eksperymentalnych i wspiera rozwój metod monitorowania konstrukcji, a także zastosowanie dynamicznej analizy strukturalnej wspiera rozwój metod monitorowania i diagnozowania konstrukcji.

3.2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej, stanowiącym wkład w rozwój dyscypliny, w szczególności w zakresie dostarczenia nowych danych w obszarze badań nad stosowaniem zbrojeniami wysokiej wytrzymałości i dostępnych procedur obliczeniowych w tym zakresie jest określenie:

1. Możliwości weryfikacji metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości – B600 B i GFRP.

Mając na uwadze zamierzone osiągnięcie zadania głównego, określono cztery dodatkowe cele pomocnicze:

1. Określenie wymaganego stopnia zbrojenia dla badanych typów elementów (płyty) ze zbrojeniem wysokiej wytrzymałości oraz zbrojeniem kompozytowym,
2. Określenie nośności i własności użytkowych zbrojenia wysokiej wytrzymałości w różnych warunkach eksploatacji,
3. Określanie zasad diagnostyki stanu naprężeń i odkształceń,
4. Określenie warunków pracy zbrojenia w betonie z włóknem polipropylenowym lub poliwinylowym, z punktu widzenia trwałości i nośności elementu.

Dla osiągnięcia postawionych celów (głównego i pomocniczych) zaplanowano następujący zakres badań eksperymentalnych:

1. eksperymentalne zbadanie fizycznych właściwości prętów B600B oraz GFRP (próba rozciągania)– liczba próbek :
 - stal B600B :
 - $\phi 10$ – 16 próbek,
 - $\phi 12$ – 3 próbki .
 - kompozyt GFRP
 - $\phi 8$ – 34 próbki ,
 - $\phi 7$ – 34 próbki .
2. oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach :
 - sześciennych 15 x 15 x 15 cm - liczba próbek 24,
 - walcowych wys. 30 cm/sr. 15 cm – liczba próbek 4,
3. badanie wytrzymałościowe płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości B600B – płyty o wymiarach 200 x 50 cm (grubość od 8 do 12 cm) - liczba próbek 10,
4. badanie wytrzymałościowe płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP – płyty o wymiarach 200 x 50 cm (grubość 10 cm) - liczba próbek 5,
5. badanie wytrzymałościowe płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP oraz włókien polipropylenowych (LPPF) – płyta o wymiarach 200 x 50 cm (grubość 10 cm) - liczba próbek 1,

Określony plan badawczy pozwolił na szczegółowe rozpoznanie eksperymentalne zagadnienia, uzyskanie i skatalogowanie licznych wyników oraz wyciągnięcie stosownych wniosków na podstawie zrealizowanych badań , pozwalających na podjęcie dyskusji w zakresie przedmiotu hipotezy badawczej.

4. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

4.1. ZBROJENIE STALOWE B600B, ZBROJENIE KOMPOZYTOWE GFRP

W ramach realizowanej rozprawy doktorskiej rozważaniom poddano dwa rodzaje zbrojenia wysokiej wytrzymałości:

- zbrojenie kompozytowe GFRP – właściwości materiału deklarowane przez producenta zestawiono w załączniku nr 1,
- zbrojenie stalowe wysokiej wytrzymałości B600 B – właściwości materiału deklarowane przez producenta zestawiono w załączniku nr 2,

W ramach zaplanowanych eksperymentów korzystano z następujących średnic, odpowiednio dla zbrojenia :

- GFRP – 8 mm (testy przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein, typ ZD 10/90 oraz dodatkowo dla zbrojenia GFRP średnicy 7 mm przeprowadzono testy w maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 (również z wykorzystaniem technologii „digital image correlation”),
- B600B - 10 mm oraz 12 mm (testy przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein, typ ZD 10/90 oraz dodatkowo dla stali średnicy 10 mm przeprowadzono testy w maszynie wytrzymałościowej Instron 8502 (również z wykorzystaniem technologii „digital image correlation”).

Zważywszy, że oba materiały stanowią alternatywne metody zbrojenia przekrojów żelbetowych w odniesieniu do standardowo stosowanej stali o zwykłych wytrzymałościach, celem lepszego poznania właściwości obu rodzajów alternatywnych zbrojeń oraz skonfrontowania z wartościami parametrów deklarowanymi przez producentów próbki obu materiałów poddano próbom rozciągania, celem badawczego oznaczenia wartości takich parametrów jak m.in. wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości (Younga) oraz dla stali zbrojeniowej wysokiej wytrzymałości B600B granica plastyczności (dla zbrojenia kompozytowego nie występuje).

Dla prętów (dla zbrojenia kompozytowego metodologię zaadoptowano poprzez zatopienie końcówek prętów kompozytowych w rurce stalowej za pomocą kleju) wykonano badania statyczne próby rozciągania według metody B norma PN-EN ISO 6892-1:2020-05 „Metale. Próba rozciągania. Część1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.”

Testy wytrzymałościowe wykonano z zastosowaniem dwóch maszyn:

- Maszyna wytrzymałościowa model VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90 - Siła rozciągająca mierzona była dedykowanym siłomierzem. Celem badania było wyznaczenie podstawowych wskaźników, charakteryzujących własności wytrzymałościowe i plastyczne stali B600B takich jak (oznaczenie wg normy PN-B-03264:1999):

- charakterystyczna granica plastyczności stali zbrojeniowej f_{yk} (R_m);
- granica plastyczności stali zbrojeniowej f_y (R_e);
- wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie f_t (R_u);
- względne wydłużenie próbki po rozerwaniu A_p .

Badaniu poddano następujące próbki:

- Stal B600 B – średnice 10 i 12 mm (długość próbek 250 mm),
- Zbrojenie GFRP – średnica 8 mm (długość próbek 600 mm).



Rys. 1. Widok zbrojenia w trakcie próby rozciągania w maszynie typ VEB.

- INSTRON model 8502 (± 250 kN). Siła rozciągająca mierzona była wbudowanym w maszynę siłomierzem. Obciążenie sterowane było do granicy plastyczności stałym przyrostem naprężenia wynoszącym 30MPa/s, natomiast po jej przekroczeniu sterowanie automatycznie było

zmieniane na stały przyrost odkształcenia równy $0,003 \cdot 1/s$. W zakresie półki plastycznej przyrost odkształcenia wynosił $0,001 \cdot 1/s$.

Badaniu poddano następujące próbki:

- stal B600 B – średnice 10 mm (długość próbek 400 mm),
- zbrojenie GFRP – średnica 7 mm (długość próbek 600 mm) – średnica ostatecznie nie została wykorzystana w badaniu płyt.

Zrealizowano próby rozciągania z zastosowaniem maszyny Instron wg poniższego opisu:

- zbrojenie stalowe B600B (długość próbek 400 mm):

Przemieszczenie, a z nim odkształcenie były rejestrowane przy użyciu trzech urządzeń: czujnik przemieszczenia "Instron"; ekstensometr mechaniczny i ekstensometry optyczne systemu Aramis (rys. 2). Wskaźniki siły i odkształcenia były skorelowane przy pomocy jednoczesnych zdjęć obu ekranów "Instron" i systemu "Aramis". Częstotliwość klatek kamer „Aramis” i zapis siły prasy “Instron” była 10 Hz. Baza pomiarowa wynosiła:

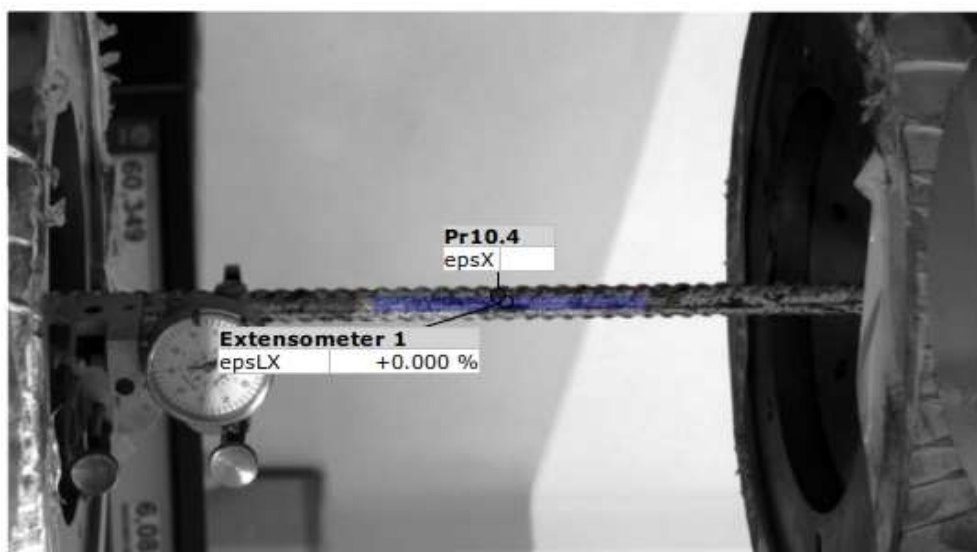
- 300 mm dla pomiarów przez Instron;
 - 40 mm przez tensometr mechaniczny;
 - od 10 mm do 300 mm przez tensometr optyczny Aramis.
- Porównanie wyników badań próbek prętów metodami mechanicznymi i optycznymi wykazało zadowalającą zbieżność.

- zbrojenie kompozytowe GFRP (długość próbek 600 mm):

Przemieszczenie, a z nim odkształcenie były rejestrowane przy użyciu dwóch urządzeń: czujnik przemieszczenia "Instron" i ekstensometr mechaniczny. Doraźną wytrzymałość na rozciąganie R_m stanowiła największa siła F_m zarejestrowana w trakcie badania, odniesiona do nominalnego pola powierzchni przekroju próbki. Baza pomiarowa wynosiła 90 mm dla tensometru mechanicznego.



Rys. 2. Widok zbrojenia w trakcie próby rozciągania w maszynie Instron z zastosowaniem technologii „digital image correlation”.



Rys. 3. Obraz monitorowania pracy zbrojenia w maszynie Instron zarejestrowany z zastosowaniem technologii „digital image correlation”.

4.2. BETON

Dla zabetonowania pełnowymiarowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości B600B oraz zbrojenia GFRP zastosowano dwa rodzaje betonu:

- beton zwykły – zastosowano dla:
 - płyt zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B – płyty grupy I, II III
 - płyt zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP – płyty grupy IV, V, VI (tylko płyta K100-5)
 - recepturę mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Receptura mieszanki betonu – beton zwykły.

składnik	Udział w m3 mieszanki , kg/m3	Udział w m3 mieszanki , %
cement (CEM I 42,5)	373,00	24,79
kruszywo grube (żwir 2/8)	1329,00	19,83
kruszywo drobne (piasek 0/2)	569,00	46,28
woda	162,00	8,43
domieszki*	0,00	0,00

*udział domieszek w recepturze pomijalny, przyjęto wartość równą zero.

- beton specjalny wysokiej wytrzymałości, z domieszką włókien polipropylenowych LFFP, na bazie kruszywa bazaltowego – zastosowano dla:
 - płyt zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP – płyta K100-6 grupy VI,
 - recepturę mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Receptura mieszanki betonu specjalnego wysokiej wytrzymałości.

składnik	Udział w m3 mieszanki , kg/m3	Udział w m3 mieszanki , %
cement	565,00	24,79
kruszywo grube	421,98	19,83
kruszywo drobne	1054,62	46,28
woda	192,10	8,43
domieszka napowietrzająca	0,57	0,03
superplastyfikator	2,93	0,13
włókna (LPPF)	6,00	0,26
opóźniacz	5,65	0,25

Celem oznaczenia wytrzymałości betonu na ściskanie z przygotowanych do zabetonowania poszczególnych elementów mieszanek betonowych uformowano:

- dla płyt betonowych grupy I,II,III i VI normowe kostki sześciennie o wymiarach 150 x 150 x 150 mm,

- dla płyt betonowych grupy IV i V normowe walce (śr. 15 cm, wys. 30 cm),

które następnie poddano testom niszczącym (ściskaniu) w maszynie wytrzymałościowej o maksymalnej sile ściskającej do 3000 kN, badanie przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN-12390-3 , wobec czego próbki poddano próbie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach.

Dla każdej z serii płyt przygotowano liczbę próbek (sześciennych lub walcowych) w ilości zgodnej z poniższym zestawieniem ujętym w tabeli 8.

Tabela 8. Zestawienie liczby próbek betonu dla każdej z serii płyt.

lp	Grupa	l. próbek	Klasa betonu	Rodzaj próbki
Płyty zbrojone B600B				
1	I	6	Beton zwykły, wg wyników.	kostka 15x15x15
2	II	6	Beton zwykły, wg wyników.	kostka 15x15x15
3	III	6	Beton zwykły, wg wyników.	kostka 15x15x15
Płyty zbrojone GFRP				
4	IV	2	Beton zwykły, wg wyników.	walec 30/15
5	V	2	Beton zwykły, wg wyników.	walec 30/15
6	VI	3	Beton zwykły, wg wyników.	kostka 15x15x15
	VI	3	Beton specjalny + domieszka LPPF	kostka 15x15x15

4.3. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA STALOWEGO B600B

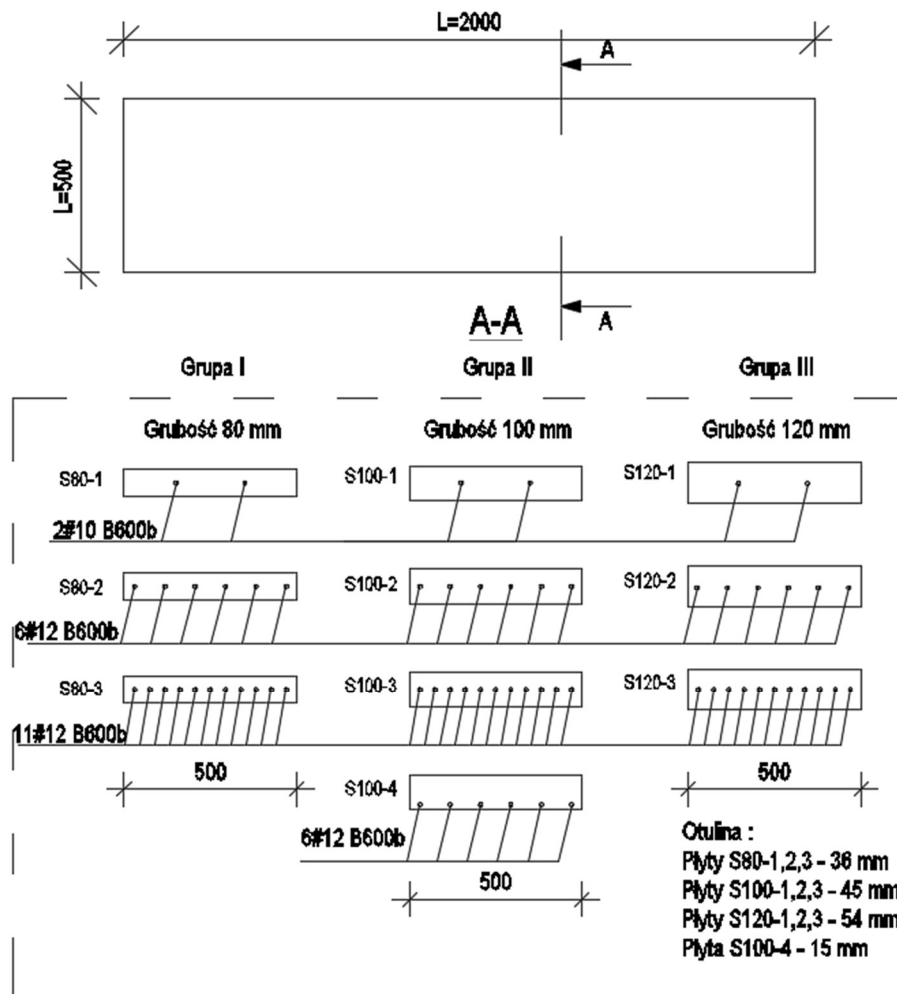
4.3.1. Opis płyt poddanych badaniu

Zakres planowanych badań obejmuje pasma płytowe o wymiarze przekroju 500 mm x 8-12 mm (wysokość zdywersyfikowana) i długości 2000 mm, zamocowane w stanowisku za pośrednictwem ceowników walcowanych. Zbrojenie główne płyt wykonano z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości – stali B600B o średnicach 10 i 12 mm (jedna średnica dla jednej płyty – nie stosowano rozwiązań hybrydowych). Zbrojenie umieszczono w połowie wysokości elementu, co miało na celu zasymulowanie pracy płyt w nietypowych warunkach takich jak np. obudowy szybów, tunele, gdzie w zależności od lokalizacji i warunków pracy rozciągana może być dolna lub górna powierzchnia elementu. Płyta S100-4 wykonana dla celu badań pod obciążeniem dynamicznym – nie weryfikuje się nośności.

Charakterystykę płyt poddanych badaniu zestawiono w tabeli 9 oraz zilustrowano w rysunku 4.

Tabela 9. Zestawienie i charakterystyka płyt betonowych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom.

Grupa	Płyta	Szer.	Gr.	Dł.	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia (As/bd)
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	%
I	S80-1	0,50	0,08	2,00	2φ10 B600B	0,79
	S80-2	0,50	0,08	2,00	6φ12 B600B	3,40
	S80-3	0,50	0,08	2,00	11φ12 B600B	6,22
II	S100-1	0,50	0,10	2,00	2φ10 B600B	0,63
	S100-2	0,50	0,10	2,00	6φ12 B600B	2,72
	S100-3	0,50	0,10	2,00	11φ12 B600B	4,98
	S100-4	0,50	0,10	2,00	6φ12 B600B	2,72
III	S120-1	0,50	0,12	2,00	2φ10 B600B	0,52
	S120-2	0,50	0,12	2,00	6φ12 B600B	2,26
	S120-3	0,50	0,12	2,00	11φ12 B600B	4,15



Rys. 4. Geometria i zbrojenie płyt zastosowanych w grupach (zbrojenie stalowe).

4.3.2. Opis procedury obliczeniowej

Wszystkie płyty betonowe w których zastosowano zbrojenie wysokiej wytrzymałości B600B poddano analizie teoretycznej w oparciu o normę PN-EN 1992-1-1 [131], wyznaczając ich nośność, wg poniższej procedury obliczeniowej.

$$\xi_{ef} \cdot b \cdot d \cdot \eta \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{cs} - A_{s1} \cdot f_{yd} = 0 \quad (1)$$

Po przekształceniu:

$$\xi_{ef} = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd} - A_{s2} \cdot \sigma_{cs}}{d \cdot b \cdot \eta \cdot f_{cd}} \quad (2)$$

Gdzie:

- A_{s1} - pole przekroju zbrojenia rozciąganego, [m²];
- A_{s2} - pole przekroju zbrojenia ściskanego, [m²];
- f_{yd} - obliczeniowa wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, [MPa];
- σ_{cs} - naprężenia ściskające w zbrojeniu ściskanym, można przyjmować $\sigma_{cs} = f_{yd}$;
- d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju, [m];
- b - szerokość przekroju zginanego, [m];
- η - współczynnik określający efektywną wytrzymałość betonu, określany zgodnie z PN-EN 1992-1-1 3.1.7(3), [-];
- f_{cd} - obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie, [N/m²],

Ale:

$$\xi_{ef} \leq \xi_{ef,lim} = \frac{|\varepsilon_{cu3}|}{|\varepsilon_{cu3}| + |\varepsilon_{sy}|} \quad (3)$$

Gdzie:

- ε_{cu3} - odkształcenie graniczne betonu ustalane z PN-EN 1992-1-1, Tablica 3.1, [%];
- ε_{sy} - odkształcenie zbrojenia w punkcie uplastycznienia stali, $\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s}$, [%];

Kolejno, korzystając z wzorów na moment niszczący należy określić jego wartość, w zależności od tego czy o zniszczeniu decyduje ściskanie czy rozciąganie:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \xi_{ef} \cdot \zeta_{ef} \cdot b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (d - a_2) \\ A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - a_2) \end{cases}, [\text{kNm}] \quad (4),$$

gdzie:

$$\zeta_{ef} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{ef} \quad (5).$$

W przekrojach , w których nie występuje zbrojenie ściskanie wzór (4) stosuje się następująco:

$$M_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \xi_{ef} \cdot \zeta_{ef} \cdot b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd} \\ A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - a_2) \end{array} \right. , [\text{kNm}] \quad (6).$$

Kolejno określa się najniższą wartość ξ_{ef} , wg wzorów j.n.

- Dla $\xi_{ef} \geq \frac{2 \cdot a_2}{d} - M_{Rd} = \xi_{ef} \cdot \zeta_{ef} \cdot b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}$; (7)

- Dla $\xi_{ef} \leq \frac{2 \cdot a_2}{d} - M_{Rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - a_2)$; (8)

- Dla $\xi_{ef} \geq \xi_{ef,lim} - \xi_{ef} = \xi_{ef,lim}$. (9)

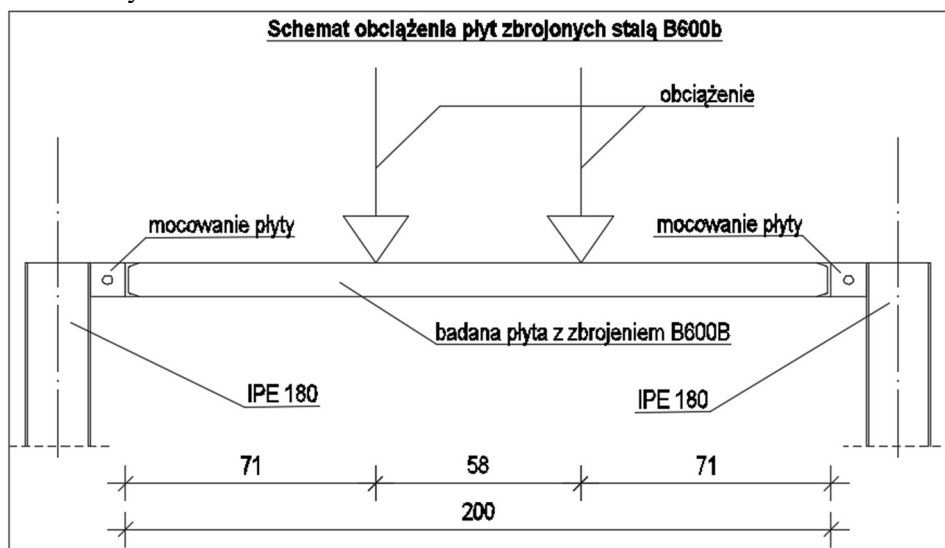
Powyższą procedurę zastosowano w obliczeniach płyt, do obliczeń przyjęto wartości parametrów zbrojenia wyznaczone w drodze badań eksperymentalnych, których wyniki zestawiono w tabeli 22. Wyniki obliczeń teoretycznych nośności płyt betonowych zestawiano w tabeli 10.

Tabela 10. Wyniki analizy teoretycznej płyt betonowych zbrojonych stałą wysoką wytrzymałości B600b poddanych badaniom

Grupa	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Mrd,teoret
[-]	[-]	[-]	%	kNm
I	S80-1	2φ10 B600B	0,79	4,15
	S80-2	6φ12 B600B	3,40	11,63
	S80-3	11φ12 B600B	6,22	11,63
II	S100-1	2φ10 B600B	0,63	5,26
	S100-2	6φ12 B600B	2,72	18,63
	S100-3	11φ12 B600B	4,98	18,63
III	S120-1	2φ10 B600B	0,52	6,36
	S120-2	6φ12 B600B	2,26	24,55
	S120-3	11φ12 B600B	4,15	26,33

4.3.3. Opis stanowiska badawczego

Badania realizowano w dedykowanym do tego celu stanowisku badawczym, które tworzy przestrzenną konstrukcję z pospawanych kształtowników stalowych zamocowaną w sposób sztywny do podłoża (widok stanowiska rys. 5), co zapewniało sztywność i uniemożliwiało ruchy pionowe i poziome. Płytę w stanowisku umieszczono na dwóch podporach, zamocowaną poprzez przegubowe połączenie (skręcane) za pośrednictwem zatopionych w płytach ceowników walcowanych UPN.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego – płyta z zbrojeniem B600B.

W badaniach niszczących zastosowano prasę DRWEB 600 firmy WPM o zakresie wytrzymałości do 6000 kN, kalibracja stanowiska została przeprowadzona za pomocą elementu naciągu i dynamometru elektronicznego HBM-U10M.

Stanowisko wyposażono w następujące urządzenia pomiarowe:

- czujniki przemieszczeń poziomych podpór stanowiska ,
- czujniki odkształceń stref rozciąganych (dolnych) i ściskanych (górnych) ,
- łaty do pomiaru ugięć na długości płyty ,
- czujniki kątów obrotu płyty na podporze ,
- akcelerometry do pomiaru stanu technicznego pasma, przez określenie charakterystyki dynamicznej,
- elektroniczne urządzenie dynamometryczne.

4.3.4. Procedura badań wytrzymałościowych

Płyta betonowa po umieszczeniu w stanowisku badawczym za pomocą dwóch połączeń przegubowych (skręcanych) została poddana zginaniu za pomocą prasy hydraulicznej DRWEB 600. Takie przygotowanie stanowiska badawczego, pozwoliło na wyeliminowanie występowania momentów zginających i pozwoliło stworzyć efekt ściskania i rozciągania w badanym elemencie płytowym.

Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie do badanej płyty za pośrednictwem prasy hydraulicznej dwóch sił poprzecznych w $1/3$ i $2/3$ długości płyty. Rozpoczęto od przyłożenia minimalnego obciążenia, które kolejno zwiększano w postępie 10-minutowym, aż do zniszczenia próbki.

Celem przedmiotowego badania było określenie nośności i modelu zniszczenia płyty oraz zaobserwowanie charakterystyki pracy w warunkach zwiększanego cyklicznie obciążenia, obserwując:

- ugięcia,
- odkształcenia w strefie ściskanej i rozciąganej,
- szerokość i model rozwoju rys w trakcie badania,
- nośność i model zniszczenia płyty.



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego z zamocowaną płytą zbrojoną B600B.



Rys. 7. Widok stanowiska badawczego z zamocowaną płytą zbrojoną B600B.

4.4. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA KOMPOZYTOWEGO GFRP

4.4.1. Opis płyt poddanych badaniu

Przedmiot badań stanowią płyty żelbetowe o następujących wymiarach: długości 2,00m , szerokości 0,50 m i zmiennej wysokości przekroju 0,08 – 0,12 m , przekroju prostokątnym. Płyty są zbrojone wzdłuż dłuższego boku prętami kompozytowymi na bazie włókien szklanych (GFRP) podłużnymi Ø8 oraz Ø10 . Pręty wzdłużne są równomiernie rozmieszczone na szerokości płyty. Środek ciężkości zbrojenia podłużnego zlokalizowano w połowie wysokości elementu. Jako zbrojenie rozdzielcze zastosowano pręty Ø6 mm ze stali RB400W, rozmieszczone dołem (tj. pod zbrojeniem podłużnym) w rozstawie co 0,30 m. W badanych płytach zastosowano zróżnicowane klasy betonu, średnice zbrojenia , grubości otuliny – celem umożliwienia szerokiej obserwacji pracy płyt betonowych zbrojonych kompozytem GFRP w różnych warunkach wykonania.

Dla celu uzyskania szerokiego rozpoznania odpowiedzi płyt betonowych ze zbrojeniem kompozytowym na obciążenie, dla każdej ze średnic przygotowano płyty o znacząco różnym stopniu zbrojenia (od 2 do 10/11 prętów zbrojenia głównego). Przedmiotowe płyty zestawiono w dwóch grupach badawczych odpowiednio – płyty zbrojone prętami średnicy Ø8 – grupa IV oraz płyty zbrojone prętami średnicy Ø10 – grupa V . Wszystkie płyty zawarte w grupach badawczych IV i V zabetonowano zwykłą mieszanką betonową oraz poddano obciążeniu aż do zniszczenia. Dodatkowo, płyty grupy IV i V zróżnicowano zastosowaniem innej otuliny – w płytach grupy IV zbrojenie umieszczono w środku wysokości przekroju, a w płytach grupy V w odległości 15 mm od dolnej krawędzi. Takie zróżnicowanie, miało na celu analizę pracy płyt betonowych w dwóch wariantach i potwierdzenie danych uzyskanych w modelu teoretycznym, wskazujących, że umieszczenie zbrojenia w dolnej części przekroju na minimalnej otulinie znacząco korzystnie wpływa na nośność elementu. Dodatkowo, wariant otuliny zastosowany w płytach grupy IV pozwala zasymulować warunki niedokładności wykonania zbrojenia w warunkach budowy, gdzie z uwagi na różne uwarunkowania otulina może być zwiększana w stosunku do założeń projektowych oraz odnosi się do założenia ewentualnego stosowania płyt betonowych z zbrojeniem wysokiej wytrzymałości w elementach o nietypowych warunkach pracy , gdzie rozciągana może być zarówno górna jak i dolna płaszczyzna (np. elementy tuneli, szachtów itd.).

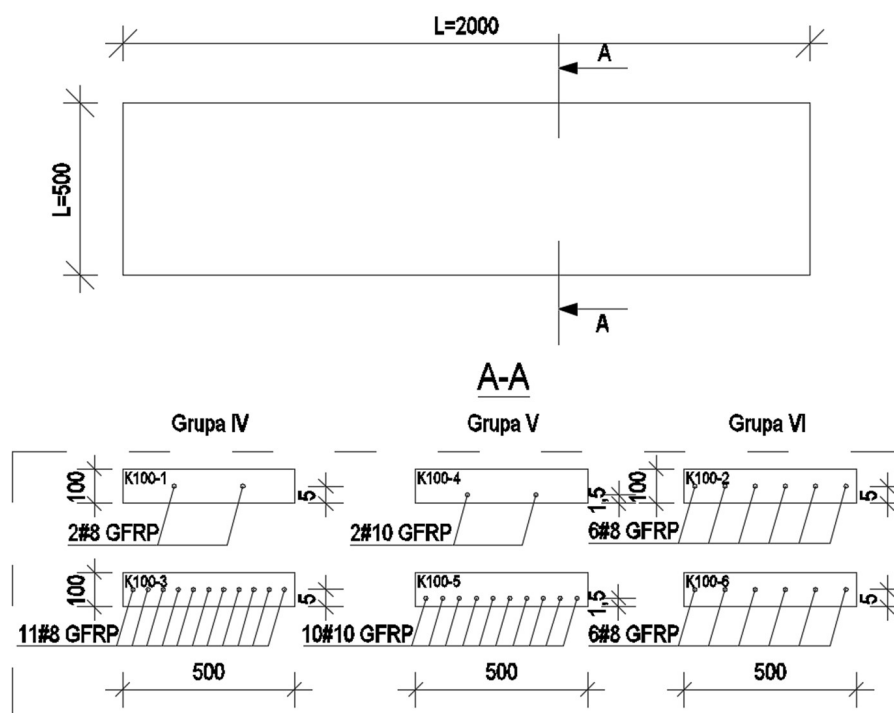
Dodatkowo, bazując na dokonanym przeglądzie literatury stwierdzono, że należy spodziewać się występowania w tego rodzaju elementach płytowych znacznych ugięć i zarysowań w trakcie obciążania. Bazując na tych danych, wykonano dodatkową grupę VI – w ramach której wykonano dwie płyty K100-5 i K100-6 zbrojone 6 prętami fi 8 każda. Poza zbrojeniem głównym GFRP, w płycie K100-6 zastosowano rozwiązania, które powinny w znacznym stopniu wyeliminować

przedmiotowe niekorzystne zjawiska. W płycie K100-5 zastosowano beton zwykły, natomiast do wykonania płyty K100-6 zastosowano beton wysokiej wytrzymałości na bazie kruszywa bazaltowego oraz domieszkę włókien LPPF, aby porównać warunki pracy płyt (głównie w zakresie rozwoju ugięć i zarysowań) o tożsamej geometrii i zbrojeniu, ale odmiennej mieszance betonowej. Płytę K100-6 poddano obciążeniu i obserwowano jej ugięcia i rozwój rys pod obciążeniem, bez jej zniszczenia (próbka służyła wyłącznie do obserwacji wpływu zastosowania odmiennych materiałów na pracę płyty w warunkach stanu granicznego użytkowości). Dane z obserwacji pracy płyty K100-6, posłużyły do analizy wpływu zastosowanych rozwiązań materiałowych na poprawę pracy elementów z zbrojeniem kompozytowym w zakresie stanu granicznego użytkowości i stanowią będą dane wyjściowe do dalszych badań – tj. poszukiwań optymalnego składu mieszanki betonowej i domieszki włókien.

Płyty umieszczono w stanowisku symetrycznie, na dwóch podporach. Charakterystykę płyt poddanych badaniu zestawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Zestawienie i charakterystyka płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP poddanych badaniom

Grupa	Płyta	Szerokość	Grubość	Długość	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia (A_f/bd) – zgodnie z [19]
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	%
IV	K100-1	0,50	0,10	2,00	2 ϕ 8 GFRP	0,40
	K100-2	0,50	0,10	2,00	11 ϕ 8 GFRP	2,22
V	K100-3	0,50	0,10	2,00	2 ϕ 10 GFRP	0,39
	K100-4	0,50	0,10	2,00	10 ϕ 10 GFRP	1,96
VI	K100-5	0,50	0,10	2,00	6 ϕ 8 GFRP	1,20
	K100-6	0,50	0,10	2,00	6 ϕ 8 GFRP	1,20



Rys. 8. Geometria i zbrojenie płyt zastosowanych w grupach (zbrojenie kompozytowe).

4.4.2. Opis procedury obliczeniowej

Dla wszystkich płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego wysokiej wytrzymałości przeprowadzono analizę obliczeniową teoretyczną w oparciu o normę ACI 440.1R-15 [19]. Nośność płyty na zginanie uzależniona jest od współpracy dwóch materiałów: betonu - poddanego ścisaniu oraz zbrojenia kompozytowego FRP (w tym przypadku GFRP) - przede wszystkim poddanego rozciąganiu.

Zbrojenie FRP w modelu pracy pod obciążeniem zginającym, wykazuje liniowo-sprężyste zachowanie aż do zerwania i nie wykazuje uplastycznienia przed zniszczeniem, wobec czego sposób zniszczenia przekroju zbrojonego FRP ma kluczowe znaczenie dla określenia jego nominalnej wytrzymałości na zginanie M_n .

Instrukcja [19] rozróżnia dwa rodzaje przekrojów zbrojonych FRP pod obciążeniem zginającym, tj.:

- **przekroje kontrolowane przez rozciąganie**, w których zniszczenie następuje w wyniku zerwania zbrojenia FRP przez osiągnięciem przez beton granicznego

odkształcenia ściskającego – których nośność należy wyznaczać wg wzoru 7.2.2.g instrukcji [19],

- **przekroje kontrolowane przez ściskanie**, w których zniszczenie występuje w skutek zgniecenia betonu w strefie ściskanej, zanim nastąpi zerwanie zbrojenia FRP – których nośność należy wyznaczać wg wzoru 7.2.2.e instrukcji [19],

wobec powyższego, każdorazowo analizowany przekrój powinien zostać przeanalizowany stosownie do zapisów instrukcji [19] w zakresie modelu pracy tj. powinno zostać określone w początkowej fazie obliczeń czy dany przekrój jest kontrolowany przez rozciąganie czy przez ściskanie.

4.4.2.1. Obliczeniowa teoretyczna wytrzymałość na zginanie

Wyznaczenie obliczeniowej wytrzymałości na zginanie M_u zgodnie z wzorem 7.2. instrukcji [19] :

$$\varphi M_n \geq M_u ; (10)$$

Gdzie:

M_n – nominalna wytrzymałość na zginanie [kNm];

M_u – obliczeniowa wytrzymałość na zginanie [kNm];

φ – współczynnik redukcji nośności [-];

odbywa się poprzez skorygowanie uzyskanej w toku obliczeń na podstawie wzorów 7.2.2.g lub 7.2.2.e nominalnej wytrzymałości na zginanie M_n za pomocą współczynnika redukcyjnego, wynoszącego zgodnie z wzorem 7.2.3. instrukcji [19] :

- 0,55 – dla przekrojów kontrolowanych przez rozciąganie.

- 0,65 - dla przekrojów kontrolowanych przez ściskanie.

Celem wyznaczenia nominalnej wytrzymałości na zginanie M_n (kNm) należy posłużyć się wzorami, odpowiednio

- dla przekrojów kontrolowanych przez rozciąganie – wzór 7.2.2g zgodnie z [19]:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right) ; (11)$$

Gdzie:

M_n – nominalna wytrzymałość na zginanie w przekroju kontrolowanym przez rozciąganie [kNm];

A_f – pole przekroju zbrojenia [mm²];

f_{fu} - projektowa wytrzymałość na rozciąganie FRP, zdefiniowana jako gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie pomnożona przez współczynnik redukcji środowiskowej [MPa];

d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];

β_1 – współczynnik redukcyjny zgodnie z ACI 440.1R-15 [-];

c_b – odległość osi obojętnej do górnej krawędzi przekroju [mm];

- dla przekrojów kontrolowanych przez ściskanie – wzór 7.2.2e zgodnie z [19]:

$$M_n = \rho_f * f_f \left(1 - 0,59 * \frac{\rho_f * f_f}{f_c'} \right) b d^2 ; (12)$$

Gdzie:

M_n – nominalna wytrzymałość na zginanie w przekroju kontrolowanym przez ściskanie [kNm];

ρ_f – stopień zbrojenia kompozytowego [%]

f_f – naprężenie występujące w zbrojeniu FRP w strefie rozciąganej [MPa]

f_c' – wytrzymałość betonu na ściskanie, oznaczona na próbce walcowej [MPa],

b – szerokość przekroju [mm],

d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm].

Dla określenia nośności przekroju w oparciu o wzory 7.2., 7.2.2e oraz 7.2.2g instrukcji [19] należy dokonać stosownych obliczeń, celem wyznaczenia wartości φ, d, c_b, f_{fu} odpowiednio:

Na podstawie wzoru 7.2.3 zgodnie z [1] , określa się wartość współczynnika φ :

$$\varphi = \begin{cases} 0,55 \text{ dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{dla } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 \text{ dla } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (13)$$

Gdzie:

φ – współczynnik redukcji nośności [-];

ρ_f – stopień zbrojenia kompozytowego [%]

ρ_{fb} – zrównoważony stopień zbrojenia kompozytowego przekroju [%];

Współczynnik φ zgodnie z sekcją 7.2.3 instrukcji [19] definiuje się jako wartość 0,55 dla przekrojów kontrolowanych przez rozciąganie (gdzie pęknięcie zbrojenia FRP poprzedza zgniecenie betonu) i 0,65 dla przekrojów kontrolowanych przez ściskanie (gdzie zgniecenie betonu następuje przed zerwaniem zbrojenia FRP).

Określenie stopnia zbrojenia zgodnie z wzorem 7.2.1.a instrukcji [19]:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (14)$$

Gdzie:

ρ_f – stopień zbrojenia kompozytowego przekroju [%];

A_f – pole przekroju zbrojenia [mm²];

d – odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];

b – szerokość przekroju [mm].

Wyznaczenie odległości d [mm]:

$$d = h - \left(c + \frac{\emptyset}{2} \right) \quad ; \quad (15)$$

Gdzie:

d – odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];

h – wysokość płyty [mm]

$\emptyset$ – średnica pręta zbrojeniowego GFRP [mm]

c – otulina zbrojenia GFRP [mm]

Wyznaczenie zrównoważonego stopnia zbrojenia wg wzoru 7.2.1.b instrukcji [19]:

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} * \frac{E_f \varepsilon_{CU}}{E_f \varepsilon_{CU} + f_{fu}}; (16)$$

Gdzie:

ρ_{fb} – zrównoważony stopień zbrojenia kompozytowego przekroju [%];

β_1 – współczynnik redukcyjny zgodnie z ACI 440.1R-15 [-];

f_{fu} - projektowa wytrzymałość na rozciąganie FRP, zdefiniowana jako gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie pomnożona przez współczynnik redukcji środowiskowej [MPa];

f_c' – wytrzymałość betonu na ściskanie, oznaczona na próbce walcowej [MPa],

ε_{CU} – graniczne odkształcenie betonu [-],

E_f – moduł sprężystości zbrojenia FRP przy rozciąganiu [MPa];

Wyznaczenie odległości c_b [mm], zgodnie z wzorem 7.2.2.h instrukcji [19]:

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{CU}}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{CU}} \right) d (17)$$

Gdzie:

c_b – odległość osi obojętnej do górnej krawędzi przekroju [mm];

d - odległość zbrojenia rozciąganego do górnej krawędzi przekroju [mm];

ε_{CU} – graniczne odkształcenie betonu [-],

ε_{fu} – projektowane odkształcenie przy zerwaniu zbrojenia FRP [-],

Wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie f_{fu} [MPa], zgodnie z wzorem 6.2.a instrukcji [19]:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* (18)$$

Gdzie:

f_{fu} - projektowa wytrzymałość na rozciąganie FRP, zdefiniowana jako gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie pomnożona przez współczynnik redukcji środowiskowej [MPa];

C_E – środowiskowy współczynnik redukcyjny (uzależniony od czynników środowiskowych i warunków ekspozycji) [-];

f_{fu}^* - wytrzymałość na rozciąganie pręta FRP [MPa];

Oznaczenie współczynnika C_E przeprowadza się zgodnie z tablicą 6.2. normy [19], w zależności od rodzaju zastosowanego zbrojenia kompozytowego:

Tabela 12. Dobór współczynnika C_E .

Warunki ekspozycji	typ	wsp. C_E
Brak ekspozycji betonu na grunt i wodę	CFRP	1,00
	GFRP	0,80
	AFRP	0,90
Ekspozycja betonu na grunt i wodę	CFRP	0,90
	GFRP	0,70
	AFRP	0,80

Wyznaczenie projektowanego odkształcenia przy zerwaniu zbrojenia ϵ_{fU} [-], zgodnie z wzorem 6.2.b instrukcji [19]:

$$\epsilon_{fU} = \frac{f_{fu}}{E_f} \quad (19);$$

Gdzie:

ϵ_{fU} – projektowane odkształcenie przy zerwaniu zbrojenia FRP [-],

f_{fu} - projektowa wytrzymałość na rozciąganie FRP, zdefiniowana jako gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie pomnożona przez współczynnik redukcji środowiskowej [MPa];

E_f – moduł sprężystości zbrojenia FRP przy rozciąganiu [MPa];

Wyznaczenie naprężenia f_f [MPa], zgodnie z wzorem 7.2.2.d instrukcji [19]:

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{E_f \varepsilon_{cu}}{4}\right)^2 + \frac{0,85 \beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \quad (20):$$

Gdzie:

f_f – naprężenie występujące w zbrojeniu FRP w strefie rozciąganej [MPa]

E_f – moduł sprężystości zbrojenia FRP przy rozciąganiu [MPa];

ε_{cu} – graniczne odkształcenie betonu [-],

β_1 – współczynnik redukcyjny zgodnie z ACI 440.1R-15 [-];

f_c' – wytrzymałość betonu na ściskanie, oznaczona na próbce walcowej [MPa],

ρ_f – zrównoważony stopień zbrojenia kompozytowego przekroju [%];

W związku z powołaniem w treści dokumentu [53] metod badania zgodnie z [130], przyjmuje się, że do prowadzenia obliczeń wg [19] wymagane jest posługiwanie się wartością wytrzymałości betonu na ściskanie oznaczoną na próbkach cylindrycznych, a nie sześciennych.

W zakresie badań, które przeprowadzono w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej, w części oznaczono badawczo na kostkach sześciennych wytrzymałość na ściskanie betonu użytego do wykonania płyt z zastosowaniem zbrojenia GFRP. Wyniki badania zestawiono w załączniku nr 6.

Wobec czego dla określenia f_c' w przypadku oznaczenia wytrzymałości na kostkach, przyjmuje się współczynnik redukcyjny 0,8, za pomocą którego dokonuje się konwersji uzyskanych wyników badań na próbkach sześciennych.

Powyższą procedurę zastosowano w obliczeniach płyt, do obliczeń płyt grupy VI przyjęto faktyczne parametry zbrojenia kompozytowego wyznaczone w drodze badań eksperymentalnych, których wyniki zestawiono w tabeli 20, w pozostałym zakresie (dla płyt grupy IV i V) przyjęto parametry zbrojenia zgodnie z badaniami producenta. Wyniki obliczeń teoretycznych nośności płyt betonowych zestawiano w tabeli 13.

Tabela 13. Wyniki analizy teoretycznej płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP poddanych badaniom.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Mu,teoret
[-]	[-]	[-]	%	kNm
IV	K100-1	2φ8 GFRP	0,40	2,281
	K100-2	11φ8 GFRP	2,22	5,635
V	K100-3	2φ10 GFRP	0,39	5,703
	K100-4	10φ10 GFRP	1,96	16,00
VI	K100-5	6φ8 GFRP	1,20	4,046
	K100-6	6φ8 GFRP	1,20	4,509

4.4.2.2. Obliczeniowy teoretyczny moment rysujący

Obliczenie teoretycznego momentu rysującego zgodnie z instrukcją [19] prowadzi się na podstawie wzoru 7.3.2.2.d (formuła wzoru dla jednostek w układzie SI), które zasadniczo zgodnie z treścią instrukcji [19] dotyczą momentów rysujących belek, ale z uwagi na zbliżony model pracy elementu, procedurę zaadoptowano na potrzeby określenia danych w zakresie zarysowań dla płyt betonowych:

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f_c'} I_g}{y_t}; \quad (21)$$

Gdzie:

M_{cr} – moment rysujący [kNm],

λ – współczynnik typu betonu, dla betonu zwykłego równy 1,

f'_c - charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa],

I_g – moment bezwładności przekroju niezarysowanego [mm⁴],

y_t – odległość od osi obojętnej do najbardziej rozciąganej krawędzi przekroju [mm].

$$I_g = \frac{bh^3}{12}; \quad (22)$$

Gdzie:

I_g – moment bezwładności przekroju niezarysowanego [mm⁴],

$$y_t = \frac{h}{2}; \quad (23)$$

Gdzie:

y_t – odległość od osi obojętnej do najbardziej rozciąganej krawędzi przekroju [mm].

Teoretycznie wyliczoną obliczeniową wartość momentu powodującego zarysowanie dla poszczególnych płyt wyliczoną zgodnie z [19] zestawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Wyniki wyliczonego teoretycznie momentu powodującego zarysowanie płyt zbrojonych GFRP zgodnie z [19].

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	$M_{crack,teoret}$
[-]	[-]	[-]	%	kNm
IV	K100-1	2φ8 GFRP	0,40	0,329
	K100-2	11φ8 GFRP	2,22	0,329
V	K100-3	2φ10 GFRP	0,39	0,408
	K100-4	10φ10 GFRP	1,96	0,408
VI	K100-5	6φ8 GFRP	1,20	0,351
	K100-6	6φ8 GFRP	1,20	0,491

4.4.2.3. Obliczeniowe teoretyczne ugięcie

Celem wyznaczenia obliczeniowego teoretycznego ugięcia płyty pod obciążeniem zginającym należy skorzystać z wzoru ujętego w instrukcji [53]:

$$\Delta = \frac{M_a L^2}{48 E I_e}; \quad (24)$$

Gdzie:

Δ – ugięcie elementu, wg [53], [mm],

L – rozpiętość elementu, [mm].

M_a – maksymalny moment od obciążenia użytkowego w elemencie [kNm],

I_e – efektywny moment bezwładności przekroju [mm⁴].

Dla celu określenia efektywnego momentu bezwładności przekroju, konieczne jest posłużenie się wzorem 7.3.2.2.c zgodnym z instrukcją [19]:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_e}{I_g} \right]} \leq I_g \text{ gdzie } M_a \geq M_{cr}; (25)$$

Gdzie:

γ – parametr uwzględniający zmienność sztywności na długości elementu [-],

M_{cr} – moment rysujący [kNm],

Celem rozwiązania równania należy wyznaczyć I_{cr} w oparciu o wzór 7.3.2.2.a instrukcji [19], wg:

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k^2); (26)$$

Gdzie:

I_{cr} – moment bezwładności przekroju zarysowanego [mm⁴],

n_f – stosunek modułu sprężystości prętów FRP / modułu sprężystości betonu [-],

k – stosunek odległości osi obojętnej do odległości zbrojenia od krawędzi ściskanej.

Kolejno, składowe wzoru należy wyliczać wg wzorów zgodnie z instrukcjami [19] oraz [53]:

$$n_f = \frac{E_f}{E_c}; (27)$$

Gdzie:

E_f – moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego [GPa],

E_c – moduł sprężystości betonu [GPa].

Współczynnik k wg wzoru 7.3.2.2.b zgodnie z instrukcją [19]:

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2 \rho - \rho_f n_f}; \quad (28)$$

Współczynnik γ wg sekcji 7.3.2.2. zgodnie z instrukcją [19]:

$$\gamma = 1,72 - 0,72 \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right); \quad (29)$$

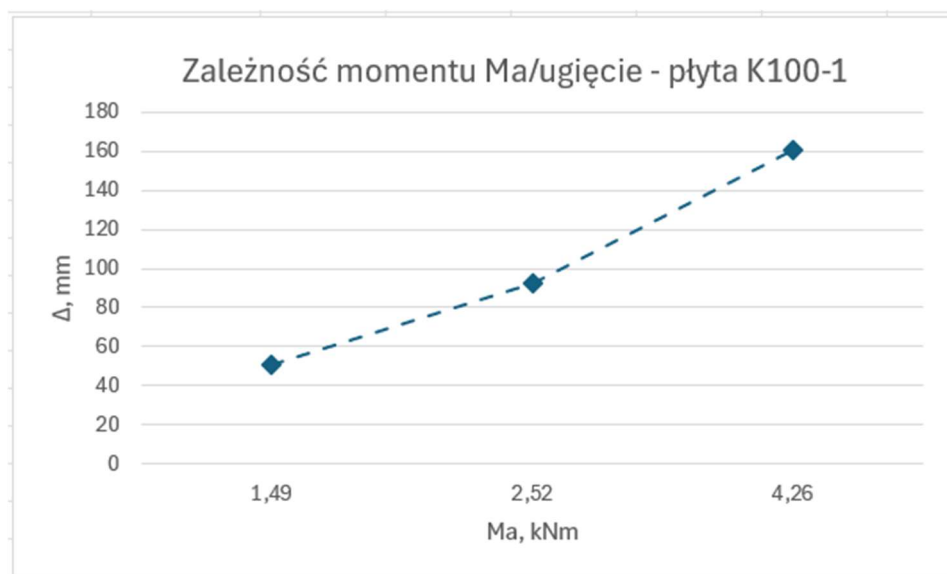
Wyniki obliczeń teoretycznych w zakresie propagacji rozwoju ugięć zrealizowano poprzez wyznaczenie:

- dla wszystkich płyt zbrojonych kompozytem GFRP wszystkich grup badawczych (IV-VI) określono wartości momentu $M_{a,lim}$ powodującego ugięcia przyjęte jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$ Wartość obliczeń zestawiono w tabeli 15.

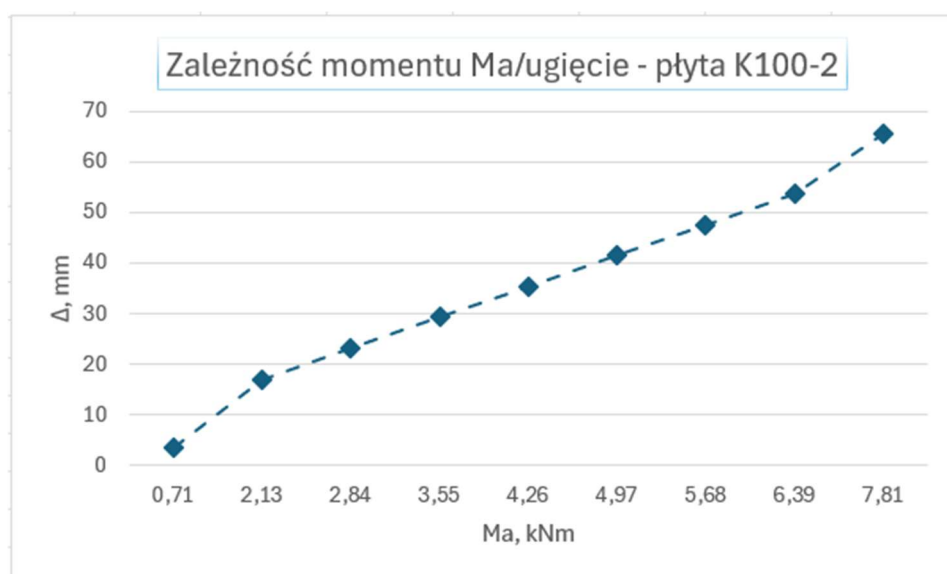
Tabela 15. Wyniki wyliczonego teoretycznie momentu powodującego ugięcia przyjętego jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$ płyt zbrojonych GFRP zgodnie z [19].

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	M_a , teoret.
[-]	[-]	[-]	%	kNm
IV	K100-1	2 ϕ 8 GFRP	0,40	0,537
	K100-2	11 ϕ 8 GFRP	2,22	1,156
V	K100-3	2 ϕ 10 GFRP	0,39	1,139
	K100-4	10 ϕ 10 GFRP	1,96	3,620
VI	K100-5	6 ϕ 8 GFRP	1,20	0,721
	K100-6	6 ϕ 8 GFRP	1,20	0,875

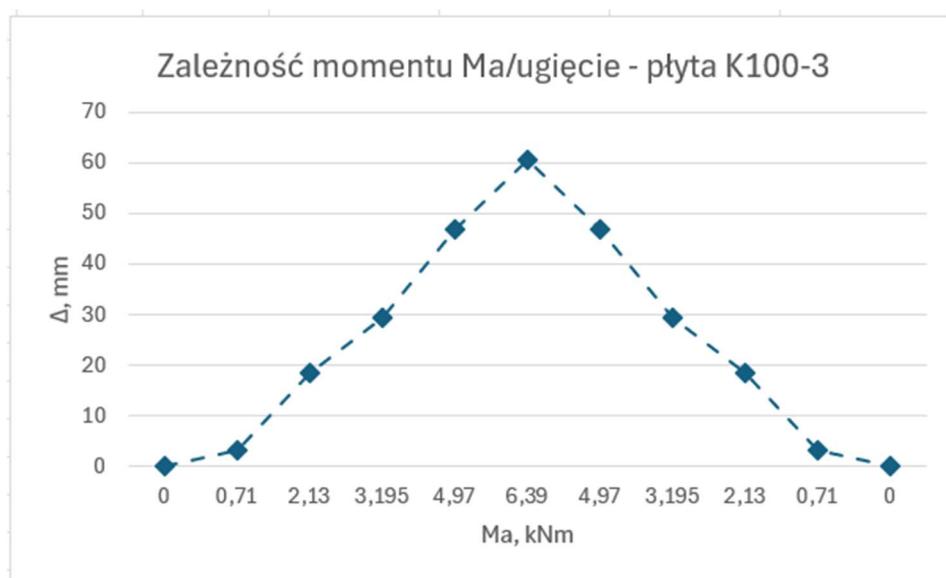
- dodatkowo dla wszystkich płyt grupy IV i V dokonano szczegółowej teoretycznej propagacji rozwoju rys w trakcie obciążania (dla płyty K100-3 zweryfikowano również odciążanie – teoretycznie i kolejno eksperymentalnie), zgodnie z faktycznymi wartościami obciążeń przyłożonymi do płyt w ramach badań eksperymentalnych, wyniki przedstawiono w formie rysunków 9-12.



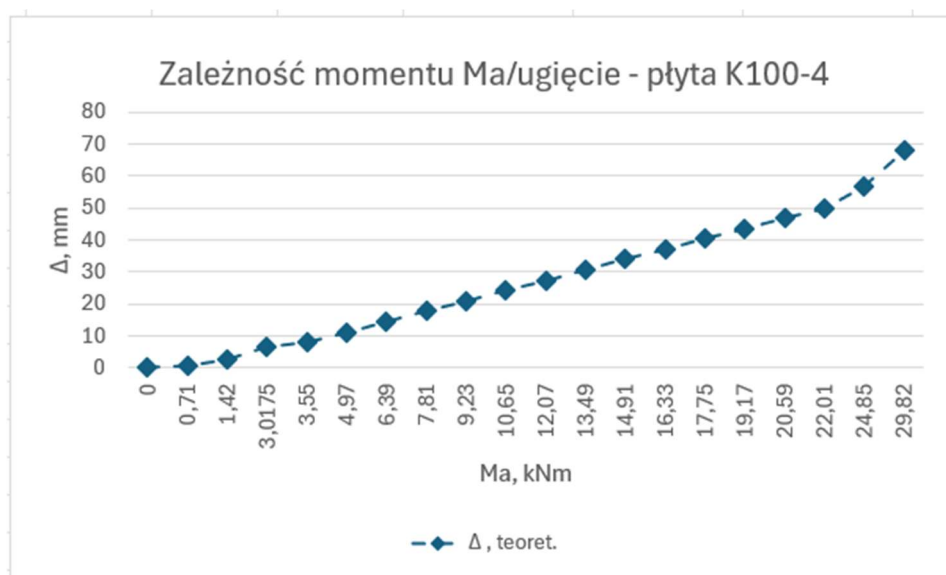
Rys. 9. Zależność (teoretyczna) moment M_a /ugięcie – płyta K100-1 (grupa IV).



Rys. 10. Zależność (teoretyczna) moment M_a /ugięcie – płyta K100-2 (grupa IV).



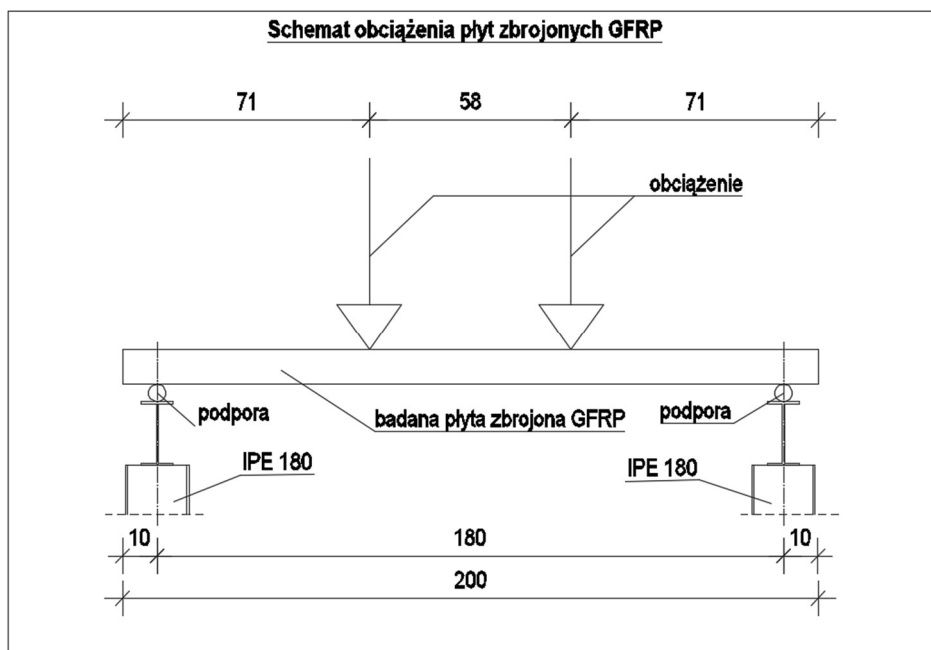
Rys. 11. Zależność (teoretyczna) moment Ma/ugięcie – płyta K100-3 (grupa V).



Rys. 12. Zależność (teoretyczna) moment Ma/ugięcie – płyta K100-4 (grupa V).

4.4.3. Opis stanowiska badawczego

Badania realizowano w dedykowanym do tego celu stanowisku badawczym, które tworzy przestrzenną konstrukcję z pospawanych kształtowników stalowych zamocowaną w sposób sztywny do podłoża (widok stanowiska rys. 13). Płytę w stanowisku umieszczono na dwóch podporach, umieszczoną w sposób wolno- podparty i poddano badaniom niszczącym z zastosowaniem prasy ENERPAC P392 o zakresie wytrzymałości do 320 kN .



Rys. 13. Schemat stanowiska badawczego – płyta z zbrojeniem GFRP.

Kalibracja stanowiska została przeprowadzona za pomocą elementu naciągu i dynamometru elektronicznego HBM-U10M.

Stanowisko wyposażono w następujące urządzenia pomiarowe:

- czujniki przemieszczeń poziomych podpór stanowiska,
- czujniki odkształceń stref rozciąganych (dolnych) i ściskanych (górnych),
- łaty do pomiaru ugięć na długości płyty ,
- czujniki kątów obrotu płyty na podporze,
- akcelerometry do pomiaru stanu technicznego pasma, przez określenie charakterystyki dynamicznej,
- elektroniczne urządzenie dynamometryczne.

4.4.4. Procedura badań wytrzymałościowych

Płyta betonowa po umieszczeniu w stanowisku badawczym na podporach w sposób wolno-podparty została poddana czteropunktowemu zginaniu za pomocą prasy ENERPAC P392 o zakresie pracy do 320 kN (maszyna w zależności od serii płyt). Takie przygotowanie stanowiska badawczego, pozwalało stworzyć efekt ściskania i rozciągania w badanym elemencie płytowym.

Obciążenie realizowano poprzez przyłożenie do badanej płyty za pośrednictwem prasy hydraulicznej dwóch sił poprzecznych w 1/3 i 2/3 długości płyty. Rozpoczęto od przyłożenia minimalnego obciążenia, które kolejno zwiększano w postępie 10-minutowym, celem obserwacji parametrów pracy płyty w stanie granicznym użytkowości, w niektórych przypadkach doprowadzając do zniszczenia próbki (jako utratę nośności w przypadku płyt GFRP przyjęto skruszenie/przełamanie betonu).

Celem przedmiotowego badania było określenie warunków pracy płyty pod obciążeniem, nośności i modelu zniszczenia płyty oraz poznanie charakterystyki pracy w warunkach zwiększanego cyklicznie obciążenia, obserwując:

- szerokość rozwarcia rys przy pomocy lupy Brinella z 40-krotnym powiększeniem i oraz przy pomocy systemu Aramis;
- siłę zewnętrzną przy pomocy systemu ZEPWN;
- ugięcie przy pomocy miary i systemu „digital image correlation” Aramis;
- odkształcenie przy pomocy zegarów mechanicznych i systemu digital image correlation” Aramis.

Dodatkowo dla płyty grupy VI oznaczonej jako K100-6, przeprowadzono szczegółową analizę następujących parametrów z zastosowaniem systemu „digital image correlation” tj. szybkiej kamery systemu Aramis.

Dla przedmiotowej płyty przeanalizowano również z wykorzystaniem systemu Aramis badawczo towarzyszący zwiększaniu obciążenia rozwój rys.

Dodatkowe badania zrealizowane dla płyty grupy VI o oznaczeniu K100-6, miały na celu szczegółową analizę pracy płyty w warunkach obciążenia, a także analizę wpływu aplikacji włókien na odpowiedź płyty na obciążenie.



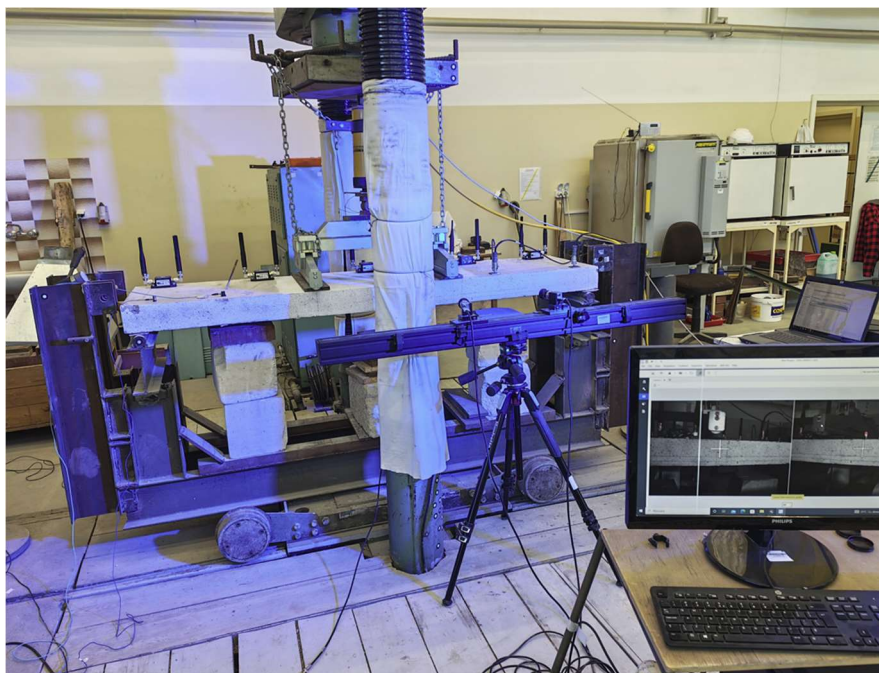
Rys. 14. Widok stanowiska z płytą zbrojoną GFRP przed rozpoczęciem badania.



Rys. 15. Widok stanowiska podczas badań płyty z zbrojeniem GFRP.



Rys. 16. Widok stanowiska podczas badań płyty z zbrojeniem GFRP.



Rys. 17. Widok stanowiska podczas badań płyty z zbrojeniem GFRP.

5. WYNIKI

5.1. ZBROJENIE

Dla prętów zbrojeniowych przeprowadzono statyczne próby rozciągania z zastosowaniem dwóch maszyn:

- maszyna VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90
- maszyna INSTRON model 8502,

odpowiednio w zależności od rodzaju badanego materiału stosowano metodę:

- stalowych wysokiej wytrzymałości B600B (średnice $\phi 10$ i $\phi 12$) według metody B norma PN-EN ISO 6892-1:2020-05 „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.”,
- kompozytowych na bazie włókien szklanych GFRP (średnice $\phi 7$, $\phi 8$) według metody B norma PN-EN ISO 6892-1:2020-05 „Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.”, zaadoptowanej poprzez zatopienie końcówek prętów kompozytowych w rurce stalowej za pomocą kleju.

Osiągnięto następujące główne wyniki badań:

- prętów stalowych wysokiej wytrzymałości B600B:
 - w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90.
1. Wyrażna granica plastyczności:
 - średnica $\phi 10$ – 613,28 MPa
 - średnica $\phi 12$ - 648,81 MPa
 2. Wytrzymałość na rozciąganie:
 - średnica $\phi 10$ – 704,53 MPa
 - średnica $\phi 12$ - 744,19 MPa
- w maszynie Instron model 8502 z zastosowaniem technologii „digital image correlation”:
1. Moduł sprężystości – 209 030 MPa
 2. Wyrażna granica plastyczności:
 - średnica $\phi 10$ – 590,00 MPa
 3. Wytrzymałość na rozciąganie:
 - średnica $\phi 10$ – 675,00 MPa
- prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych GFRP (zbadano pręty zbrojeniowe z partii użytej do wykonania płyt serii VI):

- w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90

1. Moduł sprężystości – 34 414 MPa
2. Wytrzymałość na rozciąganie:
 - średnica $\phi 8$ – 726,51 MPa

- w maszynie Instron model 8502 z zastosowaniem technologii „digital image correlation”:

1. Moduł sprężystości – 47 200 MPa
2. Wytrzymałość na rozciąganie:
 - średnica $\phi 7$ – 861,00 MPa

W skutek przeprowadzonych badań oznaczono parametry odpowiednio:

- dla zbrojenia kompozytowego GFRP gorsze od deklarowanych parametrów producenta określonych w załączniku nr 1,
- dla zbrojenia stalowego B600B w większości lepsze od deklarowanych parametrów producenta określonych w załączniku nr 2,

Szczegółowe wyniki prób rozciągania przedstawiono w załącznikach – dla zbrojenia GFRP w załączniku nr 4 oraz dla zbrojenia z stali B600B w załączniku nr 5 .

Dla celu prowadzenia obliczeń przyjęto parametry fizyczne zbrojenia oznaczone w badaniach wytrzymałościowych wykonanych w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90, w ramach których określono parametry wytrzymałościowe wszystkich rodzajów zbrojenia stosowanego do wykonania pełnowymiarowych próbek płyt betonowych oraz osiągnięto wyższe wyniki parametrów, co tworzy sytuację mniej korzystną dla porównania z wynikami badań laboratoryjnych (stawia analizę po stronie bezpiecznej). Dla zbrojenia GFRP przyjęto do obliczeń płyt serii VI uzyskane wyniki, w pozostałym zakresie przyjęto wyniki badań producenta, ponieważ zbrojenie pochodziło z innej partii , której nie badano w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

5.2. BETON

Oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano :

- na kostkach betonowych o wymiarach 150 x 150 x 150 mm (dla płyt grupy I, II, III oraz VI)

- na walcach o średnicy 150 mm oraz wysokości 300 mm (dla płyt grupy IV i V)

w oparciu o normę PN-EN-12390-3 , dla dwóch dobranych klas betonu uzyskano następujące wyniki:

- Dla betonu określonego jako zwykły

- wytrzymałość na ściskanie na próbkach sześciennych w przedziale od 52,118 MPa do 59,54 MPa,

- wytrzymałość na ściskanie na próbkach walcowych w przedziale od 39,17 MPa do 62,44 MPa

- Dla betonu określonego jako beton specjalny wysokiej wytrzymałości

wytrzymałość na ściskanie w przedziale od 109,46 MPa do 118,00 MPa.

Uzyskane wyniki potwierdziły parametry wytrzymałości betonu na ściskanie o wartościach nie gorszych niż w przyjętych założeniach.

Szczegółowe wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla obu użytych receptur betonu przedstawiono w załączniku nr 6 oraz załączniku nr 7.

5.3. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA KOMPOZYTOWEGO GFRP – PŁYTY SERII IV-VI

5.3.1. Charakter zniszczenia i nośność płyt - płyty serii IV-VI

Element (płyta betonowa) został obciążony dwiema siłami poprzecznymi, których rozstaw wynosi 580 mm, aby utworzyć strefę stałego momentu zginającego w środkowej części pasma. Ustalono minimalny poziom obciążenia 1 kN, zwiększany co 1 kN do momentu zniszczenia elementu. Obciążenie przykładano równomiernie, ze stałą prędkością.

Stwierdzono ponadto, że zachowanie płyt było liniowo sprężyste, postępowało w miarę zwiększania obciążenia.

Płyty grup IV do VI, dla których zastosowano zbrojenie GFRP o zróżnicowanych średnicach ($\varnothing 8$ oraz $\varnothing 10$) oraz zróżnicowanej liczbie prętów (od 2 do 10 lub 11) charakteryzują się równomiernym wzrostem odkształceń ściskanych, proporcjonalnie do zwiększania wartości przykładanego obciążenia.

Zniszczenie (za które dla płyt zbrojonych GFRP przyjęto widoczne skruszenie/pęknięcie betonu) wystąpiło w przypadku płyt K100-2 oraz K100-5 +9, nastąpiło w strefie ściskanej, w przekroju nad rysami, poprzedzone było wzrostem szerokości rozwarcia rys, obraz zniszczenia płyty ujęto w załączniku 9. W żadnym z analizowanych przypadków nie zaobserwowano zerwania zbrojenia kompozytowego GFRP.

Uzyskane wyniki potwierdziły bardzo dobre parametry wytrzymałościowe analizowanego zbrojenia GFRP, a także potwierdziły zapas nośności w stosunku do przeprowadzonej analizy teoretycznej (szczegółowe wyniki badań przedstawiono w załączniku 9).

5.3.2. Odkształcenia i zarysowania płyt

5.3.2.1. Przebieg badania

W trakcie próby obciążeniowej płyt betonowych, poza weryfikacją doświadczalną nośności przekroju, dokonano również obserwacji rozwoju rys i ugięć w trakcie obciążania. Obserwację przedmiotowych parametrów dla płyt, prowadzono z zastosowaniem:

- szerokość rozwarcia rys przy pomocy lupy Brinella z 40-krotnym powiększeniem i oraz przy pomocy systemu Aramis;
- ugięcie przy pomocy miary i systemu Aramis;
- odkształcenie przy pomocy zegarów mechanicznych i systemu Aramis;

5.3.2.2. Płyty serii IV, V

W trakcie zwiększania obciążenia płyt betonowych serii IV oraz serii V dokonano następujących obserwacji:

- Ugięcia

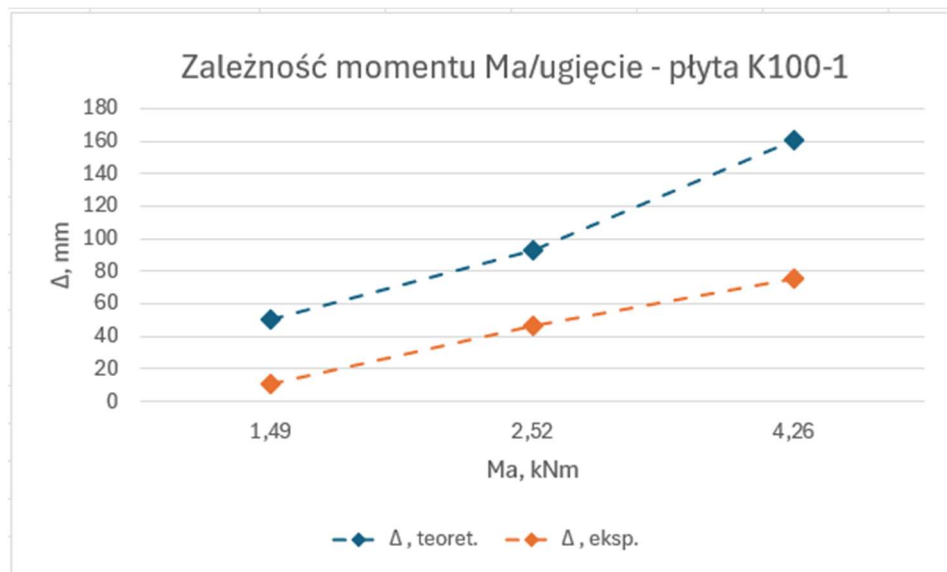
- dokonano szczegółowej weryfikacji rozwoju ugięć w toku obciążania płyt serii IV i V (płyty K100-1 do K100-4), dla których porównano rozwój ugięć z teoretyczną propagacją przeprowadzoną w oparciu o instrukcję [19]. Szczegółowe porównanie przedstawiono w rysunkach 18-21, które dostarczyło następujących obserwacji:

- dla płyty K100-1 ugięcie wyznaczone teoretycznie było ponad dwukrotnie większe, niż faktyczne ugięcie płyty, co jest efektem w szczególności istotnego wpływu na wynik prognozowanych ugięć parametrów takich jak pole przekroju zbrojenia w elemencie (najmniejsze spośród wszystkich płyt grupy IV i V) oraz zlokalizowania zbrojenia w środku wysokości płyty – co istotnie wpływa na istotny dla wyniku parametr d , jak wykazał eksperyment ugięcia były istotnie niższe,

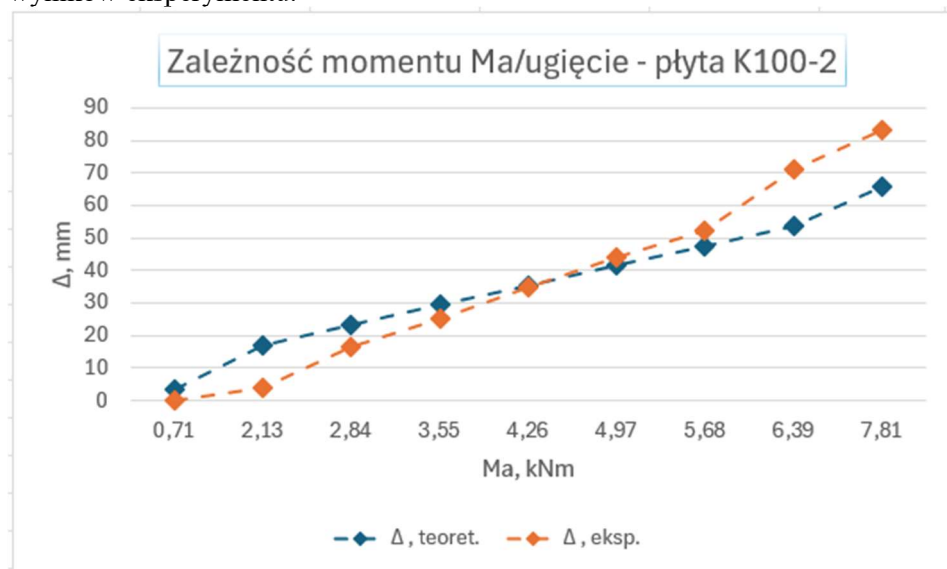
- wszystkie pozostałe analizowane w grupach IV i V płyty (od K100-2 do K100-4) wykazały podobną zależność ugięć wyznaczonych teoretycznie do wartości ugięć oznaczonych w drodze eksperymentu, tj. w początkowej fazie przyrostu obciążenia faktyczne ugięcie przy tożsamym poziomie obciążenia miało mniejsze wartości niż wyznaczone teoretycznie, natomiast w miarę wzrostu obciążenia wartość ugięcia wyznaczonego eksperymentalnie była większa niż wyznaczonego teoretycznie,

- wszystkie analizowane w grupach IV i V płyty (od K100-1 do K100-4), wykazały, że ugięcia przyjętego jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$, wystąpiło w trakcie obciążania przy większej wartości obciążenia, niż wskazywał na to model teoretyczny,

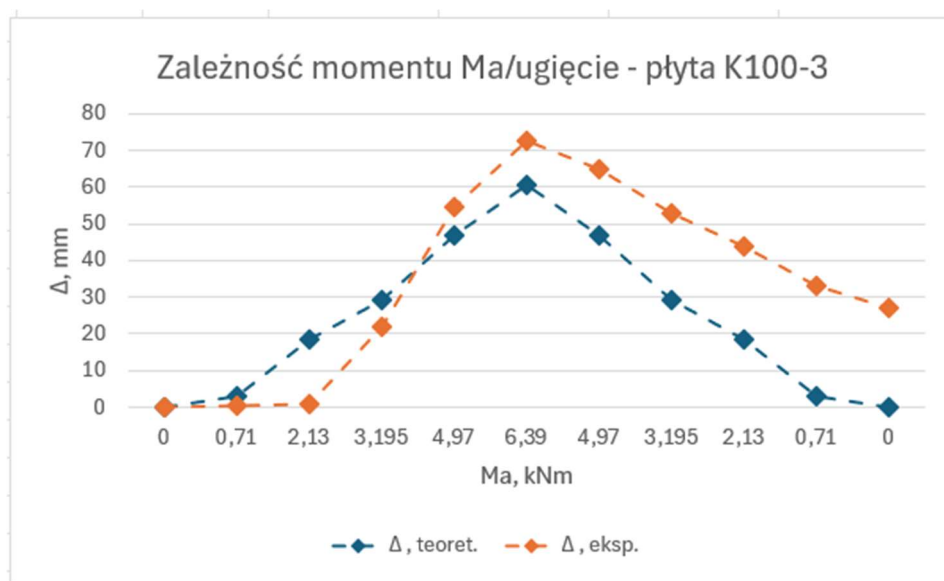
- płyta K100-3 została stopniowo odciążona, istotnie redukując ugięcie, mimo to po odciążeniu do poziomu $M_a=0\text{kNm}$, nadal wykazywała ugięcie na poziomie 27 mm, czego nie wykazał model teoretyczny.



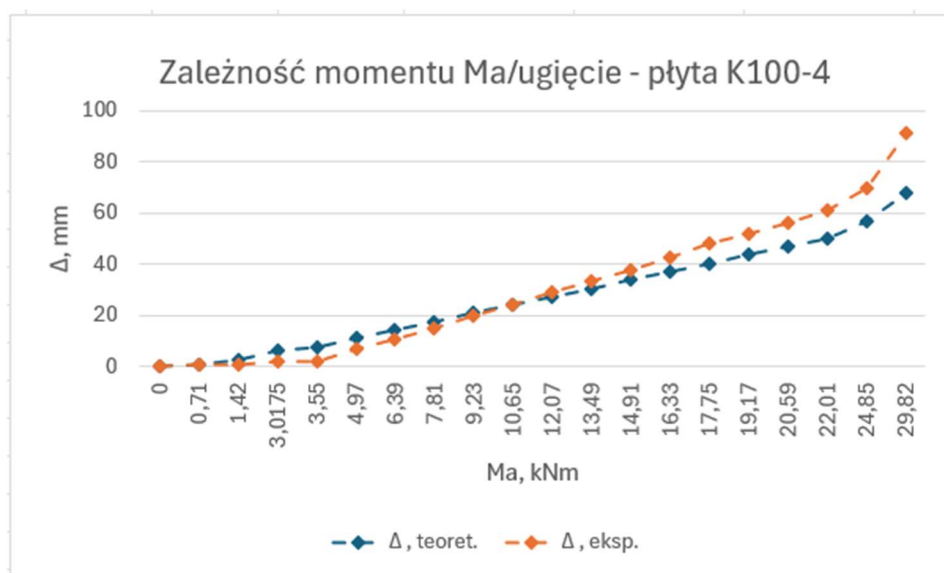
Rys. 18. Porównanie rozwoju ugięć w płycie K100-1 wg analizy teoretycznej i wyników eksperymentu.



Rys. 19. Porównanie rozwoju ugięć w płycie K100-2 wg analizy teoretycznej i wyników eksperymentu.

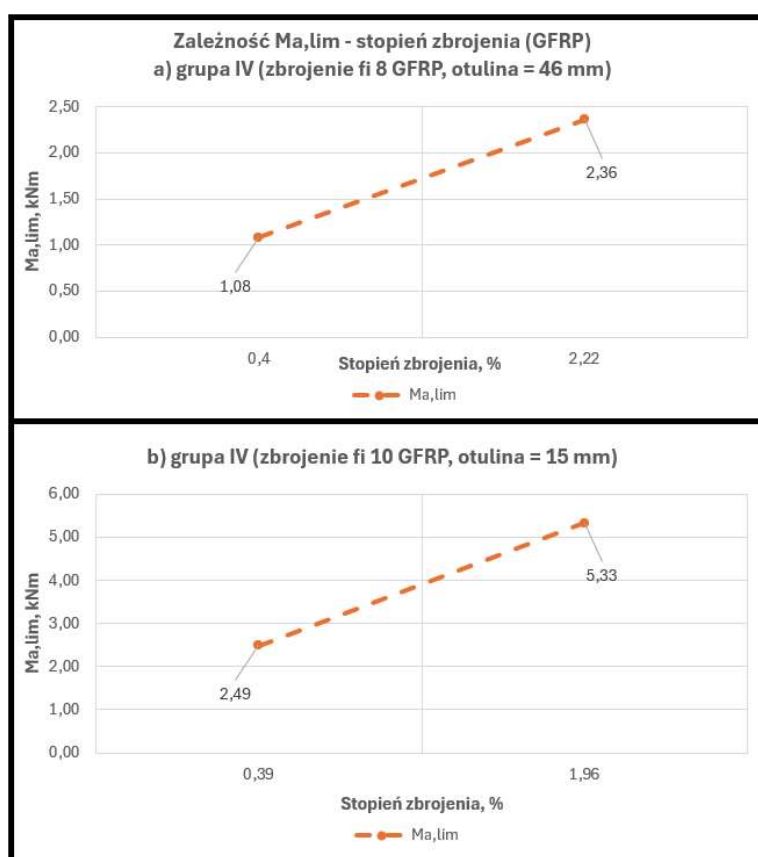


Rys. 20. Porównanie rozwoju ugięć w płycie K100-3 wg analizy teoretycznej i wyników eksperymentu.



Rys. 21. Porównanie rozwoju ugięć w płycie K100-4 wg analizy teoretycznej i wyników eksperymentu.

- analiza momentów zginających wyznaczonych eksperymentalnie dla momentu przyjętego jako graniczny $M_{a,lim}$, powodującego ugięcie na poziomie 8mm wszystkich badanych płyt wykazała wzrost momentu powodującego ugięcie dopuszczalne wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia GFRP w ramach badanej grupy tj. płyt o tej samej otulinie, przy czym zaobserwowano, że większa wysokość efektywna przekroju (w tym przypadku mniejsza otulina) wpływa korzystniej na wartość momentu powodującego ugięcie przyjęte jako graniczne $\Delta=8mm$, przy zbliżonym stopniu zbrojenia. Zależność momentu zginającego powodującego dopuszczalne ugięcie płyty dla wszystkich badanych w grupach IV i V pasm płytowych zobrazowano na rysunku 22, a szczegółowe wyniki w zakresie ugięć dla poszczególnych płyt przedstawiono załączniku 9.



Rys. 22. Zależność momentu zginającego powodującego ugięcie przyjęte jako graniczne $\Delta=8mm$ płyty od stopnia zbrojenia dla płyt grupy IV i V.

Zależność $M_{a,lim}$ do $M_{rd,exp}$						
Grupa	Nr płyty	Stopień zbrojenia (%)	$M_{a,lim}$, teoret. (kNm)	$M_{a,lim}$, exp. (kNm)	$M_{rd,exp}$ (kNm)	$M_{a,lim exp.}/M_{rd,exp}$ (%)
IV	K100-1	0,40	0,54	1,08	4,26*	25,35*
	K100-2	2,22	1,16	2,36	8,31	28,40
V	K100-3	0,39	1,14	2,49	6,39*	38,96*
	K100-4	1,96	3,62	5,33	29,82*	17,87*

*płyta nie uległa zniszczeniu przy
zadanych obciążeniach

Tabela 16. Wartość momentu $M_{a,lim}$ powodującego ugięcie przyjęte jako graniczne o wartości 8mm, momentu niszczącego oraz zależność pomiędzy nimi.

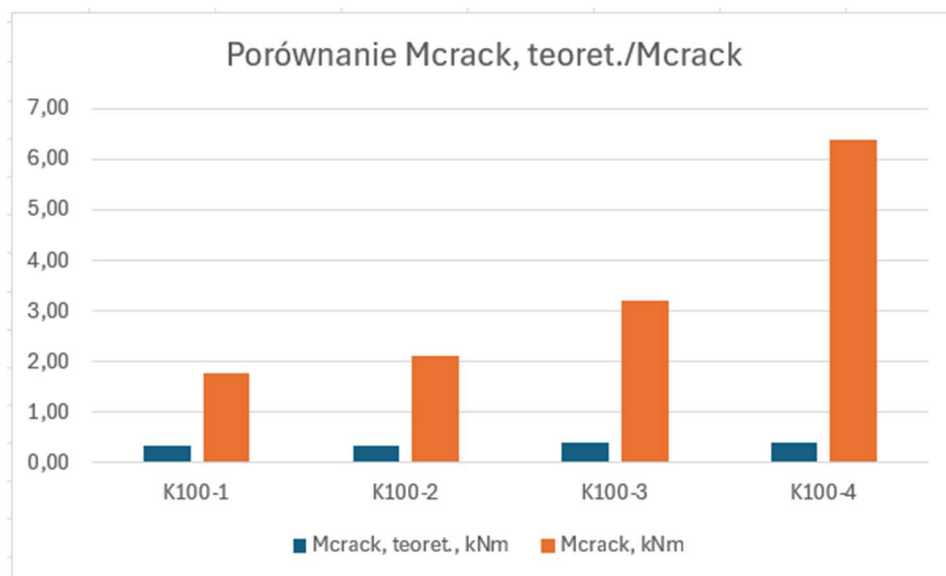
W analizowanych grupach badawczych (IV,V) dla jednej z płyt uzyskano efekt zniszczenia, poprzez zmiężdżenie betonu w strefie ściskanej, a wartość ugięcia przyjętego jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$ stanowiła 28,4% siły niszczącej. W pozostałych przypadkach, pomimo osiągnięcia znacznych ugięć (przekraczających w wszystkich przypadkach około 10 krotnie wartość ugięcia dopuszczalnego), nie doprowadzono do zniszczenia płyty (ani poprzez zmiężdżenie betonu ani zerwanie zbrojenia w strefie ściskanej).

- Zarysowania

- dokonano obserwacji rozwoju zarysowań, dla płyt grupy IV i V – wyniki szczegółowe zestawiono w załączniku nr 9, tabeli 17 oraz rysunku 23 poniżej:

Tabela 17. Porównanie tabelaryczne wartości momentu powodującego zarysowanie płyty – wartość teoretycznie obliczona do wartości faktycznie uzyskanej dla płyt zbrojonych GFRP.

Porównanie M_{crack} , teoret./ M_{crack}			
Płyta nr	Zbrojenie	M_{crack} , teoret., kNm	M_{crack} , kNm
K100-1	2 ϕ 8 GFRP	0,33	1,78
K100-2	11 ϕ 8 GFRP	0,33	2,13
K100-3	2 ϕ 10 GFRP	0,41	3,2
K100-4	10 ϕ 10 GFRP	0,41	6,39



Rys. 23. Porównanie wartości momentu powodującego zarysowanie płyty – wartość teoretycznie obliczona do wartości faktycznie uzyskanej dla płyt zbrojonych GFRP.

- dla każdej z płyt z grup IV i V możliwe do zaobserwowania i zmierzenia rysy, wystąpiły przy znacznie wyższym poziomie obciążenia niż wyznaczony teoretycznie, zauważyć jednak należy, że rozwój mikrorys nastąpił wcześniej, niż odnotowano wystąpienie zasadniczych zarysowań,

- zniszczenie przekroju poprzedzone było wzrostem rozwarcia rys, a samo zniszczenie betonu nastąpiło w przekroju nad rysami,

- w miarę zwiększania obciążenia płyt, zaobserwowano znaczne zarysowania, którym towarzyszył wzrost ugięć, co zgodnie z literaturą jest charakterystyczne dla przekrojów zginanych z zastosowaniem zbrojenia FRP,

Dodatkowo dla płyty K100-3, przeprowadzono stopniowe odciążanie i zaobserwowano, że po całkowitym odciążeniu płyty, rozwarcie rys zmniejszyło się znacząco, co zobrazowano na wykresie na rysunku 36 w załączniku 9.

5.3.3.3. Płyty serii VI

Płyty serii VI wykonano jako zbrojone 6 prętami ϕ 8 GFRP (zbrojenie tożsame dla płyt K100-5 i K100-6), zróżnicowane mieszanką betonową dla płyt K100-5 zastosowano beton zwykły (analogicznie do płyt grupy IV i V), a płyta K100-6 została zaprojektowana z zastosowaniem betonu specjalnego – wysokiej wytrzymałości. Płyta K100-6 została zaprojektowana w sposób, mający na celu

spowodowanie znaczącej redukcji występowania w trakcie obciążania płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP niekorzystnych zjawisk tj. występowania znaczących ugięć oraz dużego rozwarcia rys, które zgodnie z literaturą oraz przeprowadzonymi badaniami płyt serii IV i V charakteryzują pracę elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia FRP pod obciążeniem zginającym. W trakcie projektowania płyty K100-6 zastosowano następujące rozwiązania:

- zastosowano beton specjalny wysokiej wytrzymałości (uzyskano wyniki badań wytrzymałościowych betonu na próbkach sześciennych powyżej 100 MPa),
- zastosowano zbrojenie rozproszone - domieszkę włókien LPPF (niezależnie od zbrojenia kompozytowego FRP).

Przemieszczenia płyty w kierunku osi X (ugięcia – zgodnie z ustawieniem kamery oś X była osią pionową) poddano szczegółowej analizie w zakresie ich rozwoju w toku obciążania oraz obserwowano towarzyszące im powstawanie rys z wykorzystaniem szybkiej kamery.

Przemieszczenia i odkształcenia analizowano określając każdorazowo jako punkt odniesienia płaszczyznę zlokalizowaną w następujących częściach płyty:

- górna płaszczyzna płyty,
- punkty środkowe (płaszczyzna zlokalizowana w osi płyty),
- dolna płaszczyzna płyty.

Obserwacja przemieszczeń w kierunku osi X (ugięć) dostarczyła następujących wyników:

- górna płaszczyzna płyty – największe zmierzone przemieszczenie wyniosło 3 mm i zostało zarejestrowane w punkcie 5,
- punkty środkowe - największe zmierzone przemieszczenie wyniosło 5.5 mm w punkcie 102 .,
- dolna płaszczyzna płyty - Największe przemieszczenie wyniosło 8.5 mm w punkcie 15 i było najwyższe w porównaniu do górnej i środkowej płaszczyzny.

Szczegółowe wyniki obserwacji przemieszczeń przedstawiono w załączniku nr 10, obraz zarejestrowany przy pomocy szybkiej kamery przedstawiono na rysunku nr 49, zależność przemieszczenie-obciążenie ilustruje rysunek nr 50.

Obserwacja pracy płyt grupy VI dostarczyła następujących wyników:

- płyta K100-6 w porównaniu do tożsamo zbrojonej płyty K100-5 wykazała znacznie mniejsze ugięcia. Płyta K100-5 wykazała ugięcie przyjęte jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$ przy wartości momentu zginającego $M_{a,\text{lim}}=3,46\text{ kNm}$,

podczas gdy płyta K100-6 wykazała największy odczyt ugięcia zmierzony w dolnej płaszczyźnie płyty, przy czym odpowiadający ugięciu przyjętemu jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$ moment zginający $M_{a,\text{lim}}$ wynosił 8,55 kNm, zatem płyta K100-6 w skutek aplikacji włókien i zastosowania wyższej klasy betonu, wykazała prawie dwukrotnie większy moment $M_{a,\text{lim}}$ niż płyta K100-5 o tradycyjnej recepturze,

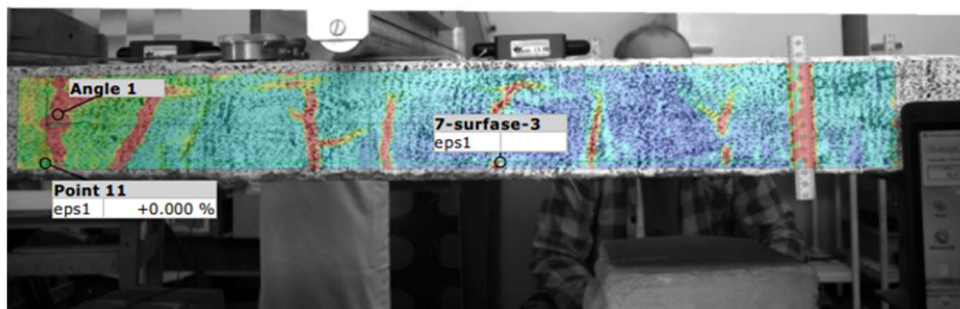
- długie włókna polipropylenowe przyczyniły się do zwiększenia ciągliwości materiału, zastosowane włókna znacząco poprawiły właściwości plastyczne płyty K100-6,

- obserwacje dotyczące rys dla płyty K100-6 serii VI (z domieszką włókien) i wykazały, że, powstałe rysy były prostopadłe. Dodatkowo stwierdzono, że długie włókna polipropylenowe pełniły rolę mostków, łącząc krawędzie rys. Powstające zarysowania miały stosunkowo łagodny charakter, odmiennie do płyty K100-5, w której model rozwoju zarysowań był zbliżony do płyt serii VI i V – tj. rysy miały charakter głównie pionowy a ich rozwój był gwałtowny,

- płyta K100-5 uległa zniszczeniu przy wartości momentu 6,04 kNm, podczas gdy płyta K100-6 przy wartości momentu 8,55 kNm wykazała dopiero ugięcie przyjęte jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$, co wskazują na znaczącą poprawę parametrów wytrzymałościowych płyty w skutek aplikacji mieszanki betonowej wysokiej wytrzymałości z domieszką włókien.



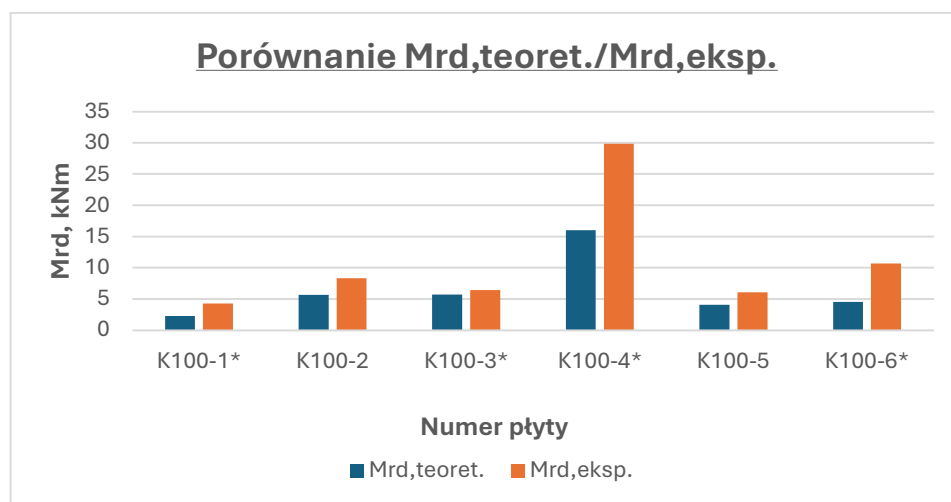
Rys. 24. Obraz zarysowań w płycie K 100-5.



Rys. 25. Obraz zarysowań w płycie K 100-6 z zastosowaniem szybkiej kamery.

5.3.4. Porównanie wyników obliczeń nośności z wynikami eksperymentu – płyty serii IV-VI

Uzyskane wyniki eksperymentu (zgodnie z wynikami szczegółowymi zestawionymi w załączniku nr 9) porównano z wynikami analizy teoretycznej (ujętych w tabeli 13 w sekcji 4.4.2.) i stwierdzono, że we wszystkich przypadkach, w których w skutek obciążenia doprowadzono do zniszczenia płyt, wartości eksperymentalne były większe od wyznaczonych teoretycznie o wartości w przedziale od 45 do 50%. Powyższe powodowane jest przede wszystkim dobrą współpracą zbrojenia z betonem oraz zapasem bezpieczeństwa ujętego w procedurze obliczeniowej. Porównanie wyników ujęto w rys. 26.



Rys. 26. Porównanie wyników teoretycznych i eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych kompozytem GFRP poddanych badaniom (płyty oznaczone gwiazdką nie uległy zniszczeniu przy wskazanym obciążeniu).

5.4. PŁYTY BETONOWE Z ZASTOSOWANIEM ZBROJENIA B600B – PŁYTY SERII I-III

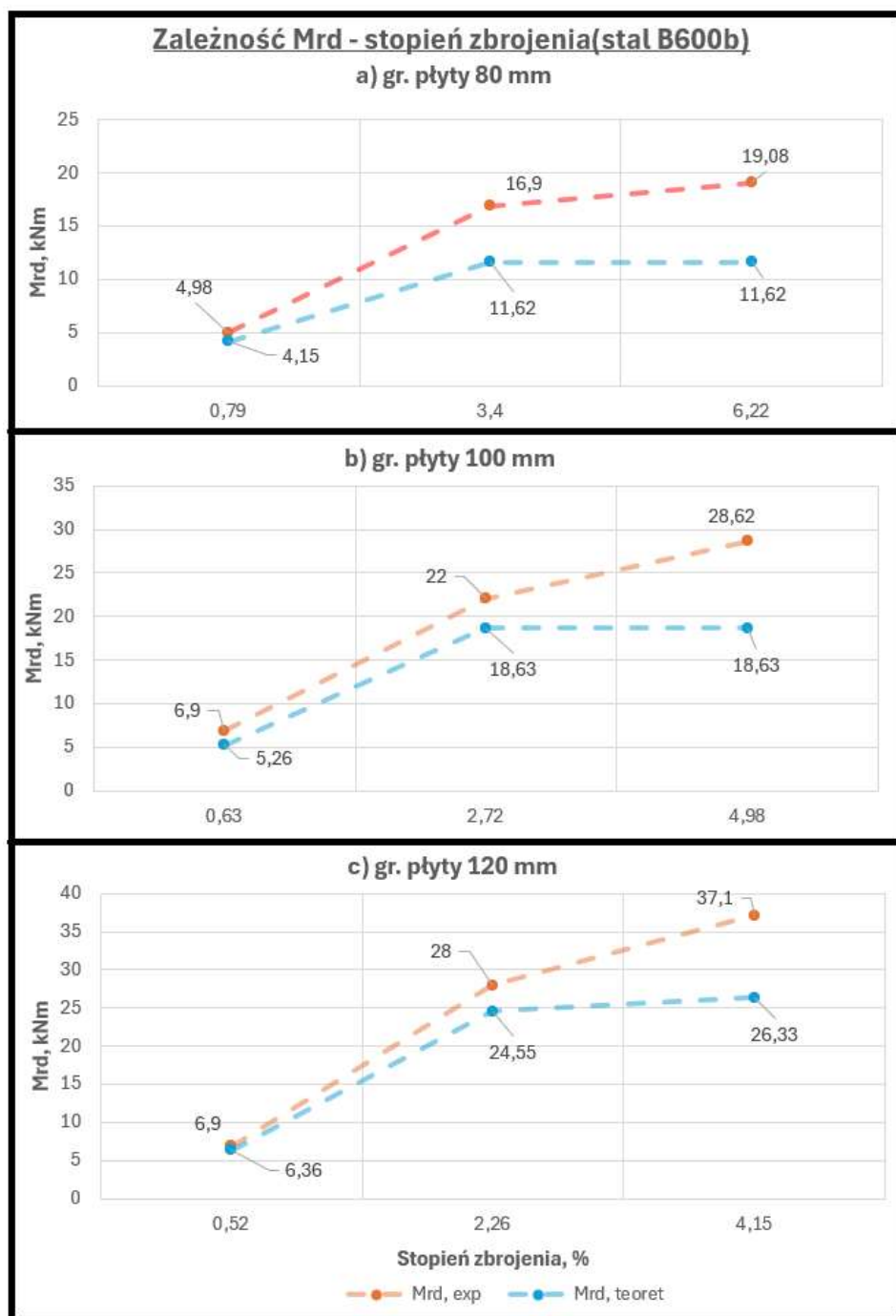
5.4.1. Charakter zniszczenia i nośność płyt – płyty serii I-III

Element (płyta betonowa) został obciążony dwiema siłami poprzecznymi, których rozstaw wynosi 580 mm, aby utworzyć strefę stałego momentu zginającego w środkowej części pasma, które obciążano równomiernie aż do zniszczenia przekroju.

Płyty o małym stopniu zbrojenia (2 pręty) wykazały osiągnięcie granicy plastyczności przez zbrojenie B600B oraz w konsekwencji wystąpieniem łagodnego modelu zniszczenia w strefie ściskanej (załącznik nr 8).

Płyty o dużym stopniu zbrojenia (11 prętów) wykazały gwałtowne zniszczenie poprzez zmiżdżenie betonu oraz brak osiągnięcia granicy plastyczności przez zbrojenie. (załącznik 8).

Zależność nośności płyt od stopnia zbrojenia i grubości płyt przedstawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Zależność nośności płyt od grubości i stopnia zbrojenia.

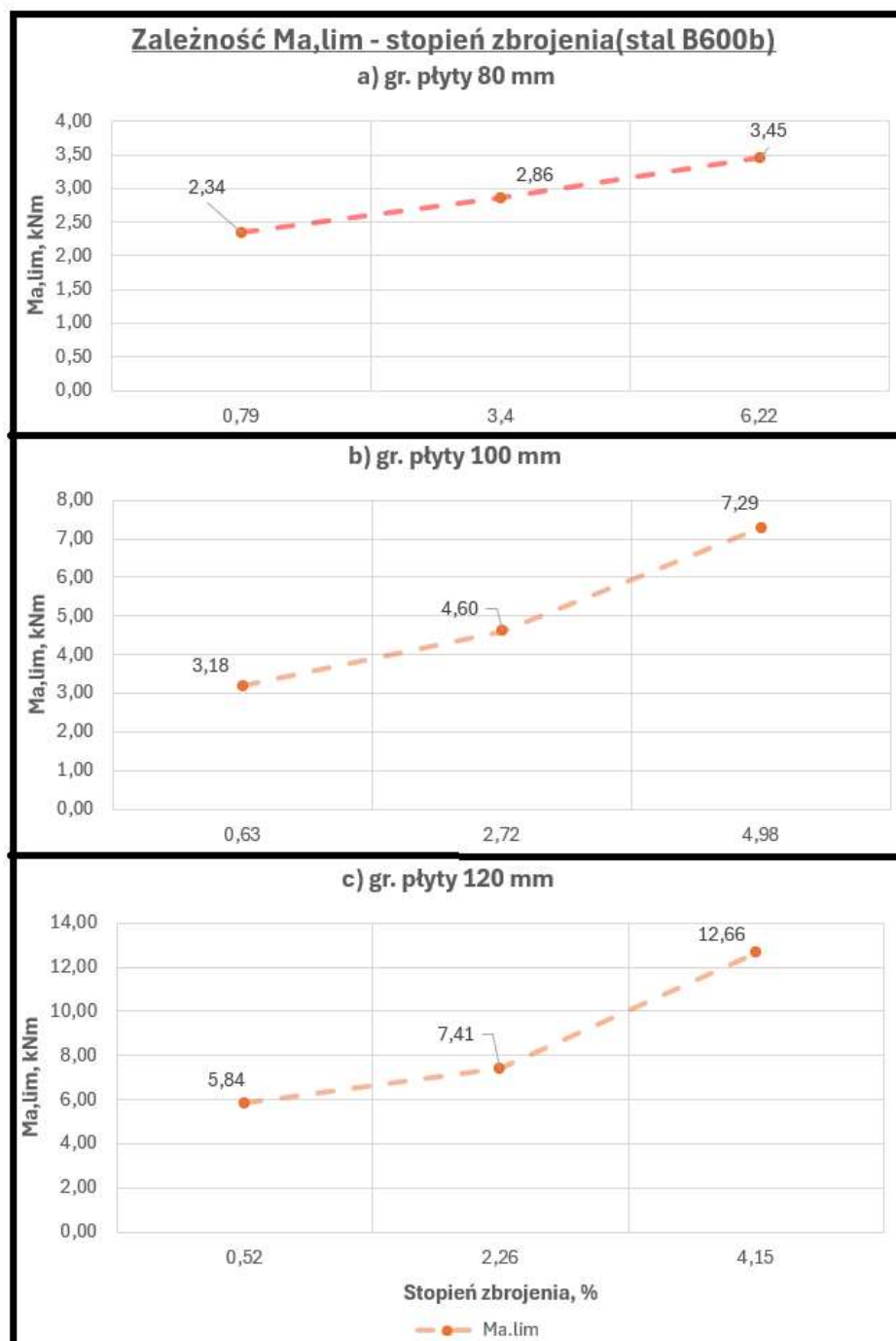
5.4.2. Ugięcia płyt – płyty serii I-III

Analiza momentów zginających przy maksymalnym dopuszczalnym ugięciu ($L/250=2000/250=8$ mm) wszystkich badanych płyt wykazała wzrost momentu powodującego ugięcie dopuszczalne wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia B600B. Zależność momentu zginającego powodującego dopuszczalne ugięcie płyty dla wszystkich badanych pasm płytowych zobrazowano na rysunku 27, a szczegółowe wyniki w zakresie ugięć dla poszczególnych płyt przedstawiono w załączniku nr 8.

W każdej z grup badawczych (I, II, III) stosunek wartości momentu zginającego powodującego ugięcie maksymalne do maksymalnego momentu zginającego powodującego zniszczenie płyty był najwyższy dla płyt o najniższym stopniu zbrojenia (stopień zbrojenia $< 1\%$). Przedmiotową zależność dla wszystkich badanych pasm płytowych zestawiono w tabeli 18.

Tabela 18. Zależność momentu zginającego przy maksymalnym dopuszczalnym ugięciu do momentu zginającego powodującego zniszczenie

Zależność $M_{a,lim}$ do $M_{rd,exp}$					
Grupa	Nr płyty	Stopień zbrojenia (%)	$M_{a,lim}$ (kNm)	$M_{rd,exp}$ (kNm)	$M_{a,lim}/M_{rd,exp}$ (%)
I	S80-1	0,79	2,34	4,98	47,00
	S80-2	3,40	2,86	16,90	16,92
	S80-3	6,22	3,45	19,08	18,08
II	S100-1	0,63	3,18	6,90	46,09
	S100-2	2,72	4,60	22,00	20,91
	S100-3	4,98	7,29	28,62	25,47
III	S120-1	0,52	5,84	6,90	84,64
	S120-2	2,26	7,41	28,00	26,46
	S120-3	4,15	12,66	37,10	34,11



Rys. 28. Zależność momentu zginającego powodującego maksymalne ugięcie płyty do stopnia zbrojenia.

5.4.3. Zarysowania płyt – płyty serii I-III

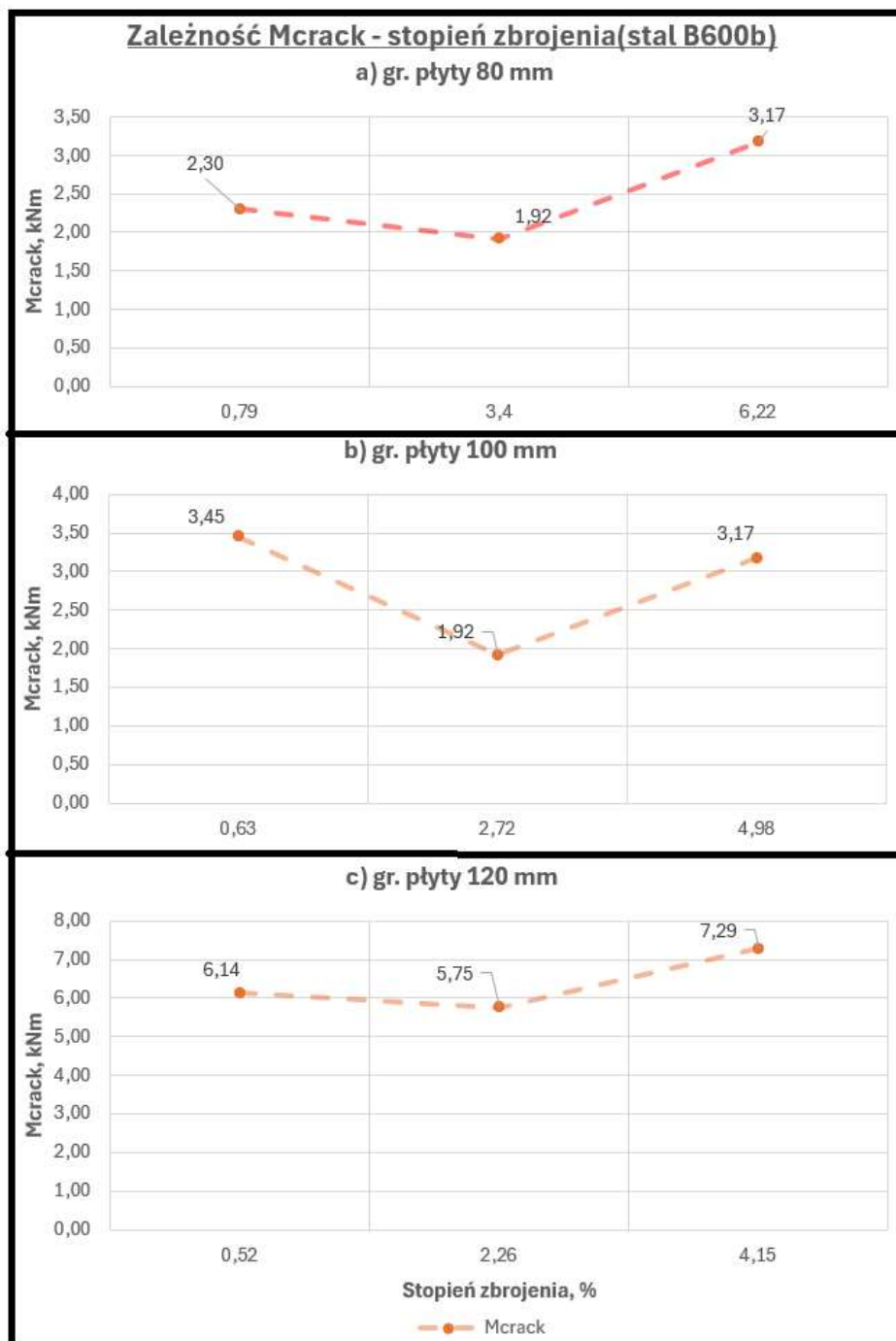
Dla płyt zbrojonych stalą B600B monitorowano model rozwoju rys jak i wartość momentów przy których powstawały. Płyty o stopniu zbrojenia <1% wykazywały rozstaw rys w przedziale 15-18 cm, natomiast pozostałe od 7 do 12 cm.

W każdej z grup badawczych (I, II, III) stosunek wartości momentu zginającego powodującego powstawanie rys do maksymalnego momentu zginającego powodującego zniszczenie płyty był najwyższy dla płyt o najniższym stopniu zbrojenia (stopień zbrojenia < 1%). Przedmiotową zależność dla wszystkich badanych pasm płytowych zestawiono w tabeli 19.

Tabela 19. Zależność momentu zginającego powodującego zarysowanie do momentu zginającego powodującego zniszczenie.

Zależność momentu zginającego powodującego powstawanie rys do momentu zginającego powodującego zniszczenie					
Grupa	Nr płyty	Stopień zbrojenia (%)	M _{crack} (kNm)	M _{rd,exp} (kNm)	M _{a,lim} /M _{rd,exp} (%)
I	S80-1	0,79	2,30	4,98	46,20
	S80-2	3,40	1,92	16,90	11,35
	S80-3	6,22	3,17	19,08	16,62
II	S100-1	0,63	3,45	6,90	50,02
	S100-2	2,72	1,92	22,00	8,72
	S100-3	4,98	3,17	28,62	11,08
III	S120-1	0,52	6,14	6,90	88,93
	S120-2	2,26	5,75	28,00	20,54
	S120-3	4,15	7,29	37,10	19,64

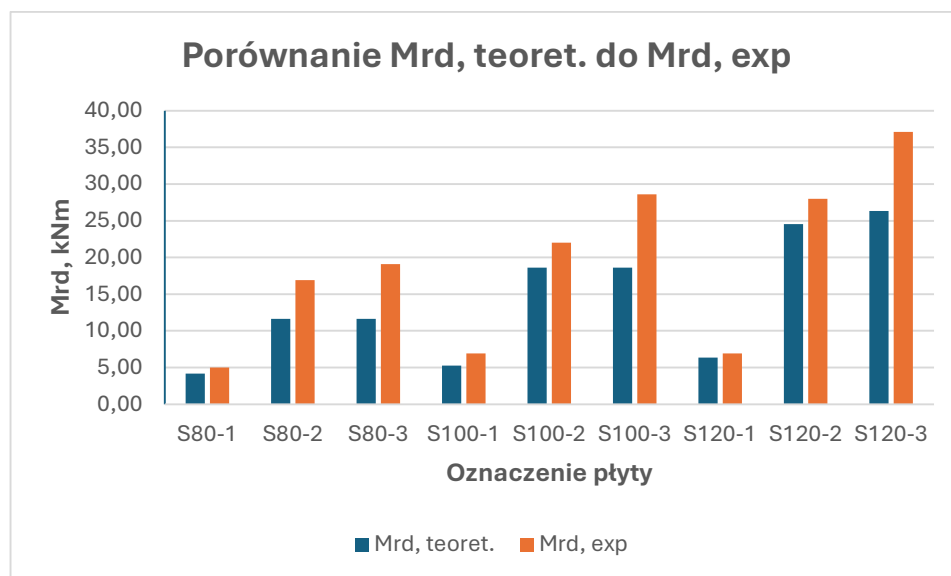
Zależność momentu zginającego powodującego powstawanie rys dla wszystkich badanych pasm płytowych zobrazowano na rysunku 20, a szczegółowe wyniki w zakresie ugięć dla poszczególnych płyt przedstawiono w załączniku nr 8.



Rys. 29. Zależność momentu zginającego powodującego zarysowanie płyty do stopnia zbrojenia.

5.4.4. Porównanie wyników obliczeń nośności z wynikami eksperymentu – płyty serii I-III

Uzyskane wyniki eksperymentu (zgodnie z wynikami szczegółowymi zestawionymi w załączniku nr 8) porównano z wynikami analizy teoretycznej (ujętymi w sekcji 4.3.2.) i stwierdzono, że we wszystkich przypadkach wartości eksperymentalne były większe od wyznaczonych teoretycznie. Powyższe powodowane jest przede wszystkim dobrą współpracą stali z betonem oraz zapasem bezpieczeństwa ujętego w procedurze obliczeniowej. Porównanie wyników ujęto w rys. 30.



Rys. 30. Porównanie wyników teoretycznych i eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom

5.4.5. Praca płyt betonowych z zastosowaniem stali B600B pod obciążeniem dynamicznym.

5.4.5.1. Charakterystyka płyty

Dla celu szczegółowej obserwacji odpowiedzi pasma płytowego na obciążenie dynamiczne i porównanie tej odpowiedzi z pracą pod obciążeniem statycznym, wykonano dodatkową pełnowymiarową próbkę płyty oznaczoną jako S100-4. Płytę wykonano jako tożsamą wymiarowo z pozostałymi płytami grup I, II i III, z zastosowaniem tej samej mieszanki betonowej jak dla pozostałych płyt zbrojonych stalą B600B. dla płyty zastosowano mniejszą otulinę (15mm) aby poprawić parametry nośności, co umożliwiło dłuższą obserwację pracy płyty przy wyższych obciążeniach. W ramach niniejszego badania, nie zakłada się zniszczenia płyty.

Parametry płyty:

Nazwa: S100-4

Wymiary: 2000x500 mm

Grubość: 100 mm

Otulina: 15 mm

Zbrojenie główne: 6 fi 12 B600 B

Wytrzymałość na ściskanie oznaczona na próbkach sześciennych 15x15x15 cm:

Próbka 1 – wynik 61,06 MPa

Próbka 2 – wynik 60,76 MPa

Siłę niszczącą wyliczona wg normy PN-EN 1992-1-1 dla celu określenia maksymalnego możliwego bezpiecznego obciążenia płyty w eksperymencie F_n 70,3 kN.

Płytę w stanowisku umieszczono na dwóch podporach, umieszczoną w sposób wolno-podparty i poddano badaniom niszczącym z zastosowaniem prasy ENERPAC P392 o zakresie wytrzymałości do 320 kN . Płytę w stanowisku umieszczono na dwóch podporach, w sposób wolnopodparty. Schemat stanowiska i sposób przyłożenia obciążenia analogiczny do schematu przedstawionego w rysunku 9.

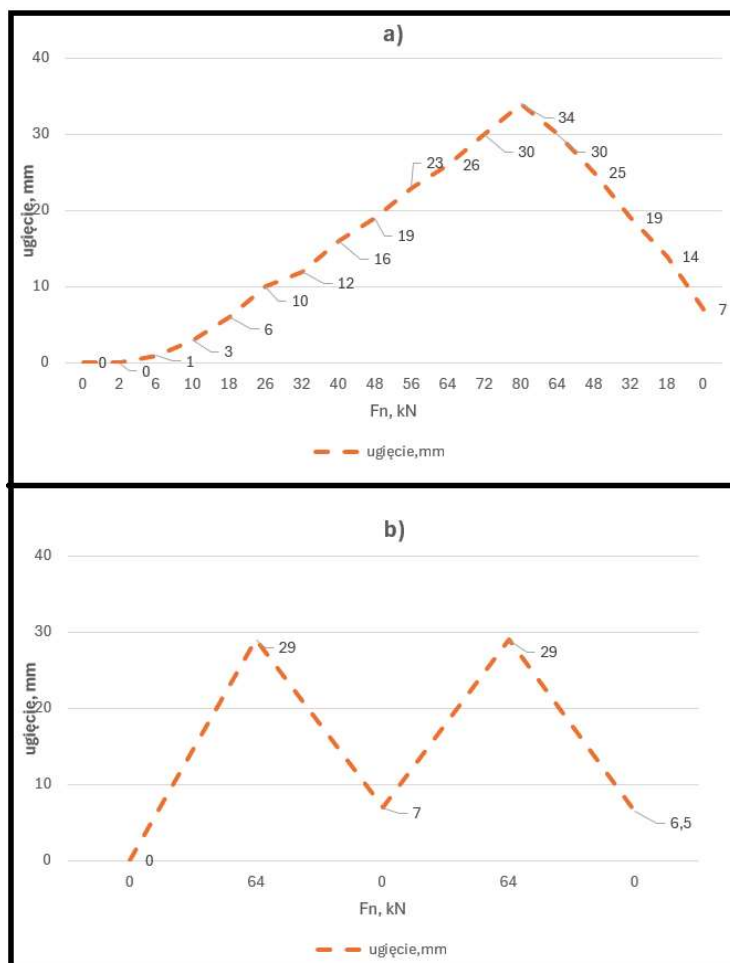
5.4.5.2. Ugięcia i zarysowania

W ramach badania, zrealizowano obciążenie płyty S100-4 siłą poprzeczną statyczną a następnie zmieniającą się w czasie, w dwóch wariantach obserwując ugięcia, rysy (wyniki ujęto w rys. 31).

1/ w wariancie obciążenia statycznego w początkowej fazie zwiększając obciążenie co 4 kN, kolejno co 8 kN, aż do osiągnięcia wartości siły 80 kN (ok 115% nośności wyliczonej teoretycznie) kolejno odciążając,

2/ w wariancie obciążenia dynamicznego – przykładając w jednym kroku obciążenie 64 kN, odciążając do 0 kN oraz kolejno powtarzając sekwencję (tj. ponownie przykładając obciążenie 64 kN i odciążając do 0 kN). Każdy z kroków – obciążenie lub odciążenie trwał około 2 minut.

3/ w wariancie obciążenia impulsowego – zgodnie z szczegółowym opisem w punkcie 5.4.5.3. rozprawy, w celu zdiagnozowania zmiany charakterystyki częstotliwościowej płyty.



Rys. 31. Wykres ugięć płyty S100-4 w modelu pracy a) pod obciążeniem statycznym, b) pod obciążeniem dynamicznym.

W trakcie przeprowadzonej próby, dokonano następujących obserwacji:

W wariancie 2 obciążenia, pomimo obciążenia płyty S100-4 w wariancie 1 (próba startyczna) siłą o wartości około 115% nośności wyliczonej teoretycznie nie zaobserwowano zniszczenia płyty, po raz kolejny potwierdzając bardzo dobrą współpracę stali B600B z betonem i znaczące zapasy nośności w stosunku do dostępnych procedur obliczeniowych, a maksymalne ugięcie przy obciążeniu płyty S100-4 wyniosło 34 mm, przekraczając ponad 4 krotnie maksymalne dopuszczalne ugięcie ($L/250=8\text{mm}$),

Stwierdzono, że zastosowanie mniejszej otuliny (15 mm w stosunku do 45 mm) w stosunku do płyty o tożsamej geometrii i zbrojeniu S 100-2 korzystnie wpłynęło na nośność płyty, dla której siła powodująca zniszczenie stanowiła około 60% obciążenia przyłożonego do płyty S100-4,

W wariancie 2 obciążenie przyłożone w sposób dynamiczny, spowodowało ugięcie większe o około 10% przy maksymalnej sile 64 kN, w stosunku do wartości ugięcia wyznaczonego w wariancie obciążenia 1 do maksymalnej siły 64 kN.

Po powtórzeniu cyklu w wariancie 2, wartość ugięcia była taka sama jak w pierwszym cyklu obciążenia,

Zarówno w przypadku obciążenia płyty w sposób dynamiczny jak i statyczny, maksymalna wartość ugięcia płyty po odciążeniu zmniejszyła się do 7 mm, przy obciążeniu w wariancie 1, co stanowiło mniej niż wartość maksymalnego ugięcia przy obciążeniu w wariancie 2.

Wartość rozwarcia rys w wariancie 2 obciążenia, po obu cyklach obciążenia wyniosła po maksymalnym obciążeniu 0,2 mm, która to wartość odpowiadała szerokości rozwarcia rys przy obciążeniu statycznym. Zarówno przy obciążeniu płyty w modelu pracy statycznej jak i dynamicznej, po odciążeniu płyty rysy zamknęły się.



Rys. 32. Płyta S 100-4 w trakcie badania.

5.4.5.3. Obserwacja odpowiedzi dynamicznej płyty S100-4 pod obciążeniem impulsowym

Celem pogłębienia analizy odpowiedzi płyty na obciążenie dynamiczne, wykonano dodatkowy eksperyment, polegający na obserwacji odpowiedzi dynamicznej płyty S100-4 pod obciążeniem impulsowym. Przeprowadzony eksperyment opierał się na eksperymentalnej analizie modalnej (EMA), która pozwala na skuteczną symulację i weryfikację odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Niniejsza metodologia pozwala uzyskać takie dane jak częstotliwości naturalne, współczynniki tłumienia. Metoda pozwala również w szerszym kontekście na monitorowanie stanu technicznego budowli (Structural health monitoring)

W badaniu zastosowano wymuszenie impulsowe, z wykorzystaniem młotka modalnego model PCB 086D20 o masie 1,1 kg posiadający zintegrowany czujnik siły (będący jednym z większych młotków dostępnych na rynku przeznaczonym do testowania średnich lub dużych elementów konstrukcji).

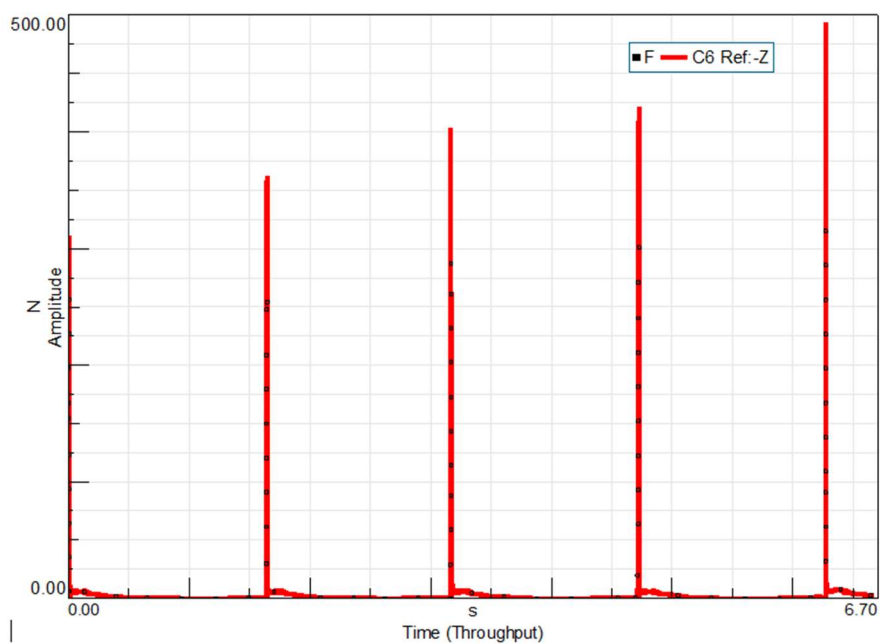
Odpowiedź dynamiczną płyty S100-4 monitorowano za pomocą akcelerometru 3187D (niskich częstotliwości), a zapis danych prowadzono przy pomocy systemu akwizycji danych Siemens LMS SCADAS Testlab.

Zrealizowane badanie dostarczyło następujących wniosków:

- zapis siły z młotka zdefiniował pięć impulsów, o kolejno większej wartości działającej siły w stosunku do poprzedniego,
- zarysowanie płyty powoduje spadek sztywności i spadek częstotliwości rezonansowej, w przypadku analizowanej płyty :
 - 1' częstotliwość rezonansowa zmieniła się z 40,02 na 20,22 Hz
 - 2' częstotliwość rezonansowa zmieniła się z 120,48 na 59,82 Hz
 - 3' częstotliwość rezonansowa zmieniła się z 180,30 na 120,48 Hz
- współczynnik tłumienia krytycznego po zarysowaniu wzrósł – przed zarysowaniem płyty wynosił 0,7%, po zarysowaniu 2,0%.

Szczegółowe dane zaprezentowano: zapis siły z młotka w rysunku nr 33, szczegółowy zapis przykładanego impulsu rozwoju siły w czasie dla pierwszego impulsu w rysunku nr 35, odpowiedź dynamiczną płyty w czasie w rysunku 36

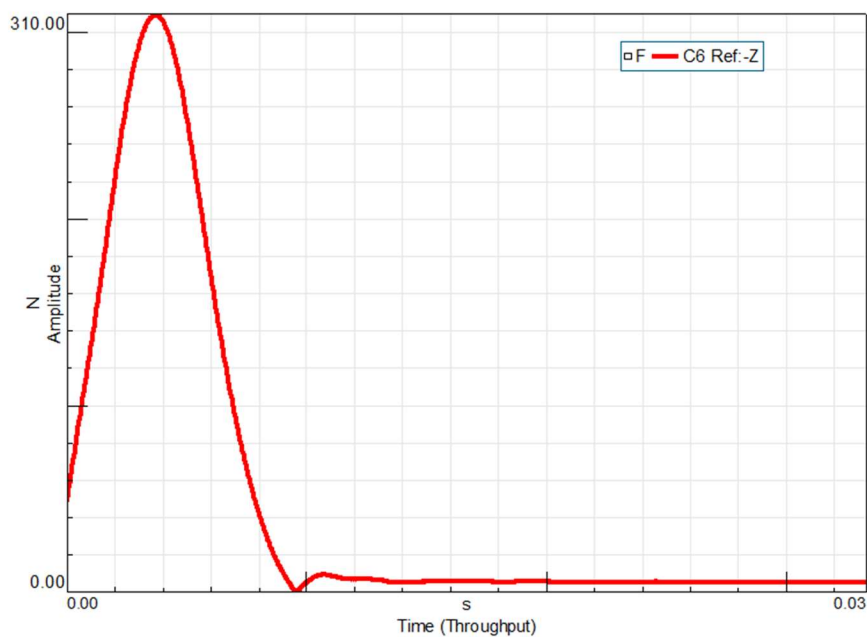
(pomiar przeprowadzono w środku rozpiętości płyty pod obciążeniem impulsowym).



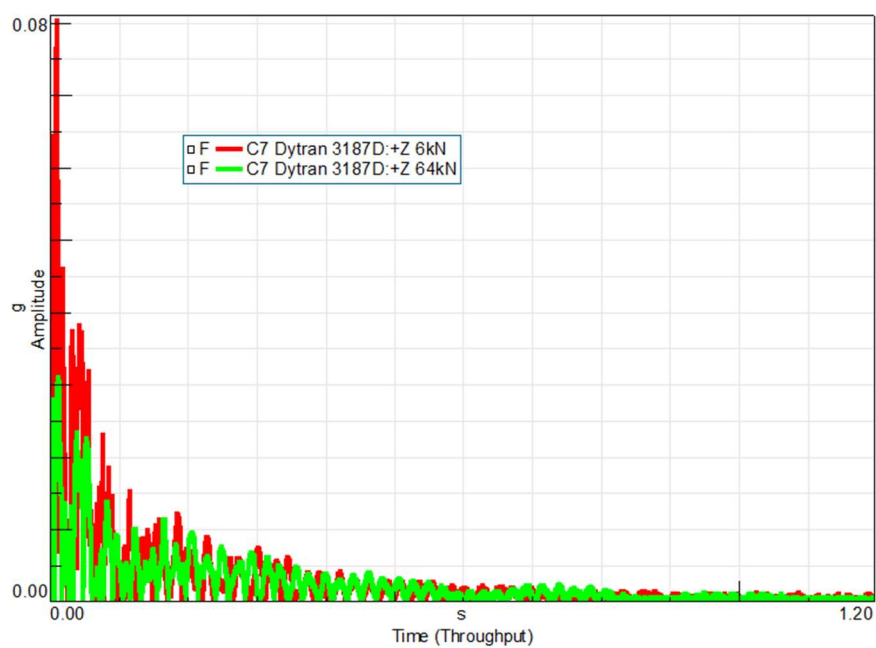
Rys. 33. Zapis siły w czasie podczas wymuszenia impulsowego z zastosowaniem młotka modalnego.



Rys. 34. Model młotka modalnego zastosowany w eksperymencie.



Rys. 35. Zapis siły w czasie podczas wymuszenia impulsowego z zastosowaniem młotka modalnego – detal pierwszego impulsu.



Rys. 36. Zapis siły odpowiedzi dynamicznej płyty na obciążenie impulsowe.

Przeprowadzenie analizy częstotliwościowej umożliwiło wyznaczenie zmian podstawowych częstotliwości rezonansowych. W przypadku płyty zarysowanej spadek sztywności spowodował zmniejszenie wartości częstotliwości rezonansowej, przy jednoczesnym wzroście tłumienia. Współczynnik tłumienia krytycznego dla płyty zarysowanej zwiększa się w miarę rozwoju rys, poprzez zwiększone rozpraszanie energii, w szczególności efekty tarcia w mikroszczelinach.

6. DYSKUSJA

Niniejszy rozdział stanowi pogłębienie analizy i interpretację wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych z zastosowaniem elementów betonowych (płyt) zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B oraz kompozytem GFRP, w odniesieniu do postawionej hipotezy badawczej (rozdział 3) oraz aktualnego stanu wiedzy, ujętego w analizie literatury przedmiotu (rozdział 2).

6.1. KONFRONTACJA WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH Z ANALIZAMI TEORETYCZNYMI

Przeprowadzone badania niszczące wykazały, że nośność eksperymentalna płyt betonowych z zastosowaniem stali wysokiej wytrzymałości B600B dla wszystkich badanych płyt o różnym stopniu zbrojenia każdorazowo przekraczała maksymalne wartości momentów niszczących wyznaczonych w toku analizy teoretycznej na podstawie normy PN-EN 1992-1-1, stwierdzono również, że w każdej z grup badawczych (płyty grupy I, II i III) nośność płyt rosła wraz z wzrostem stopnia zbrojenia.

Ponadto, w toku przeprowadzonych badań wytrzymałościowych (próby rozciągania) parametry wytrzymałościowe materiału zbrojeniowego - stali B600B (granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie) również okazały się wyższe niż deklarowane przez producenta, które to wyniki zaimplementowano do obliczeń teoretycznych.

Największe zapasy nośności wykazały mocno zbrojone przekroje, o stopniu zbrojenia wyższym niż 4%, dla których to przekrojów wyznaczone eksperymentalnie wartości momentów niszczących (w odniesieniu do obliczeń sporządzonych na bazie parametrów wytrzymałościowych stali wyznaczonych eksperymentalnie) były od 40 do 65% wyższe, niż wyznaczone w oparciu o dostępną procedurę obliczeniową.

Znaczne zapasy nośności wykazały również przekroje słabo zbrojone o stopniu zbrojenia niższym niż 1% dla których to przekrojów wyznaczone eksperymentalnie wartości momentów niszczących (w odniesieniu do obliczeń sporządzonych na bazie parametrów wytrzymałościowych stali wyznaczonych eksperymentalnie) były w dwóch przypadkach (płyt grubości 80 i 100 mm) o 20-30% wyższe, niż wyznaczone w oparciu o dostępną procedurę obliczeniową, a w przypadku płyty o grubości 120 mm wyższe o około 8%. Uzyskane wyniki w szczególności dla płyt o mniejszej grubości (80 i 100mm) dowodzą bardzo dobrych parametrów wytrzymałościowych stali B600B, dobrej ciągliwości i wysokiej rezerwy plastycznej, ponieważ w tych przypadkach duża rezerwa nośności wynikała z właściwej pracy stali zbrojeniowej w przekroju w trakcie rozciągania, a w przypadku płyty o większej grubości w pierwszej kolejności

nastąpiło skruszenie betonu w strefie ściskanej, co mogło powodować brak możliwości efektywnej pracy stali zbrojeniowej.

Przekroje o umiarkowanym stopniu zbrojenia w grupie badawczej pomiędzy 1% a 4% dla których to przekrojów wyznaczone eksperymentalnie wartości momentów niszczących (w odniesieniu do obliczeń sporządzonych na bazie parametrów wytrzymałościowych stali wyznaczonych eksperymentalnie) wykazały zapas na poziomie 10-20% (w przypadku przekrojów o większej grubości płyty 100 i 120 mm) oraz około 45% dla przekroju o grubości 80 mm, co ponownie dowodzi, że przy mniejszej grubości płyty zachodzą warunki do bardzo dobrej pracy zbrojenia wysokiej wytrzymałości w warunkach rozciągania (płyty o większej grubości wykazały mniejsze zapasy zbrojenia z uwagi na skruszenie betonu w strefie ściskanej). Elementy o stopniu zbrojenia w przedziale pomiędzy 1% a 4% w świetle przeprowadzonych badań należy określić jako przekroje wykazujące potencjał do najbardziej optymalnego wykorzystania możliwości zbrojenia wysokiej wytrzymałości – stali B600B, których modelowanie jest najbardziej ekonomiczne i prowadzi do bezpiecznej i efektywnej współpracy stali z betonem.

Zidentyfikowany zapas bezpieczeństwa w obliczeniach teoretycznych dla stali B600B (w szczególności dla elementów wysoce oraz słabo zbrojonych), wynikający z konserwatywnego podejścia normowego, potwierdza hipotezę o występujących rezerwach normowych.

Analizie poddano również ugięcia i zarysowania płyt zbrojonych stalą B600B. Wykazano, że moment zginający przy maksymalnym dopuszczalnym ugięciu ($L/250=2000/250=8$ mm) wszystkich badanych płyt rośnie w każdej z grup badawczych (grupy I, II i III) wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia B600B.

Dodatkowo, na podstawie przeprowadzonych badań płyt zbrojonych stalą B600B stwierdzono, że w większości przypadków oznaczona eksperymentalnie wartość momentu zginającego powodującego maksymalne dopuszczalne ugięcie była wyższa od wartości momentu zginającego powodującego zarysowanie, co oznacza, że w większości przypadków w trakcie obciążania przekrój najpierw podlegał zarysowaniu, dopiero później osiągał maksymalne dopuszczalne ugięcie. Wartości ww. momentów o zbliżonych wartościach uzyskano dla płyt o stopniu zbrojenia $<1\%$, co oznacza, że efekt zarysowania i maksymalnego ugięcia wystąpił na zbliżonym etapie obciążenia.

W trakcie obserwacji ugięć i rys pasma płytowe zbrojone stalą B600B poddawano ponownemu obciążeniu i odciążeniu, celem obserwacji rozwoju rys i ugięć. Ww. działanie, pozwoliło zaobserwować, że płyty pracują sprężysto w szerokim zakresie obciążeń – każdorazowo po całkowitym odciążeniu badanego elementu ugięcie zmniejszało się istotnie, a rysy zamykały. Powyższe dowodzi sprężystej

pracy zbrojenia B600B dowodząc, efektywnej współpracy stali z betonem, właściwej pracy w warunkach rozciągania, w tym również w sytuacjach zmieniającego się obciążenia

Wyniki badań laboratoryjnych dla pełnowymiarowych płyt zbrojonych GFRP również potwierdziły zapas nośności - w większości przypadków na poziomie 40-50% w stosunku do analiz teoretycznych wykonanych według [19]. Jest to zgodne z obserwacjami niektórych autorów publikacji przywołanych w przeglądzie literatury, którzy wskazywali, że wytyczne instrukcji [19] są zachowawcze i prowadzą do znaczącego niedoszacowania wytrzymałości elementów betonowych zbrojonych kompozytem.

W trakcie prowadzonych eksperymentów przeanalizowano także, szczegółowo zmianę ugięć płyt w miarę rozwoju obciążenia dla płyt grup IV i V zbrojonych kompozytem GFRP i skonfrontowano z propagacją teoretyczną w oparciu o instrukcję [19], dokonując adaptacji modelu obliczeniowego sformułowanego w [19] dla celu analizy belek, których schemat pracy jest zbliżony. Przeprowadzona analiza wykazała, że w początkowej fazie obciążania wartości wyznaczone teoretycznie prezentowały znaczny zapas bezpieczeństwa w stosunku do faktycznych ugięć, natomiast w późniejszej fazie obciążenia (zwykle po przekroczeniu ugięcia przyjętego jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$) wartości ugięć były wyższe niż wyznaczone teoretycznie.

Podkreślić należy, że jednym z aspektów, które zapewne prowadziły do ustanowienia w instrukcji [19] współczynników redukcyjnych istotnie obniżających obliczeniową nośność przekrojów było niskie zaufanie do długoterminowej efektywnej eksploatacji zbrojenia kompozytowego, będącego kilka czy kilkanaście lat temu stosunkowo nowym materiałem na rynku budowlanym. Jak wykazują jednak badania elementów z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego po kilku lub kilkunastoletniej eksploatacji, nie stwierdzono w analizowanych w przeglądzie literatury przykładach drastycznej degradacji przedmiotowego zbrojenia.

Dyskusja ta potwierdza, że podobnie jak w przypadku stali B600B, również dla zbrojeń GFRP w dostępnych instrukcjach obliczeniowych m.in. [19] występują wykazane w ramach niniejszej rozprawy znaczne zapasy nośności.

6.2. WPLYW WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH NA ZACHOWANIE ELEMENTÓW

Stal zbrojeniowa B600B oraz pręty kompozytowe GFRP to materiały o odmiennych, indywidualnych właściwościach materiałowych. Stal zbrojeniowa B600B charakteryzuje się przede wszystkim bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi, w szczególności wytrzymałością na rozciąganie. Zbrojenie kompozytowe GFRP charakteryzuje się również wysoką

wytrzymałością na rozciąganie oraz parametrami materiałowymi takimi jak m.in. obojętność elektromagnetyczna czy wysoka odporność na korozję. Zbrojenie kompozytowe GFRP wykazuje istotnie niższy od stali zbrojeniowej moduł sprężystości (modułem Younga), co w efekcie powoduje występowanie większych niż w przekrojach zbrojonych stalą zbrojeniową ugięć i zarysowań w trakcie obciążania elementu.

Obserwacje zachowania płyt podczas badań podkreślają kluczowe różnice między zbrojeniem GFRP a stalą B600B. GFRP, charakteryzujące się liniowo-sprężystym zachowaniem aż do zniszczenia i brakiem uplastycznienia oraz występowaniem większych ugięć i odkształceń płyt w porównaniu z płytami zbrojonymi stalą (co spowodowane jest w szczególności znacznie niższym modułem sprężystości GFRP w porównaniu do stali zbrojeniowej). Zniszczenie płyt zbrojonych GFRP w skutek przeprowadzonych eksperymentów nastąpiło w dwóch przypadkach – płyt oznaczonych jako K100-2 i K100-5, w obu przypadkach zniszczenie nastąpiło poprzez zniszczenie betonu w strefie ściskanej, poprzedzone znacznym wzrostem rozwarcia rys. Odmienne zachowanie pod obciążeniem wykazywały płyty zbrojone stalą B600B (zwłaszcza te z niższym stopniem zbrojenia, podczas gdy przekroje najsilniej zbrojone wykazywały kruche zniszczenie) wykazywały bardziej łagodny charakter zniszczenia, z możliwością osiągnięcia granicy plastyczności zbrojenia i plastycznym zmiędzeniem betonu. Ta dysproporcja w zachowaniu podkreśla konieczność uwzględnienia specyfiki obu materiałów w projektowaniu, nie tylko pod kątem nośności, ale także stanów granicznych użytkowości.

Badanie płyty serii VI (K100-6), w której zastosowano beton wysokiej wytrzymałości z domieszką włókien LPPF, potwierdziło, że te rozwiązania materiałowe znacząco poprawiają zachowanie płyt zbrojonych GFRP w zakresie stanów granicznych użytkowości, poprzez redukcję ugięć i spękań. Jest to zgodne z dokonanym przeglądem literatury, który wskazuje na korzystny wpływ włókien na właściwości betonu, takie jak odporność na powstawanie rys, ciągłość i absorpcja energii. Dyskusja ta podkreśla potencjał rozwiązań hybrydowych niwelujących ograniczających wady zbrojeń kompozytowych, takich jak ich niski moduł sprężystości.

6.3. KIERUNKI WALIDACJI PROCEDUR OBLICZENIOWYCH I DALESZYCH BADAŃ

Wyniki niniejszej rozprawy, w której zastosowano kompleksową i innowacyjną metodologię badawczą (badania na poziomie materiałowym i pełnowymiarowych elementów, zastosowanie nowoczesnych narzędzi jak technologia cyfrowej korelacji obrazu), wskazują na realną potrzebę walidacji i rozwoju istniejących procedur obliczeniowych. Szczególnie dotyczy to:

- współczynników bezpieczeństwa i rezerw nośności: Zaobserwowane zapasy nośności w stosunku do obliczeń teoretycznych dla obu typów zbrojeń (GFRP i B600B) dowodzą, że dostępne normy i instrukcje znacząco zaniżają faktyczną nośność elementów z zbrojeniem wysokiej. Optymalizacja współczynników bezpieczeństwa pozwoli na bardziej optymalne i efektywne projektowanie tego rodzaju elementów,

- modelowania zachowania w różnych warunkach: należy zweryfikować w modelach obliczeniowych modelowanie specyficznych właściwości zbrojeń FRP, takich jak ich wrażliwość na podwyższone temperatury czy złożone zachowanie przy ściskaniu,

- dopracowania wymaga model propagacji ugięć w oparciu o wytyczne instrukcji [19], który zgodnie z uzyskanymi wynikami badań w zakresie niskich wartości obciążeń wykazuje zapas bezpieczeństwa w zakresie ugięć, natomiast w toku dalszego obciążania wykazuje niedoszacowanie wartości ugięć,

- projektowania detali i zakotwień: dyskusje w literaturze na temat przyczepności prętów FRP do betonu oraz wpływu otworów w płytach podkreślają potrzebę jednoznacznych wytycznych projektowych dla detali, zwłaszcza w kontekście zwiększonych odkształceń,

Wnioski płynące z dyskusji ugruntowują rolę zbrojeń wysokiej wytrzymałości jako realnej alternatywy dla tradycyjnej stali, które to zbrojenia osiągają wysokie parametry wytrzymałościowe w warunkach pracy pod dużym obciążeniem.

Dalsze badania powinny skupić się na dostosowaniu modeli obliczeniowych do faktycznego zachowania tych materiałów, szczególnie w kontekście dynamicznych obciążeń i długoterminowej trwałości. Konieczne jest również przeprowadzenie badań na szerszej próbie elementów, zróżnicowanych w zakresie stopnia i rodzaju zbrojenia oraz kształtowania przekroju i rodzaju elementów, co pozwoli na przekrojowe podejście do walidacji procedur obliczeniowych i w efekcie doprowadzi do odpowiedzialnej ich modyfikacji.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej przeprowadzono teoretyczną oraz eksperymentalną analizę zachowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości – stali B600B oraz kompozytu na bazie włókien szklanych (GFRP) – pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. Badania przeprowadzono z użyciem klasycznego sprzętu pomiarowego oraz w części z zastosowaniem technologii cyfrowej korelacji obrazu (CKO), których wyniki wykazały zbieżność z odczytami standardowego sprzętu pomiarowego oraz pozwoliły na bardziej szczegółowe mapowanie zjawisk zachodzących w trakcie obciążania elementów poddanych badaniu.

Głównym celem podjęcia tematu przedmiotowej rozprawy, było potwierdzenie hipotezy badawczej wskazującej, że obecny stan wiedzy w zakresie procedur obliczeniowych elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości pozostawia przestrzeń do ich optymalizacji celem lepszego (urealnionego) odwzorowania pracy konstrukcji, a proponowane normowe procedury obliczeniowe i współczynniki bezpieczeństwa prezentują zachowawcze podejście.

Wnioski płynące z przeprowadzonych badań eksperymentalnych w odniesieniu do zrealizowanych analiz teoretycznych potwierdzają hipotezę, wykazując znaczące zapasy nośności elementów betonowych potwierdzone w warunkach laboratoryjnych.

7.1. KLUCZOWE WYNIKI I ICH INTERPRETACJA

7.1.1. Elementy zbrojone stalą B600B

Eksperymentalnie wyznaczona nośność płyt zbrojonych stalą B600B była we wszystkich badanych przypadkach wyższa niż wartości teoretyczne obliczone na podstawie normy PN-EN 1992-1-1, pomimo skorzystania w obliczeniach z faktycznie wyznaczonych eksperymentalnie parametrów wytrzymałościowych stali i betonu, odpowiednio:

- stal B600B granica plastyczności w zakresie 636,62-654,30 MPa i wytrzymałość na rozciąganie w zakresie 719,38-747,14 MPa, wobec deklarowanych przez producenta parametrów odpowiednio 600 MPa i 660 MPa,

- wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczona na kostkach sześciennych w przedziale 55,16-56,57 MPa .

Uzyskane wyniki (zarówno badania wytrzymałościowe próbek prętów stali B600B jak i elementu żelbetowego – płyty z zastosowaniem zbrojenia B600B) pozwalają na sformułowanie następujących wniosków dla stosowania stali zbrojeniowej B600B w elementach płyt betonowych poddawanych zginaniu:

1. stwierdzono bardzo dobre parametry wytrzymałościowe zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości B600B – na poziomie około 20-30% wyższej wytrzymałości w próbie rozciągania niż deklaruje producent w dokumentach jakościowych,
2. stwierdzono bardzo dobrą przyczepność stali B600B do betonu – w żadnym z analizowanych przypadków pomimo znacznych obciążeń nie nastąpiła utrata przyczepności stali do betonu,
3. Stwierdzono znaczne zapasy nośności płyt betonowych z zbrojeniem B600B w stosunku do wyliczeń teoretycznych, co wskazuje również na efektywną współpracę stali B600B z betonem w dużym zakresie obciążeń.
4. Dokonano obserwacji modeli zniszczenia:
 - stwierdzono, że płyty z niskim stopniem zbrojenia wykazywały plastyczny charakter zniszczenia, z osiągnięciem granicy plastyczności zbrojenia, co w szczególności można było zaobserwować w pracy elementów o niskim stopniu zbrojenia $<1\%$ i niskiej wysokości przekroju (80 i 100 mm), gdzie w miarę rozwoju obciążenia i występowania rozciągania w przekroju, zbrojenie wysokiej wytrzymałości odpowiadało za nośność elementu, wykazując zapasy nośności na poziomie 20-30% w stosunku do założeń teoretycznych,
 - płyty z większym stopniem zbrojenia ulegały zmięźdzeniu betonu, dla których nośność określona eksperymentalnie była większa o około 40-65% od wyznaczonej teoretycznie.

Podsumowując, na bazie uzyskanych wyników eksperymentalnych stwierdzono, że w przypadku projektowania elementów zginanych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości, dostępne procedury normowe, których modyfikacja prowadzi do bardziej ekonomicznego projektowania przekrojów. Porównanie wyników eksperymentalnych, do wyników obliczeń w oparciu o parametry zbrojenia wyznaczone w badaniach eksperymentalnych (wyższe niż wynikające z danych dla klasy stali) przedstawiono w tabeli 20.

Tabela 20. Porównanie wyników eksperymentalnych nośności płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości do wyników obliczeń teoretycznych.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Mrd,teor.	Mrd,eksp
[-]	[-]	[-]	%	kNm	kNm
I	S80-1	2φ10 B600B	0,79	4,15	4,98
	S80-2	6φ12 B600B	3,40	11,62	16,90
	S80-3	11φ12 B600B	6,22	11,62	19,08
II	S100-1	2φ10 B600B	0,63	5,26	6,90
	S100-2	6φ12 B600B	2,72	18,63	22,00
	S100-3	11φ12 B600B	4,98	18,63	28,62
III	S120-1	2φ10 B600B	0,52	6,36	6,90
	S120-2	6φ12 B600B	2,26	20,688	28,00
	S120-3	11φ12 B600B	4,15	28,245	37,10

Wobec uzyskanych danych eksperymentalnych oraz ich porównania z wynikami analizy obliczeniowej przeprowadzonej na bazie parametrów zbrojenia wyznaczonych w drodze próby rozciągania, mając na uwadze znaczne zapasy nośności wykazane w badaniach eksperymentalnych proponuję się modyfikację procedur obliczeniowych w przypadku stosowania zbrojenia wysokiej wytrzymałości B600B dla przekrojów o stopniu zbrojenia wyższym niż 4%, poprzez wprowadzenia współczynnika 1,1 do wszystkich wyników obliczeń nośności w tym zakresie.

7.1.2. Elementy zbrojone kompozytem GFRP

Podobnie jak w przypadku elementów betonowych z zastosowaniem stali B600B, eksperymentalnie wyznaczona nośność płyt zbrojonych GFRP również okazała się wyższa niż wartości teoretyczne obliczone według [19]. Potwierdzają to badania własne autora pracy oraz obserwacje płynące z zrealizowanego przeglądu literatury, że wytyczne wskazane w instrukcji [19] są zachowawcze i mogą w niektórych przypadkach prowadzić do niedoszacowania wytrzymałości elementów zbrojonych kompozytem, a co za tym idzie generować nieoptymalny dobór zbrojenia do przekrojów betonowych.

W prowadzonych obliczeniach skorzystano z następujących parametrów materiałów wsadowych tj. prętów zbrojeniowych GFRP i betonu, odpowiednio:

- pręty kompozytowe GFRP – przyjęto do obliczeń wytrzymałość na rozciąganie 726,51 MPa oraz moduł sprężystości 34 414 MPa (dla partii prętów użytych do zabetonowania płyt grupy VI, dla których przeprowadzono badanie eksperymentalne),

- pręty kompozytowe GFRP – przyjęto do obliczeń wytrzymałość na rozciąganie - 1100 MPa oraz moduł sprężystości 50 000 MPa (dla partii prętów użytych do zabetonowania płyt grupy IV i V, dla których przyjęto wartości na podstawie badań producenta),

- wytrzymałość betonu na ściskanie 56,06-59,54 MPa (dla płyty K100-5) dla betonu zaprojektowanego jako zwykły oznaczona na kostkach sześciennych , w przedziale 109,46-118,00 MPa (dla płyty K100-6) dla betonu zaprojektowanego jako beton wysokiej wytrzymałości oznaczona na kostkach sześciennych, w przedziale 39,17-62,44 MPa (dla płyt grupy IV i V) dla betonu zaprojektowanego jako zwykły oznaczona na próbkach walcowych.

Uzyskane wyniki (zarówno badania wytrzymałościowe próbek prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych GFRP jak i elementu żelbetowego – płyty z zastosowaniem zbrojenia GFRP) pozwalają na sformułowanie następujących wniosków dla stosowania zbrojenia GFRP w elementach płyt betonowych poddawanych zginaniu:

1. Płyty zbrojone prętami GFRP wykazały w trakcie prób obciążeniowych zachowanie charakteryzujące się liniowo-sprężystą pracą aż do zniszczenia i brakiem rezerwy plastycznej (w skutek niskiej w porównaniu do stali zbrojeniowej wartości modułu sprężystości), co skutkuje większymi ugięciami i odkształceniami płyt w trakcie obciążania oraz kruchym charakterem zniszczenia, poprzedzonym znacznym rozwojem rys.
2. W wszystkich przypadkach badanych płyt z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego wysokiej wytrzymałości zaobserwowano znaczne zapasy nośności w stosunku do wyliczeń teoretycznych.
3. W przypadkach, w których wystąpiło zniszczenie przekroju (płyty K100-2 i K100-5) zastosowany stopień zbrojenia kompozytowego sprawiał, że zniszczenie nastąpiło poprzez utratę nośności betonu w strefie ściskanej, a nie poprzez zerwanie zbrojenia GFRP , co stanowi właściwy kierunek projektowania przekrojów zginanych zbrojonych GFRP i pozwala projektować korzystny model zniszczenia poprzez zmiażdżenie betonu w strefie ściskanej, zamiast nagłego zerwania prętów GFRP.
4. W trakcie badań wytrzymałościowych zbrojenia GFRP (próba rozciągania pręta) zaobserwowano niższe niż deklarowane przez producenta parametry wytrzymałościowe , co znacząco obniża wyznaczane teoretycznie wartości nośności płyt, co w istocie stanowić

może przypadek jednostkowy badanej partii zbrojenia – pomijalny w prowadzeniu analizy teoretycznej.

5. Jak wykazano na podstawie przeglądu literatury, zbrojenie FRP (w tym również GFRP) wykazuje dużą podatność do zmienności (pogorszenia) parametrów pod wpływem czynników zewnętrznych takich jak środowiskowe czy zmiany temperatury, co udowodniono badaniami symulującymi proces starzenia lub próbami w warunkach podwyższonych temperatur, co w efekcie może prowadzić do utraty właściwości mechanicznych w określonych warunkach pracy konstrukcji. Jednocześnie, badania przeprowadzone na elementach betonowych lub prętach FRP wbudowanych w konstrukcje betonowe w przedziale od kilku do kilkunastu lat przed wykonaniem odkrywek zgodnie z przeglądem literatury nie wykazały znaczącej utraty parametrów wytrzymałościowych w czasie, co pozwala rozważać redukcję współczynników bezpieczeństwa przy projektowaniu elementów betonowych z zastosowaniem zbrojeń kompozytowych.
6. Przeprowadzone dla płyt grupy IV i V (płyty K100-1 do K100-4) szczegółowa analiza rozwoju ugięć zgodnie z uzyskanymi wynikami badań wykazała, że w zakresie niskich wartości obciążeń propagacja rozwoju ugięć przeprowadzona w oparciu o instrukcję [19] wykazuje zapas bezpieczeństwa, natomiast w toku dalszego obciążania wykazuje niedoszacowanie wartości ugięć.
7. zagadnienie występowania w elementach zbrojonych GFRP znacznych zarysowań i ugięć potwierdzają wnioski z przeglądu literatury oraz obserwacja rozwoju rys i ugięć elementu w miarę wzrostu obciążenia podczas przeprowadzonych badań. Jak wykazano w badaniach odpowiedź dla rozwoju tych niekorzystnych zjawisk pod obciążeniem są zwiększenie klasy betonu oraz stosowanie domieszek włókien do mieszanki betonowej. Celem zobrazowania wpływu rozwiązań materiałowych na redukcję rozwoju zjawisk takich jak znaczne ugięcia i zarysowania przygotowano płytę K100-6, dla której poza standardowym zbrojeniem GFRP zastosowano domieszkę włókien LPPF oraz zastosowano beton wysokiej wytrzymałości. Zastosowanie ww. rozwiązań materiałowych znacząco poprawiło zachowanie płyt zbrojonych GFRP w zakresie stanów granicznych użytkowości, poprzez redukcję ugięć i spękań, co wykazano porównując z płytą K100-5 o tożsamej geometrii i zbrojeniu. Jest to zgodne z literaturą, która wskazuje na korzystny wpływ włókien na właściwości betonu, takie jak odporność na powstawanie rys, ciągliwość i absorpcja energii.

Porównanie wyników eksperymentalnych, do wyników obliczeń zbrojenia GFRP na podstawie instrukcji [19] przedstawiono poniżej w tabeli 21.

Tabela 21. Porównanie wyników eksperymentalnych nośności płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości do wyników obliczeń teoretycznych.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Sto- pi- eń zbro- jenia	Mrd,teo- r.	Mrd,eksp
[-]	[-]	[-]	%	kNm	kNm
I	K100-1	2φ8 GFRP	0,40	2,281	4,26*
	K100-2	11φ8 GFRP	2,22	5,635	8,31
II	K100-3	2φ10 GFRP	0,39	5,703	6,39*
	K100-4	10φ10 GFRP	1,96	16,002	29,82*
III	K100-5	6φ8 GFRP	1,20	4,046	6,04
	K100-6	6φ8 GFRP	1,20	4,509	10,69*

*płyta nie uległa zniszczeniu przy wskazanym obciążeniu

Wobec uzyskanych danych eksperymentalnych oraz ich porównania z wynikami analizy obliczeniowej przeprowadzonej na bazie parametrów zbrojenia wyznaczonych w drodze próby rozciągania, mając na uwadze znaczne zapasy nośności wykazane w badaniach eksperymentalnych proponuje się modyfikację procedur obliczeniowych dla wszystkich przekrojów zginanych zbrojonych kompozytem GFRP poprzez wprowadzenia współczynnika 1,1 do wszystkich wyników obliczeń nośności w tym zakresie.

7.1.3. Odpowiedź na cele badawcze i postawione hipotezy

Przeprowadzone badania eksperymentalne na pełnowymiarowych płytach betonowych, przygotowanych w oparciu o analizy teoretyczne oraz eksperymentalne rozpoznanie materiałów wsadowych (stal B600B, beton, pręty GFRP), pozwoliły na osiągnięcie głównego celu rozprawy, tj. weryfikację metod wymiarowania i modelowania elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości, poprzez zaproponowanie w rozdziałach 7.1.1. i 7.1.2 modyfikacji dostępnych w normach lub instrukcjach wzorów, poprzez wprowadzenie współczynników zwiększających obliczeniową nośność elementów. Dodatkowo, zidentyfikowano konieczność dopracowania modelu propagacji rys w elementach zbrojonych GFRP w oparciu o [19], ponieważ jak wynika z przeprowadzonych eksperymentów w tym zakresie występuje rozbieżność danych eksperymentalnych z stanem analizy teoretycznej.

W skutek przeprowadzonych eksperymentów i analiz, zaproponowano modyfikację istniejących wzorów na podstawie uzyskanych wyników. Przedmiotowe modyfikacje, z uwagi na konieczność dalszych szerokich badań na większej próbie, zawężono do propozycji modyfikacji jedynie o 10% (a w

przypadku zbrojenia B600B zawężono również do stopnia zbrojenia), pomimo, że większość badanych przypadków wykazała zapasy nośności na poziomie nawet 50%. Mając jednak na uwadze jednostkowe próby o mniejszym zapasie nośności, przyjęto zachowawczą modyfikację.

Szczegółowo zrealizowano również cele pomocnicze:

1. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych określono wymagany stopień zbrojenia dla badanych typów płyt z różnymi rodzajami zbrojenia wysokiej wytrzymałości, wskazano stopień zbrojenia jaki należy uznawać za optymalny – w przypadku stali B600B w przedziale od 1% do 4%. W przypadku zbrojenia GFRP 1-1,5% - taki stopień zbrojenia pozwala osiągnąć dobrą współpracę zbrojenia z betonem, bardzo dobre parametry wytrzymałościowe oraz ograniczyć rozwój niekorzystnych zjawisk takie jak nadmierne ugięcia i zarysowania,
2. Ustalono nośność i właściwości użytkowe zbrojenia wysokiej wytrzymałości w warunkach eksploatacji (pod obciążeniem), podkreślając różnice w zachowaniu GFRP i B600B, odnosząc nośność i modele zniszczenia przy zastosowaniu zróżnicowanego stopnia zbrojenia elementów,
3. Zastosowano nowoczesne metody diagnostyki stanu naprężeń i odkształceń, w tym technikę cyfrowej korelacji obrazu (ARAMIS) i szybką kamerę, co pozwoliło na szczegółową analizę dynamiki strukturalnej,
4. Określono warunki pracy zbrojenia w betonie z włóknami polipropylenowymi, wykazując ich pozytywny wpływ na trwałość i nośność elementu w zakresie stanu granicznego użytkowości i korzystny wpływ na model zniszczenia płyt pod obciążeniem.

7.1.4. Wkład w rozwój dyscypliny i oryginalność pracy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegające na kompleksowym podejściu do zagadnienia (połączenie analizy teoretycznej, badań wytrzymałościowych materiałów wsadowych i eksperymentów na pełnowymiarowych elementach) oraz w zastosowaniu innowacyjnej metodologii badawczej w tym w szczególności technologii cyfrowej korelacji obrazu (CKO). Powyższe pozwoliło badać wiele różnych aspektów pracy pełnowymiarowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości w warunkach obciążenia statycznego, zmieniającego się w czasie, w tym uderzenia impulsowego i kolejno dokonać weryfikacji

uzyskanych wyników badań eksperymentalnych z obliczeniami sporządzonymi w oparciu o dostępne normy i instrukcje.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych dostarczyły kluczowych nowych danych, które potwierdzają wskazaną w hipotezie badawczej potrzebę rewizji i optymalizacji istniejących procedur obliczeniowych dla elementów betonowych poddanych zginaniu zbrojonych stalą B600B i kompozytami GFRP. Analiza relacji wyników badań eksperymentalnych do wyznaczonych teoretycznie wartości potwierdza, że dostępne w normach i instrukcjach procedury obliczeniowe prezentują zachowawcze podejście, którego modyfikacja zapewnia bardziej optymalne projektowanie elementów betonowych z zastosowaniem zbrojenia wysokiej wytrzymałości. Uzyskane wyniki badań (w tym w szczególności ich porównanie z wynikami analiz teoretycznych) dostarczają następujących wartościowych danych stanowiących wkład w rozwój dyscypliny:

1. Zbrojenia wysokiej wytrzymałości – zarówno stal B600B jak i kompozyt GFRP wykazały bardzo dobrą współpracę zbrojenia z betonem, pracując w dużym zakresie obciążeń,
2. Dla wszystkich badanych płyt – zarówno zbrojonych stalą B600B jak i kompozytem GFRP wykazany został zapas nośności, który najbardziej uwidocznił się w płytach z zastosowaniem zbrojenia GFRP, w wielu przypadkach sięgający około 50% wartości wyliczonej teoretycznie,
3. Analiza uzyskanych w drodze eksperymentu ugięć w stosunku do propagacji ugięć przeprowadzonej wg [19] wykazała, że początkowej fazie przyrostu obciążenia faktyczne ugięcia przy tożsamym poziomie obciążenia miały mniejsze wartości niż wyznaczone teoretycznie, natomiast w miarę wzrostu obciążenia wartość ugięcia wyznaczonego eksperymentalnie była większa niż wyznaczonego teoretycznie,
4. Na przykładzie płyty zbrojonej kompozytem GFRP płyta K100-3, która została stopniowo odciążona, istotnie redukując ugięcie, stwierdzono, że mimo odciążenia do poziomu $M_a=0\text{kNm}$, nadal wykazywała ugięcie na poziomie 27 mm, czego nie wykazał model teoretyczny. Natomiast zasadniczo należy stwierdzić, że po odciążeniu płyt ugięcia znacząco redukowały się, a rysy zamykały.
5. Dla płyt zbrojonych kompozytem GFRP zaobserwowano, że wyliczona teoretycznie w oparciu o instrukcję [19] wartość momentu powodująca zarysowanie była znacznie niższa niż możliwa do zaobserwowania w trakcie badania oraz każdorazowo w przypadku zniszczenia betonu w strefie ściskanej zniszczenie poprzedzał znaczny wzrost zarysowań.

6. Na podstawie badań płyt zbrojonych kompozytem GFRP grupy VI i porównaniu pracy płyt K100-5 i K100-6 pod obciążeniem, o tożsamym zbrojeniu różniących się zastosowaniem w płycie K100-6 mieszanki betonu specjalnego o wysokiej wytrzymałości i domieszce włókien, stwierdzono, że ww. rozwiązania materiałowe w sposób istotny ograniczają negatywne zjawiska rozwoju ugięć i zarysowań w elementach zbrojonych GFRP.

Formułowane obserwacje bezpośrednio przyczyniają się do rozwoju dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport, dostarczając danych wspierających bezpieczne, efektywne i ekonomicznie uzasadnione projektowanie konstrukcji z zastosowaniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości. Szczególnie podkreślono potencjał stali B600B do stosowania w konstrukcjach wymagających wysokich parametrów wytrzymałościowych oraz zastosowanie GFRP w środowiskach podatnych na korozję lub wymagających neutralności elektromagnetycznej.

7.1.5. Kierunki dalszych badań

W oparciu o uzyskane wyniki i zidentyfikowane luki w wiedzy, sugeruje się następujące kierunki dalszych badań na większej próbie laboratoryjnej:

- dalsza optymalizacja i rozwój procedur obliczeniowych w normach i wytycznych, mająca na celu lepsze odzwierciedlenie rzeczywistego zachowania zbrojeń wysokiej wytrzymałości i zredukowanie nadmiernych współczynników bezpieczeństwa, do poziomu zapewniającego margines bezpieczeństwa obliczeń, ale jednocześnie pozwalającego na optymalne projektowanie zbrojenia wysokiej wytrzymałości,
- dalsza analiza długoterminowej trwałości i zachowania elementów zbrojonych GFRP oraz samego zbrojenia GFRP, zwłaszcza w kontekście zmiennych obciążeń dynamicznych, wilgotności i cykli temperaturowych,
- opracowanie jednoznacznych wytycznych projektowych dotyczących detali konstrukcyjnych, zakotwień oraz połączeń hybrydowych (stal/GFRP) w elementach zbrojonych kompozytem, ze względu na specyfikę ich odkształcalności oraz trudność kształtowania zbrojenia GFRP w warunkach budowy,
- dalsze badania nad optymalnym składem mieszanek betonowych z włóknami, zwłaszcza w kontekście ich wpływu na współpracę ze zbrojeniami wysokiej wytrzymałości w różnych warunkach pracy i ekspozycji,
- rozwinięcie analizy zachowania elementów pod obciążeniem dynamicznym w szerszym zakresie parametrów i konfiguracji zbrojenia.

Realizacja tych badań przyczyni się do pełnego wykorzystania potencjału zbrojeń wysokiej wytrzymałości w budownictwie, promując tym samym rozwój bardziej efektywnych, trwałych i bezpiecznych konstrukcji betonowych.

7.1.6. Potencjał wdrożeniowy badań

Z perspektywy zakończonych badań będących przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej, które wykazały w szczególności bardzo dobre parametry wytrzymałościowe elementów żelbetowych zginanych z zastosowaniem zbrojeń wysokiej wytrzymałości (zarówno stali B600B jak i kompozytu GFRP) przy jednoczesnej dobrej współpracy zbrojenia z betonem, potencjał wdrożeniowy zbrojeń wysokiej wytrzymałości do szerokiego stosowania na rynku budowlanym w elementach zginanych (takich jak np. stropy) ocenia się jako wysoki.

Uzyskanie wyników potwierdzających wysoką przydatność zbrojeń wysokiej wytrzymałości wraz z szerokim rozpoznaniem literaturowym (w szczególności w kierunku specyficznych parametrów materiałowych zbrojenia kompozytowego GFRP takich jak m.in. wysoka odporność na korozję, obojętność elektromagnetyczna) dostarczyło nowych danych, pozwalających rozważać stosowanie zbrojeń wysokiej wytrzymałości w szerokim spektrum obiektów budowlanych.

Przykładowymi potencjalnymi możliwościami aplikacji zbrojenia wysokiej wytrzymałości posiadającymi znaczny potencjał wdrożeniowy mogą być:

- stosowanie zbrojenia kompozytowego w elementach budynków wymagających obojętności elektromagnetycznej (np. stacje transformatorowe, serwerownie zlokalizowane wewnątrz obiektów),
- stosowanie zbrojenia kompozytowego w elementach wzmocnień budynków narażonych na intensywną działalność wilgoci – np. naprawa ścian fundamentowych poddanych oddziaływaniu wód gruntowych,
- stosowanie zbrojenia kompozytowego w elementach budynków, w których z uwagi na konieczność maksymalizowania w obiekcie elementów konstrukcji obojętnych elektromagnetycznie rekomendowane jest unikanie stosowania elementów stalowych – np. zaproponowane przez doktoranta zastosowanie w płycie fundamentowej obiektu będącego w trakcie wyceny – Zajezdni tramwajowej zbrojenia w formie rozproszonych włókien z łączeniem przerw roboczych prętami zbrojeniowymi GFRP,
- stosowanie w stropach domieszek włókien kompozytowych, celem poprawy pracy konstrukcji w zakresie powstawania zarysowań i ugięć, dążąc tym samym do minimalizacji lub wyeliminowania w niektórych budynkach zgłoszeń reklamacyjnych w tym obszarze.

8. LITERATURA

- [1] Nanni A., De Luca A., Zadeh H. J, Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, Taylor & Francis Group, LLC, 2014
- [2] Bank L.C. (1993). Properties of FRP reinforcements for concrete. In fiber-reinforced plastic (FRP) for concrete structures: Properties and applications, ed. A. Nanni, 59–86. New York: Elsevier Science Publishers (1993).
- [3] C. E. Bakis (1993). FRP reinforcement: Materials and manufacturing. In fiber-reinforced plastic (FRP) for concrete structures: Properties and applications, ed. A. Nanni, 13–58. New York: Elsevier Science Publishers (1993).
- [4] Faza S. , GangaRao H. (1993) Glass FRP reinforcing bars for concrete. In fiberreinforced plastic (FRP) for concrete structures: Properties and applications, ed. A. Nanni, 42, 167–188. Amsterdam: Elsevier (1993).
- [5] Ehsani M. R. (1993). Glass-fiber reinforcing bars. In Alternative materials for the reinforcement and prestressing of concrete, ed. J. L. Clarke, 35–54. London: Blackie Academic & Professional (1993).
- [6] Robert, M., Cousin, P., Benmokrane, B. (2009). Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete Journal of Composites for Construction, 13(2), 66–73.
- [7] PN-EN -1-1:2008 EUROKOD 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Reguły ogólne I reguły dla budynków.
- [8] Knauff M., (2018), Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [9] Knauff M., Golubińska A., Knyziak P., (2014) Tablice i wzory do projektowania konstrukcji żelbetowych z przykładami obliczeń. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [10] Pędziwiatr J., (2010) Wstęp do projektowania konstrukcji żelbetowych wg PN-EN 1992-1-1:2008. Dolnośląskie Wydawnictwa Edukacyjne.
- [11] Starosolski W., (2012) Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych Tom 1. Wydawnicwo Naukowe PWN.
- [12] Starosolski W., (2011) Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych Tom 2. Wydawnicwo Naukowe PWN.
- [13] Starosolski W. (2000). Konstrukcje żelbetowe. PWN, Warszawa.
- [14] Jamróży Z. (2001). Beton I jego technologie. PWN, Warszawa-Kraków.
- [15] Piechnik S. (1999). Wytrzymałość materiałów. Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [16] Bodnar A. (2003). Wytrzymałość materiałów. Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- [17] PN-EN ISO 17660-1, Spawanie. Spawanie/zgrzewanie stali zbrojeniowej. Część 1. Złącza spawane/zgrzewane nośne.
- [18] PN-B-03264:2002, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

- [19] ACI 440.1R-15 (2015), Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, ACI Committee 440, American Concrete Institute
- [20] CNR-DT (2006), Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars, National Research Council.
- [21] JSCE (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers .
- [22] CSA-S806-02 (2002), Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association.
- [23] CAN/CSA (2006), Canadian highway bridge design code, Canadian Standards Association.
- [24] Bank C. Lawrence (2006). Composites for construction : structural design with FRP materials. John Wiley & Sons, Inc.
- [25] Kim D.-H. (1994). Composite Structures for Civil and Architectural Engineering. Taylor & Francis Group.
- [26] Hull D. (1996). An introduction to composite materials (second edition), Cambridge Solid State Science Series.
- [27] Klusek S, Sędek P, Kubik K. (2021). New Weldable Steel for Rebars. *Biul Inst Spaw.* 2021;3:29–37.
- [28] Szumigała M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, *Przegląd budowlany* 3/2014, str. 47–50
- [29] Górski M., Goldmann E. , Czy zbrojenia niemetaliczne będą co raz popularniejsze? , *Inżynier Budownictwa*, 2021
- [30] Abbood I.S., Odaa S.A., Hasan K.F., Jasim M.A. „Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review, “*Mater. Today Proc.*, vol. 43, no May, pp. 1003-1008, 2021.
- [31] Ostrowski A.K., Chastre C., Furtak K., Malazdrewicz S. (2022). Consideration of Critical Parameters for Improving the Efficiency of Concrete Structures Reinforced with FRP. *Materials*, 15, 2774.
- [32] Rejment M., Trapko T. (2014). Pręty kompozytowe do zbrojenia betonu. *Materiały budowlane*, nr 499.
- [33] Wydra M., Włodarczyk M., Fangrat J. (2020). Nonlinear analysis of compressed concrete elements reinforced with FRP Bars. *Materials MPDI*, 13, 4410.
- [34] Dutkiewicz M., Majkowski P. (2024), Benefits and risks of application of non-metallic composites as an alternative to steel reinforcement in concrete elements, *MATEC*

- [35] Burgoyne C.J., Byars E. , Guadagnini M. 6 , Manfredi G. , Neocleous K. , Pilakoutas K., Taerwe L., Taranu N. , Tepfers R. , Weber A. (2007). FRP reinforcement in RC structures, *fédération internationale du béton (fib)*. Web of Conferences 396, 02006 (2024).
- [36] Zhou Z, Meng L, Zeng F, Guan S, Sun J, Tafsirojjaman T. (2023). Experimental Study and Discrete Analysis of Compressive Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars. *Polymers*. 2023;15:2651.
- [37] Siddika, A., Al Mamun, M. A., Ferdous, W., & Alyousef, R. (2020). Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*.
- [38] Naser, M. Z., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Eng. Struct.*, 198(2019), 109542.
- [39] Lau, D., Qiu, Q., Zhou, A., & Chow, C. L. (2016). Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Constr. Build. Mater.*, 126(2016), 573–585. 7
- [40] Wang, B.; Liu, G.; Miao, H. (2023). Experimental Study on the Bond Performance between Glass-Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars and Concrete. *Buildings*, Vol. 13 (9).
- [41] Wydra, M., Dolny, P., Sadowski, G., Grochowska, N., Turkowski, P., & Fangrat, J. (2023). Analysis of Thermal and Mechanical Parameters of the BFRP Bars. *Mater. Proc.*, 13(2023), 24.
- [42] Ellis, D. S., Tabatabai, H., Nabizadeh, A. (2018). Residual Tensile Strength and Bond Properties of GFRP Bars after Exposure to Elevated Temperatures. *Materials*, 11(2018), 346
- [43] Robert, M., Benmokrane, B. (2010). Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures. *Journal of Composites for Construction*, 14(4), 353–360.
- [44] Bazli, M., Abolfazli, M. (2020). Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymers under Elevated Temperatures: An Overview. *Polymers*, 12, 2600.
- [45] Wang, Y.; Wong, P.; Kodur, V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures (2007). *Compos. Struct.* 2007, 80, 131–140.
- [46] Kumahara, S.; Masuda, Y.; Tanano, H.; Shimizu, A. (1993). Tensile strength of continuous fiber bar under high temperature. *Spec. Publ.* 1993, 138, 731–742.
- [47] Stuart, V., & Cunningham, L. (2017). FRP reinforced-concrete slabs: a comparative design study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, Vol. 170, No. 8, London, UK: ICE Publishing.
- [48] Wang, X.L.; Zha, X.X (2011). Experimental Research on Mechanical Behavior of GFRP Bars under High Temperature. *Appl. Mech. Mater.* 2011, 71, 3591–3594.

- [49] Gudonis E, Timinskas E, Gribniak V, Kaklauskas G, Arnautov AK, Tamulevičius V. (2013). FRP REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES: STATE-OF-THE-ART REVIEW OF APPLICATION AND DESIGN. *Eng Struct Technol.* 2013;5(4):147–158.
- [50] Nolan, S., Rossini, M., Knight, C., & Nanni, A. (2021). New directions for reinforced concrete coastal structures. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 2021;2(1);1-12
- [51] Alnahhal W.I., Chiewanichakorn M., Aref A.J. Alampalli S., “Temporal Thermal Behavior and Damage Simulations of FRP Deck”, *J. Bridge. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 452-464, 2006.
- [52] Bhat T., Chevali V., Liu X., Feith S., Mouritz A.P., “Fire structural resistance of basalt fibre composite”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol.71, pp. 107-115, 2015.
- [53] ACI 318-19 (2019), Building code requirements for structural concrete, ACI Committee 318, American Concrete Institute
- [54] Wiater A., Siwowski T , „Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych.”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, kwiecień – czerwiec 2017, s. 265-296
- [55] Mohamed O. A. , Khattab R., Al Hawat W.. (2017). Numerical study on deflection behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars . *WM Caus, IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering* 245 (2017) 032065.
- [56] Grygo R., Kosior-Kazberuk M., (2017). Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami FRP. *Budownictwo i inżynieria środowiska*, 8 (2017) ISSN: 2081-3279.
- [57] Abramski M., Korzeniowski P., Tisler W. (2016). Flexural behaviour of concrete slabs reinforced with FRP bars in experiments and according to ACI 440.1R guide. *Technical Sciences*, 2016, 19 (4), 339-357.
- [58] Abdalla, H.A. (2002). Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*. 2002;56:63-71.
- [59] Rajczyk M., Stachecki B. (2018). Eksperymentalne badania przyczepności kompozytowego zbrojenia bazaltowego (BFRP) do betonu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* nr 24, 2018, 305-312.
- [60] Liu Y., Tafsirojjaman T., Dogar A.U.R., Hueckler A. (2021). Bond behaviour improvement between infra-lightweight and high strength concretes using FRP grid reinforcements and development of bond strength prediction models. *Construction and Building Materials*.

- [61] Manalo, A.; Benmokrane, B.; Park, K.; Lutze, D. (2014). Recent developments on FRP bars as internal reinforcement in concrete structures. *Engineering Structures*, October 2015.
- [62] Jabbar SAA, Farid SBH. (2018). Replacement of steel rebars by GFRP in the concrete structures. *Karbala International Journal of Modern Science*. 4:216–227.
- [63] Maranan, G.B.; Manalo, A.C.; Benmokrane, B.; Karunasena, W.M.; Mendis, P. (2015). Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. *Engineering Structures*, October 2015.
- [63] Maranan, G.B.; Manalo, A.C.; Benmokrane, B.; Karunasena, W.M.; Mendis, P. (2015). Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*, Volume 117, 15 June 2016, Pages 422-436.
- [64] Karimi Pour, A., Shirkhani, A., Kirgiz, M. S., & Noroozinejad Farsangi, E. (2023). Experimental investigation of GFRP-reinforced concrete columns made with waste aggregates under concentric and eccentric loads. *Structural Concrete*, 24(1), Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- [65] Yaseen Ali Salih , Aziz I. Abdulla and Muyasser M. Jomaa'h (2022), Impact Resistance of GFRP Reinforced Concrete One-Way Slabs, *Information Sciences Letters* 11, No. 4, 1267-1275.
- [66] Sidhardhan J.S. , Madasamy M. (2024), The structural performance of slab reinforced with steel and GFRP bars subjected to static and static cyclic load, *Matéria (Rio de Janeiro)* 29(4)
- [67] Ahmad H., Baharin A., Hizdrani M.H., Hashim M.H.M. (2023), Flexural Behaviour of Two Ribbed SFRC Slab Reinforced with GFRP Bars, *Journal of Sustainable Civil Engineering and Technology* 2(1) .
- [68] Al-Ateyat A., Barakat S., Junaid M.T., Altoubat S., Maalej M., Awad R. (2024), Experimental and Numerical Analysis of Punching Shear of GFRP-RC Slabs, *Civil Engineering Journal* 10(Special Issue).
- [69] M. R. Rasheed, S. D. Mohammed (2024), Structural behavior of one-way slabs reinforced by a combination of GFRP and steel bars: An experimental and numerical investigation, *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 2024; 33: 20240002.
- [70] Kurtoğlu A.E., Bilgehan M., Gülşan M.E., Çevik A. (2022), Experimental and Theoretical Investigation of the Punching Shear Strength of GFRP-Reinforced Two-Way Slabs, *Structural Engineering International*.
- [71] M. Adam, A. Medhat, F. Habib, T. El-Sayed (2021), Structural Behavior of High-Strength Concrete Slabs Reinforced with GFRP Bars, *Polymers* 2021; 13: 2997.

- [72] Elhashimy, A. M.; Tawhed, W. F.; Helmy, M. (2020), Behavior of Hollow Core Slabs Reinforced with GFRP Prestressing Bars, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(3): C4802-C4802.
- [73] Vijayalakshmi, R.; Ravichandran, R. S.; Jagadeesan, S.; Prithiviraj, C. (2024), Exploring the Synergy: Experimental and Theoretical Investigation of Steel and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Reinforced Slab Incorporating Alccofine and M-Sand, *Open Journal of Civil Engineering*, 14(3): 334-347.
- [74] Sun Li-xiang, Lin Peng-zhen, Yang Zi-jiang, Liu Ying-long, Shen Qua (2021), Experimental study on flexural behavior of GFRP reinforced concrete slabs, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 676(1): 012060.
- [75] Ruba Carolin C, Mahendran N, and Vijay T J (2020), Flexural Performance of Precast Concrete Slab with Gfrp and Geogrid Reinforcement, *Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Publication (BEIESP)*.
- [76] Chang K. and Seo D. (2012), Behavior of One-Way Concrete Slabs Reinforced with GFRP Bars, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*.
- [77] Al-Rubaye M, Manalo A, Alajarmeh O, Ferdous W, Lokuge W, Benmokrane B (2020). Flexural behavior of concrete slabs reinforced with GFRP bars and hollow composite reinforcing systems.”. *Composite Struct.* 2020;236:111836.
- [78] Adam MA, Erfan AM, Habib FA, El-Sayed TA (2021). Structural behavior of high-strength concrete slabs reinforced with GFRP bars. *Polymers*. 2021;13(17):2997.
- [79] Golham MA, Al-Ahmed AHA (2023). Behavior of GFRP reinforced concrete slabs with openings strengthened by CFRP strips. *Results Eng.* 2023;18:101033.
- [80] Sadraie H, Khaloo A, Soltani H. (2019). Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading. *Eng Struct.* 2019;191:62–81.
- [81] Pajari, M. (2009). Web shear failure in prestressed hollow core slabs. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*, Vol. 42, No 4, pp. 207-217.
- [82] De Castihlo, V. C., Do Carmo Nicoletti, M., El Debs, M. K. (2005). An investigation of the use of three selection-based genetic algorithm families when minimizing the production cost of hollow core slabs. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194, 4651-4667
- [83] Sheikh, S. A., Kharal, Z. (2017). Replacement of steel with GFRP for sustainable reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 160 (2018) 767–774.
- [84] Ebrahimzadeh, S., Yang, X., Manalo, A., Alajarmeh, O., Senselova, Z., Sorbello, C. D., Weerakoon, S., & Benmokrane, B. (2024). Flexural behaviour of GFRP-reinforced concrete pontoon decks under static four-point and uniform loads. *Structures* 59;105796.

- [85] Yang, X., Manalo, A., Alajarmeh, O., Benmokrane, B., Sorbello, C.-D., & Weerakoon, S. (2024). Torsional behavior of GFRP-RC pontoon decks with edge cutout. *Structures* 69 (2024), 107438
- [86] Al-Zahrani, M. M. (2024). Durability of concrete-embedded GFRP bars after 20 years of tidal zone exposure: Correlation with accelerated aging tests. *Case Studies in Construction Materials*, 21 (2024), e03435.
- [87] Wang, Z., Zhao, X.-L., Xian, G., Wu, G., Singh Raman, R. K., Al-Saadi, S., & Haque, A. (2017). Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. *Constr. Build. Mater.*, 139(2017), 467-489.
- [88] Jia, D.; Guo, Q.; Mao, J.; Lv, J.; Yang, Z (2020). Durability of glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete under various environments. I: Experiments and analysis. *Composite Structures*, 234, 111687, 2020.
- [89] Wu, W., He, X., Yang, W., Alam, M. S., Wei, B., & He, J. (2023). Degradation factors and microstructure degradation characteristics of B/GFRP bars in harsh environment: A review. *Construction and Building Materials*, 366, 130246
- [90] Yu, W., He, X., He, L., Wu, C., He, J., & Zhu, A. (2022). Joints Fatigue Damage Prediction for a Novel Prefabricated Bridge Deck Based on Accelerated Corrosion Test of CFRP Composites. *Engineering Failure Analysis*, 47 (2022), 4879–4892..
- [91] Lu, Z., Jin, X., Sun, T., Li, N., & Xu, Y. (2022). Durability of basalt fiber reinforced polymer bars in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 317 (2022), 125924.
- [92] Rifai, M. A., El-Hassan, H., El-Maaddawy, T., & Ahed, F. (2020). Durability of basalt fiber reinforced polymer bars in alkaline solutions. *Construction and Building Materials*, 243 (2020), 118258..
- [93] Chen, J. F., & Teng, J. G. (2007). Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), 641–653.
- [94] Wang, Y., Zhao, Z., Wu, G., Singh Raman, R. K., & Al-Saadi, S. (2019). Durability of basalt fiber-reinforced polymer (B/FRP) bars in seawater and sand environment. *Construction and Building Materials*, 207 (2019), 634–647.
- [95] Benzecry, V., Al-Khafaji, A. F., Haluza, R. T., Bakis, C. E., Myers, J. J., & Nanni, A. (2021). Durability assessment of 15- to 20-Year-old GFRP bars extracted from bridges in the US. I: selected bridges, bar extraction, and concrete assessment. *Journal of Composites for Construction*, 25(2021), 04021007.
- [96] Al-Khafaji, A. F., Haluza, R. T., Benzecry, V., Myers, J. J., Bakis, C. E., & Nanni, A. (2021). Durability assessment of 15- to 20-year-old GFRP bars extracted from bridges in the US. II: GFRP bar assessment. *Journal of Composites for Construction*, 25(2021), 04021008.

- [97] Tekle, B. H., Khennane, A., Kayali, O. (2016). Bond Properties of Sand-Coated GFRP Bars with Fly Ash–Based Geopolymer Concrete. *Journal of Composites for Construction*.
- [98] Maranan, G., Manalo, A., Karunasena, W. M., Benmokrane, B. (2015). Bond Stress-Slip Behavior: Case of GFRP Bars in Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015.27.
- [99] Rosyidah, A.; Sucita, I. K.; Hidayat, F. (2018). The Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Reinforcement with Monolith Concrete. *International Journal on advanced science engineering information technology*, Vol. 8 (2).
- [100] ACI 440.3R-04 (2004), Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute.
- [101] Manalo, A., Maranan, G., Benmokrane, B., Cousin, P., Alajarmeh, O., Ferdous, W., Liang, R., & Hota, G. (2020). Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments. *Cement and concrete composites*, May 2020, 103564.
- [102] O. Gooranorimi, A. Nanni (2017). GFRP REinforcement in Concrete after 15 years of service, *J. Compos. Constr.* 21 (2017) 04017024
- [103] Tavassoli, A., Sheikh, S. A. (2017). Seismic Resistance of Circular Columns Reinforced with Steel and GFRP. *Journal of Composites for Construction*, 21(1).
- [104] Liu, H., Ka, T. A., Su, N., Zhu, Y., Guan, S., Long, J., Tafsirojjaman, T. (2024). Experimental Study of Dimensional Effects on Tensile Strength of GFRP Bars. *Buildings*, 14(5).
- [105] Abed, F., Mehaini, Z., Oucif, C., Abdul–Latif, A., & Baleh, R. (2020). Quasi-static and dynamic response of GFRP and BFRP bars under compression. *Composites Part C: Open Access*, 2, 100034.
- [106] Khorramian, K., Sadeghian, P. (2021). Material Characterization of GFRP Bars in Compression Using a New Test Method. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(2), 57-84.
- [107] Hosseini, A. S.; Sadeghian, P. (2025). Assessing Compressive Properties of GFRP Bars: Novel Test Fixture and Statistical Analysis. *Journal of Composites for Construction* 29(2):04025011, April 2025.
- [108] ASTM International. (2021). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. *ASTM Standard D7205/D7205M – 21*.
- [109] Moura C.A.M., Lima P.R.L., Ribeiro D.V. (2022). Effect of Temperature on Mechanical Behavior of Concrete Reinforced with Different Types of GFRP Bar. *Polymers*, 14, 3437.
- [110] Mostafa, H., Mahmoud, A., Mustafa, T. S., & Khater, A. E-S. (2024). Experimental and analytical punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs having internal GFRP gratings. *Structures*, Vol. 60, No. 105882, Egypt: Elsevier Ltd.

- [111] Mostafa, H., Mahmoud, A., Mustafa, T. S., & Khater, A. E-S. (2024). Enhancement of punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs using GFRP grating. *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 68, No., 19-44. Benha University, Egypt.
- [112] Ebrahimzadeh, S., Manalo, A., Alajarmeh, O., Yang, X., Sorbello, C. D., Weerakoon, S., Hassanli, R., & Benmokrane, B. (2024). Flexural behaviour of the segmental precast concrete decks post-tensioned by GFRP rods. *Structures*, Vol. 65, Nr 106712, Toowoomba, Australia; Brisbane, Australia; Mawson Lakes, Australia; Sherbrooke, Kanada: Elsevier Ltd
- [113] Tian S., Zhang X., Hu W (2022). Fatigue Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Ribbed Girder Bridge Deck Slabs. *Polymers*, 14, 3814.
- [114] Zhang B, Masmoudi R, and Benmokrane B (2004), Behaviour of one-way concrete slabs reinforced with CFRP grid reinforcements, *Construction and Building Materials*.
- [115] Amidi S., Wang J., "Subcritical debonding of FRP-to-concrete bonded interface under synergistic effect of load, moisture and temperature," *Mech. Mater*, vol. 92, pp. 80-93, 201
- [116] Chen, W., Zhen, H., Liu, F., Wu, B., Li, H., Wu, Z., Huang, J., Zhu, H., Li, L., & Xiong, Z. (2024). Experimental and Theoretical Study on Tensile Mechanical Properties of GFRP–Steel Composite Bars. *Buildings*, 14(2024), 2513.
- [117] Dutkiewicz, M., Griniov, V., Majkowski, P. (2024). Numeryczna i eksperymentalna analiza prefabrykowanych płyt betonowych zbrojonych stałą wysoką wytrzymałości ze specjalnymi warunkami podparcia. *Materiały budowlane*, 2/2014, nr 618, str. 21-25.
- [118] Kijania-Kontak, M., Winnicki, A. (2023) Experimental Investigation of the Bond Between New Steel Bars B600B and High-Strength Concrete in a Pull-Out Test - Report and Analysis of the Results. *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient* (pp.1450-1460), chapter.
- [119] RILEM/CEB/FIP (1983), Technical recommendations for the testing and use of construction materials, E&FN Spon, U.K.
- [120] Glinicki A.M. (2010). Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji , Szczyrk
- [121] PN-EN 14889-1:2007 – Włókna do betonu – Część 1: Włókna stalowe – Definicje wymagania i zgodność
- [122] PN-EN 14889-2:2007 – Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność.
- [123] Smarzewski P., Sz waj M., Szewczak A. (2012). Analizy stanów deformacji zginanych płyt z betonubi fibrobetonu wysokowartościowego. *Budownictwo I Architektura* 10 (2012) 37-52.
- [124] Elbially, S., Elfarnsawy, M., Salah, M., Abdel-Aziz, A., & Ibrahim, W. (2025). An Experimental Study on Steel Fiber Effects in High-Strength Concrete Slabs. *Civil Engineering Journal*, Vol. 11, No. 01. Tehran, Iran: C.E.J.

- [125] Khan, I. U., Gul, A., Khan, K., Akbar, S., & Irfanullah. (2022). Mechanical Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete. *Eng. Proc.*, 22, 6, Peshawar, Pakistan: MDPI
- [126] Makroo, M. A.; Chauhan, S. (2024). Mechanical properties of Polypropylene Fibre reinforced concrete for M25 mixes. *Nanotechnology Perceptions*, Vol. 20 (S15), 427-436.
- [127]Thakur, G.; Chintalapudi, S. R.; Muhamed, H.; Bhargavi, Y. K.; Ergashev, D.; Raximova, G.; Kumar, R. (2024). Flexural characteristics of a polypropylene fibre concrete topping on a precast concrete slab. ICESTE 2024.
- [128] Noushini, A.; Samali, B.; Vessalas, K. (2013). Influence of Polyvinyl Alcohol Fibre Addition on Fresh and Hardened Properties of Concrete. Conference Paper: Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 2013.
- [129] Abramski M., Korzeniowski P., Wesołowski M. (2012). Badania płyt betonowych zbrojonych prętami z włókien bazaltowych. *Inżynieria i budownictwo*, 12/2012.
- [130] ASTM International; (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Standard: ASTM C 39/C 39M – 05'2.
- [131] PN-EN 1992-1-1. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu.

9. ZAŁĄCZNIKI

Załącznik nr 1 Właściwości GFRP deklarowane przez producenta

Właściwości ogólne:

Kształt: pręty

Kolor: jasnożółty do czarnego

Składowanie: w warunkach uniemożliwiających zabrudzenie oraz mechaniczne uszkodzenie, chronione przed promieniami UV, wysoką temperaturą, kontaktem z rozpuszczalnikami i benzyną

Odporność na alkalia: $\leq 20\%$ (określana jako spadek wytrzymałości na rozciąganie po działaniu środowiska zasadowego)

Właściwości włókien, żywicy:

Rodzaj włókien: szklane

Średnice włókien: 5 μm do 12 μm

Materiał żywicy: epoksydowa

Właściwości prętów kompozytowych:

Moduł sprężystości przy rozciąganiu: 50 GPa

Wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie wzdłuż włókien: ≥ 200 MPa

Wytrzymałość charakterystyczna na ścinanie: ≥ 100 MPa

Pęzanie (spadek wytrzymałości na rozciąganie w skutek pęzania): $\leq 25\%$

Napężenia przyczepności do betonu C25/30 przy maksymalnej sile: ≥ 10 MPa

Tabela 22. Wytrzymałość na rozciąganie i waga prętów GFRP (wg producenta).

średnica , mm	wytrzymałość char. na rozciąganie, MPa	waga, g/m
6	≥ 1100	48
8	≥ 1100	86
10	≥ 1100	133
12	≥ 1000	192
14	≥ 1000	262

Załącznik nr 2 Właściwości B600B deklarowane przez producenta

Właściwości ogólne:

Kształt: pręty

Średnice: 10-32 mm

Składowanie: nie określono szczególnych warunków składowania

Właściwości prętów stalowych B600B:

Granica plastyczności: 600 – 750 MPa

Stosunek wytrzymałości na rozciąganie do gr. plastyczności: $\geq 1,10$

Wydłużenie całkowite przy maksymalnej sile: $\geq 6,0\%$

Wydłużenie względne: $\geq 12,0\%$

Odporność na odginanie: brak pęknięć

Tabela 23. Wytrzymałość na rozciąganie i waga prętów B600B (wg producenta)

średnica , mm	wytrzymałość char. na rozciąganie, MPa	waga, g/m
10	≥ 660	617
12	≥ 660	888
14	≥ 660	1210
16	≥ 660	1580

Załącznik nr 3 Właściwości włókien (LPPF) deklarowane przez producenta

Właściwości ogólne:

Rodzaj polimeru: Polipropylen

Kształt: włókna

Długość: 25 mm

Średnica: 0,69 mm

Kolor: biały

Właściwości włókien LPPF:

Wytrzymałość na rozciąganie : 500 MPa

Moduł sprężystości : 6,1 GPa

Temperatura topnienia : ≥ 160 °C

Temperatura zapłonu : ± 350 °C

Odporność chemiczna : wysoka

Załącznik nr 4 Wyniki próby rozciągania prętów zbrojeniowych kompozytowych GFRP

- badania przeprowadzono z zastosowaniem dwóch maszyn wytrzymałościowych:
 - maszyna wytrzymałościowa VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein, typ ZD 10/90,
 - maszyna Instron 8502 z wsparciem technologii CKO (cyfrowa korelacja obrazu).
- celem badania było wyznaczenie podstawowych wskaźników, charakteryzujących własności wytrzymałościowe i plastyczne zbrojenia kompozytowego GFRP:
 - określenie naprężenia niszczenia prętów;
 - określenie modułu sprężystości materiału prętów (GFRP);
 - potwierdzenie doboru składu kleju do zakotwienia pręta w rurze.
- pręty kompozytowe osadzono w rurze stalowej o średnicy 22 mm, grubość ścianki 3 mm, stal zwykła.
- zastosowano klej do wypełnienia przestrzeni między rurką a prętem został przyjęty: Epidian 5 z dodatkiem czystego piasku kwarcowego "sito 1", ze stosunkiem masy kleju do masy piasku - 1/1, 5.
- próbę rozpoczęto od przyłożenia obciążenia 5 kN, stopniowo zwiększano w kolejnych krokach o 5 kN aż do zniszczenia próbki.
- wyniki badań Badanie przeprowadzonych w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein, typ ZD 10/90.

Tabela 24. Wyniki badań wytrzymałościowych.

Wyniki badań mechanicznych zbrojenia kompozytowego GFRP				
Średnica pręta [mm]	Oznaczenie	Ilość próbek	Rm [MPa]	E [MPa]
8	SPK 8	34	726,51	34 414*

*- wynik modułu sprężystości na podstawie wyników 18 próbek

- Badanie przeprowadzone w maszynie Instron 8502

Tabela 25. Wyniki badań wytrzymałościowych.

Wyniki badań mechanicznych zbrojenia kompozytowego GFRP				
Średnica pręta [mm]	Gatunek stali	Ilość próbek	Rm [MPa]	E [MPa]
7	SPK 7	34	861	47 200*

*- wynik modułu sprężystości na podstawie wyników 18 próbek



Rys. 37. Zbrojenie GFRP poddane badaniu.

Załącznik nr 5 Wyniki próby rozciągania prętów zbrojeniowych ze stali wysokiej wytrzymałości B600B

- Badanie przeprowadzone w maszynie wytrzymałościowej VEB Thüringer Industriewerk Rauenstein, typ ZD 10/90.

Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020-05.

Celem badania było wyznaczenie podstawowych wskaźników, charakteryzujących własności wytrzymałościowe i plastyczne stali B600B takich jak (oznaczenie wg normy (PN-B-03264:1999)):

- charakterystyczna granica plastyczności stali zbrojeniowej f_{yk} (R_m));
- granica plastyczności stali zbrojeniowej f_y (R_e));

Wyniki badania przedstawiono w tabeli 26 poniżej:

Tabela 26. Wyniki próby rozciągania prętów ze stali B600B.

Wyniki badań mechanicznych stali zbrojeniowej				
Średnica pręta [mm]	Gatunek stali	Ilość próbek	F_y [MPa]	F_{yk} [MPa]
10	B600B	3	613,28	704,53
12	B600B	3	648,81	744,19



Rys. 38. Obraz zniszczenia stali zbrojeniowej #10 B600B.

- Badanie przeprowadzone w maszynie Instron 8502 z wsparciem technologii CKO (cyfrowa korelacja obrazu).

Tabela 27. Wyniki próby rozciągania prętów ze stali B600B

Wyniki badań mechanicznych stali zbrojeniowej					
Średnica pręta [mm]	Gatunek stali	Ilość próbek	Fy [MPa]	Fyk [MPa]	E [MPa]
10	B600B	13	590	675	209 030*

*- wynik modułu sprężystości na podstawie wyników 6 próbek



Rys. 39. Widok prętów po zniszczeniu w badaniu przeprowadzonych z zastosowaniem urządzenia Instron 8502 oraz systemu CKO (cyfrowej korelacji obrazu).

Załącznik nr 6 Wyniki badań niszczących próbek betonu użytych do zabetonowania płyt z zastosowaniem zbrojenia GFRP

Do zabetonowania płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP użyto betonu :

- Dla płyt grupy IV i V – betonu zwykłego
- Dla płyty grupy VI – betonu specjalnego wysokiej wytrzymałości z zastosowaniem kruszywa bazaltowego

Tabela 28. Wyniki badań niszczących próbek betonu (na kostkach 15x15x15 cm) użytych do zabetonowania płyt zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP.

nr próbki	Grupa płyt	wymiar płyty	fck, MPa
1	VI (płyta K100-5)	200x50x10	56,06
2	VI (płyta K100-5)	200x50x10	59,54
3	VI (płyta K100-5)	200x50x10	57,73
średnia dla serii VI – beton zwykły			57,78
4	VI (płyta K100-6)	200x50x10	109,46
5	VI (płyta K100-6)	200x50x10	111,03
6	VI (płyta K100-6)	200x50x10	118,00
średnia dla serii VI – beton specjalny			112,82

Tabela 29. Wyniki badań niszczących próbek betonu (na walcach śr. 15/ wys. 30 cm) użytych do zabetonowania płyt zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP.

nr próbki	Grupa płyt	wymiar płyty	fck, MPa
1	IV	200x50x10	42,25
2	IV	200x50x10	39,17
średnia dla serii IV			40,71
3	V	200x50x10	62,44
4	V	200x50x10	62,39
średnia dla serii V			62,41

Załącznik nr 7 Wyniki badań niszczących próbek betonu użytych do zabetonowania płyt z zbrojeniem wysokiej wytrzymałości B600B

Do zabetonowania płyt betonowych grupy I, II i III z zbrojeniem wysokiej wytrzymałości B600B użyto betonu o wynikach wytrzymałości j.n.

Tabela 30. Wyniki badań niszczących próbek betonu (na kostkach 15x15x15 cm) użytych do zabetonowania płyt zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom.

nr próbki	seria płyt	wymiar płyty	fck, MPa
1	I	200x50x8	55,355
2	I	200x50x8	52,876
3	I	200x50x8	55,27
4	I	200x50x8	56,377
5	I	200x50x8	54,884
6	I	200x50x8	56,199
średnia dla serii I			55,160
7	II	200x50x10	57,714
8	II	200x50x10	54,941
9	II	200x50x10	55,048
10	II	200x50x10	58,72
11	II	200x50x10	55,36
12	II	200x50x10	57,65
średnia dla serii II			56,572
13	III	200x50x12	52,576
14	III	200x50x12	54,984
15	III	200x50x12	52,118
16	III	200x50x12	56,07
17	III	200x50x12	57,92
18	III	200x50x12	59,43
średnia dla serii III			55,516
średnia dla badania			55,750

Załącznik nr 8 Wyniki badań wytrzymałościowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia stalowego wysokiej wytrzymałości B600B

Tabela 31. Wyniki badań eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom – nośność płyt

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Mrd,eksp
[-]	[-]	[-]	%	kNm
I	S80-1	2φ10 B600B	0,79	4,98
	S80-2	6φ12 B600B	3,40	16,90
	S80-3	11φ12 B600B	6,22	19,08
II	S100-1	2φ10 B600B	0,63	6,90
	S100-2	6φ12 B600B	2,72	22,00
	S100-3	11φ12 B600B	4,98	28,62
III	S120-1	2φ10 B600B	0,52	6,90
	S120-2	6φ12 B600B	2,26	28,00
	S120-3	11φ12 B600B	4,15	37,10



Rys. 40. Obraz zniszczenia płyty o małym stopniu zbrojenia.



Rys. 41. Obraz zniszczenia płyty o dużym stopniu zbrojenia.



Rys. 42. Przygotowanie próbek do badań.

Tabela 32. Wyniki badań eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom – wartość momentu zginającego przy maksymalnym dopuszczalnym ugięciu ($L/250=2000/250=8$ mm).

Grupa	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Ma,lim
[-]	[-]	[-]	%	kNm
I	S80-1	2φ10 B600B	0,79	2,34
	S80-2	6φ12 B600B	3,40	2,86
	S80-3	11φ12 B600B	6,22	3,45
II	S100-1	2φ10 B600B	0,63	3,18
	S100-2	6φ12 B600B	2,72	4,60
	S100-3	11φ12 B600B	4,98	7,29
III	S120-1	2φ10 B600B	0,52	5,84
	S120-2	6φ12 B600B	2,26	7,41
	S120-3	11φ12 B600B	4,15	12,66

Tabela 33. Wyniki badań eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych stalą wysokiej wytrzymałości B600B poddanych badaniom – wartość momentu zginającego powodującego zarysowanie.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	M crack
[-]	[-]	[-]	%	kNm
I	S80-1	2 ϕ 10 B600B	0,79	2,30
	S80-2	6 ϕ 12 B600B	3,40	1,92
	S80-3	11 ϕ 12 B600B	6,22	3,17
II	S100-1	2 ϕ 10 B600B	0,63	3,45
	S100-2	6 ϕ 12 B600B	2,72	1,92
	S100-3	11 ϕ 12 B600B	4,98	3,17
III	S120-1	2 ϕ 10 B600B	0,52	6,14
	S120-2	6 ϕ 12 B600B	2,26	5,75
	S120-3	11 ϕ 12 B600B	4,15	7,29

Załącznik nr 9 Wyniki badań wytrzymałościowych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP

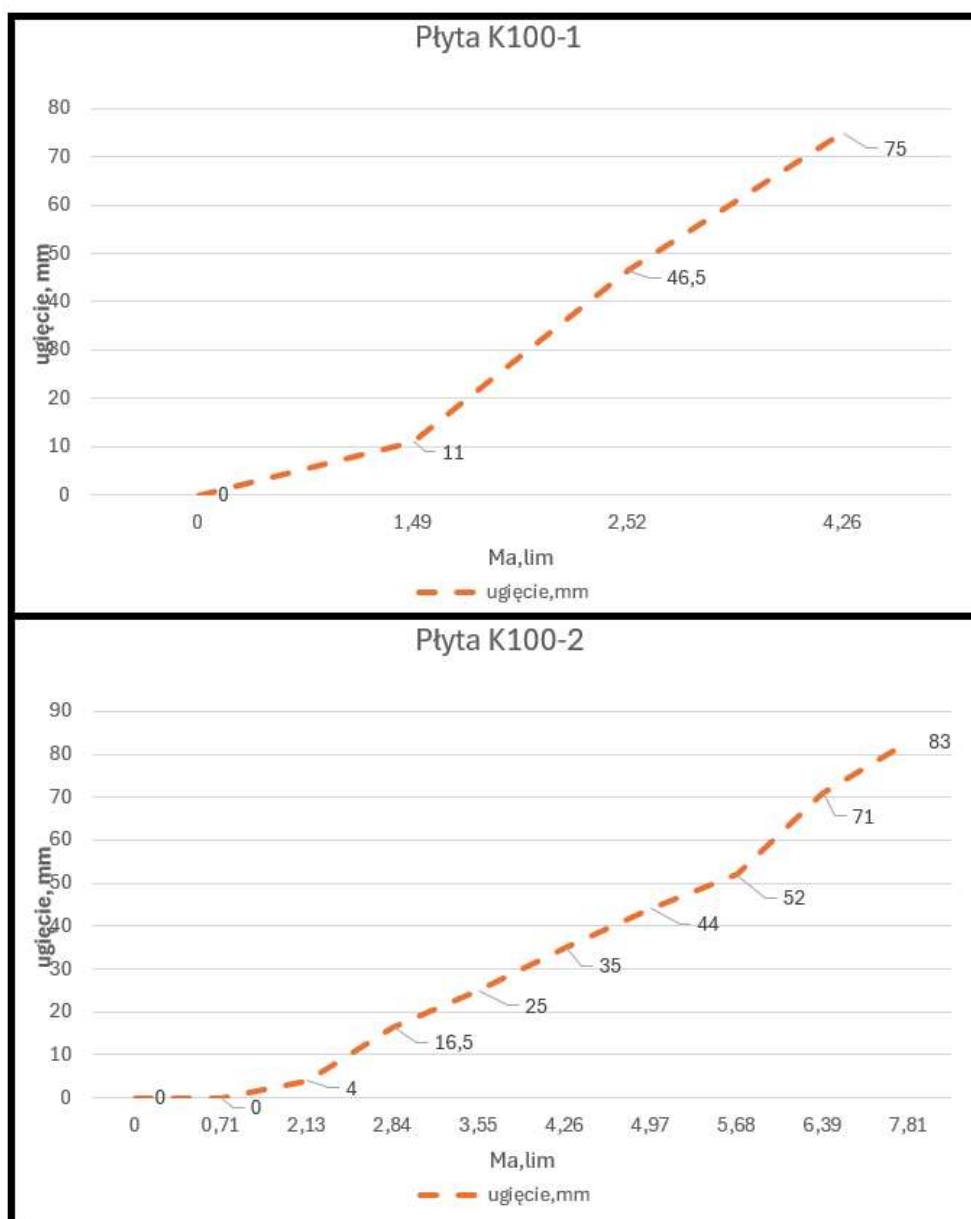
Tabela 34. Wyniki badań eksperymentalnych płyt betonowych z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP poddanych badaniom.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Mu, eksp.
[-]	[-]	[-]	%	kNm
IV	K100-1	2φ8 GFRP	0,40	4,26*
	K100-2	11φ8 GFRP	2,22	8,31
V	K100-3	2φ10 GFRP	0,39	6,39*
	K100-4	10φ10 GFRP	1,96	29,82*
VI	K100-5	6φ8 GFRP	1,20	6,04
	K100-6	6φ8 GFRP	1,20	10,69

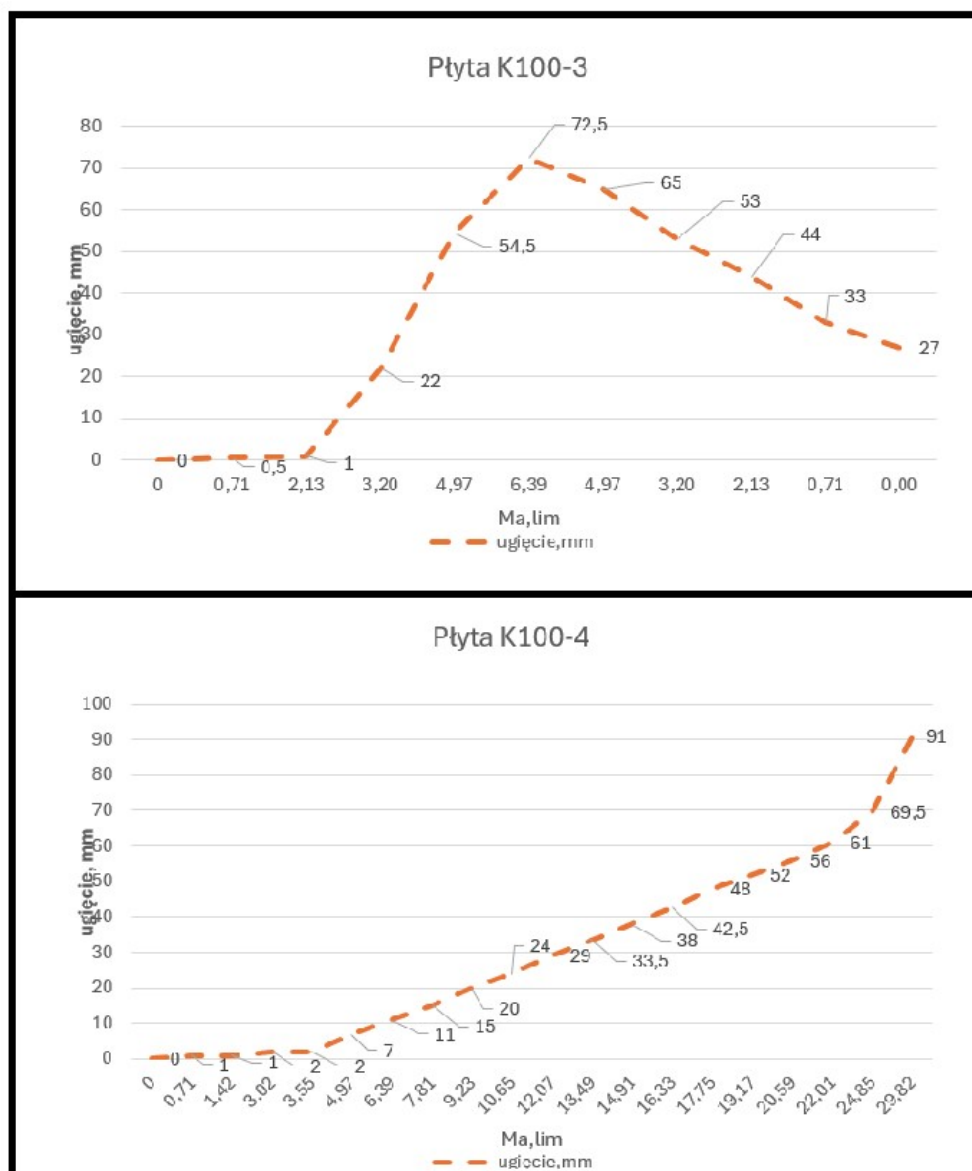
*płyta nie uległa zniszczeniu w skutek przyłożonego obciążenia

Tabela 35. Wyniki badań eksperymentalnych płyt betonowych zbrojonych kompozytem GFRP poddanych badaniom – wartość momentu zginającego przy ugięciu przyjętym jako graniczne $\Delta=8\text{mm}$.

Grupa.	Płyta	Zbrojenie podłużne	Stopień zbrojenia	Ma, lim, exp.
[-]	[-]	[-]	%	kNm
IV	K100-1	2φ8 GFRP	0,40	1,08
	K100-2	11φ8 GFRP	2,22	2,36
V	K100-3	2φ10 GFRP	0,39	2,49
	K100-4	10φ10 GFRP	1,96	5,33
VI	K100-5	6φ8 GFRP	1,20	3,46
	K100-6	6φ8 GFRP	1,20	8,55



Rys. 43. wykres ugięć dla płyt K100-1 i K100-2 (grupa IV).



Rys. 44. wykres ugięć dla płyt K100-3 i K100-4 (grupa V).

Tabela 36. Wyniki badań eksperymentalnych płyty K100-1 – rozwój rys.

Mcrack, kNm	Rysa 1, mm	Rysa 2, mm	Rysa 3, mm	Rysa 4, mm	Rysa 5, mm
1,78	2,0				
2,13	2,0				
2,52	3,5	3,0	1,5		
4,26	4,0	4,0	3,0	3,0	1,5

Tabela 37. Wyniki badań eksperymentalnych płyty K100-2 – rozwój rys.

Mcrack, kNm	Rysa 1, mm	Rysa 2, mm	Rysa 3, mm	Rysa 4, mm	Rysa 5, mm
2,13	0,75	0,50			
2,84	0,90	1,00	0,50		
3,55	1,00	1,50	0,50	0,50	
4,26	1,30	1,90	0,50	1,00	0,50
4,97	1,70	2,20	0,50	1,10	0,50
5,68	2,00	2,30	0,50	2,50	0,50
6,39	2,50	ukrusz	0,50	3,00	0,50
7,81	2,00		0,50	4,20	0,50

Tabela 38. Wyniki badań eksperymentalnych płyty K100-3 – rozwój rys.

Mcrack, kNm	Rysa 1, mm	Rysa 4, mm	Rysa 5, mm	Rysa 6, mm	Rysa 7, mm	Rysa 9, mm	Rysa 10, mm
3,20	1,00	1,00	1,00				
4,97	1,50	1,70		1,00	0,50	1,10	2,20
6,39	2,00	2,30		1,50	1,00	1,50	urkusz
4,97	1,70	2,00		1,30	0,90	1,10	
3,20	1,50	1,70		1,00	0,80	0,60	
2,13	1,20	1,35		0,90	0,60	0,50	
0,71	0,80	1,00		0,60	0,50	0,50	
0,00	0,70	0,90		0,50	0,40	0,50	

Tabela 39. Wyniki badań eksperymentalnych płyty K100-4 – rozwój rys.

Mcrack, kNm	Rysa 1, mm	Rysa 2, mm	Rysa 3, mm	Rysa 4, mm	Rysa 5,mm
6,39	0,1				
7,81	0,15				
9,23	0,2				
10,65	0,3				
12,07	0,3				
13,49	0,4				
14,91	0,5				
16,33	0,5				
17,75	0,5				
19,17	0,5				
20,59	0,6				
22,01	0,8				
24,85	0,9				



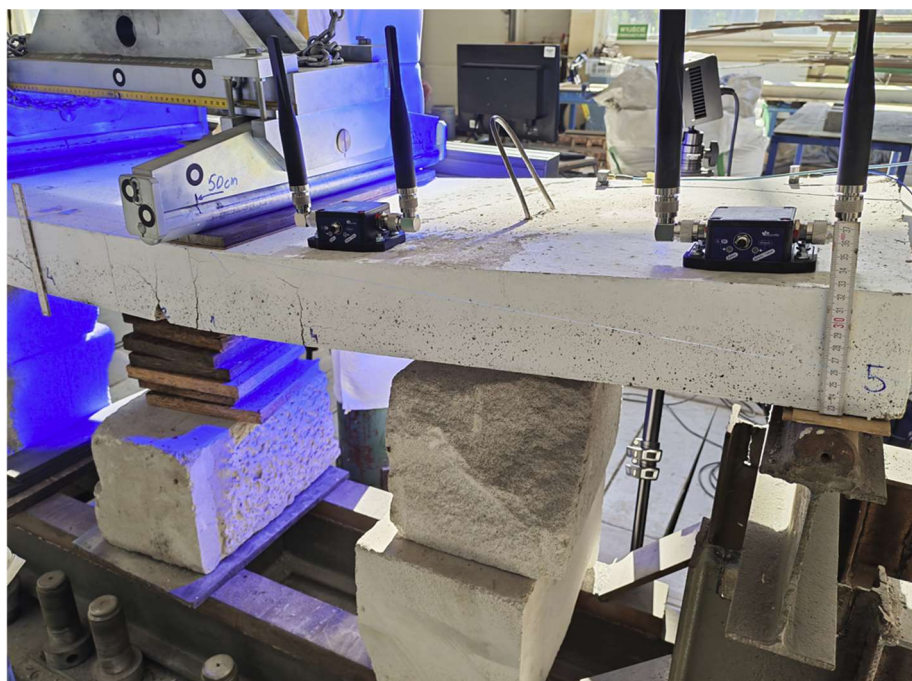
Rys. 45. Przygotowanie próbek do badań.



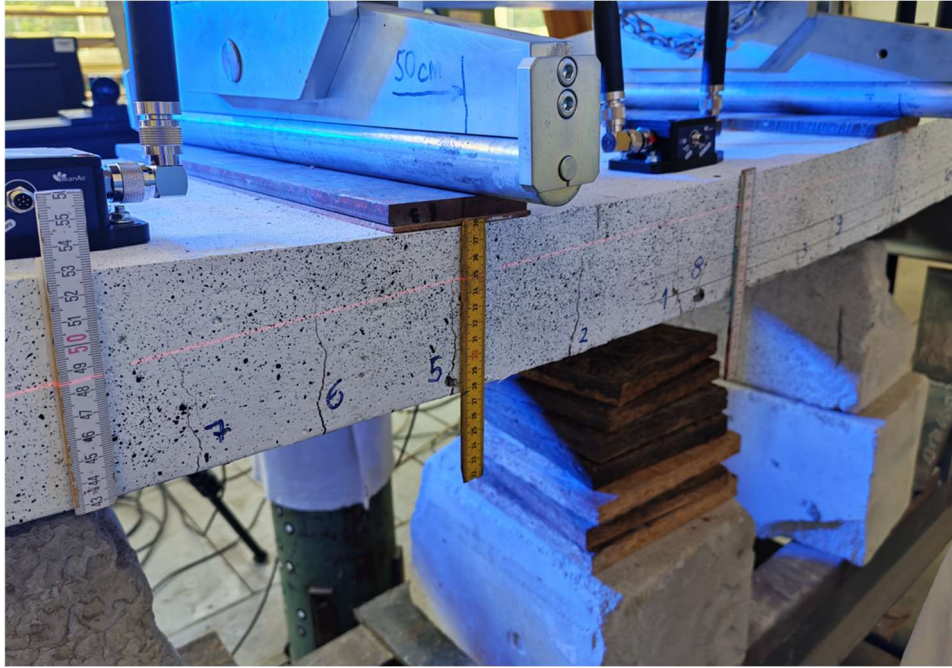
Rys.46 Przygotowanie próbek do badań.



Rys. 47. Płyta K100-1 - rysy (grupa IV).



Rys. 48. Płyta K100-2 - rysy (grupa IV).



Rys. 49. Płyta K100-3 - rysy (grupa V).



Rys. 50. Płyta K100-4 - rysy (grupa V).



Rys. 51. Obraz zniszczenia – płyta K100-5.



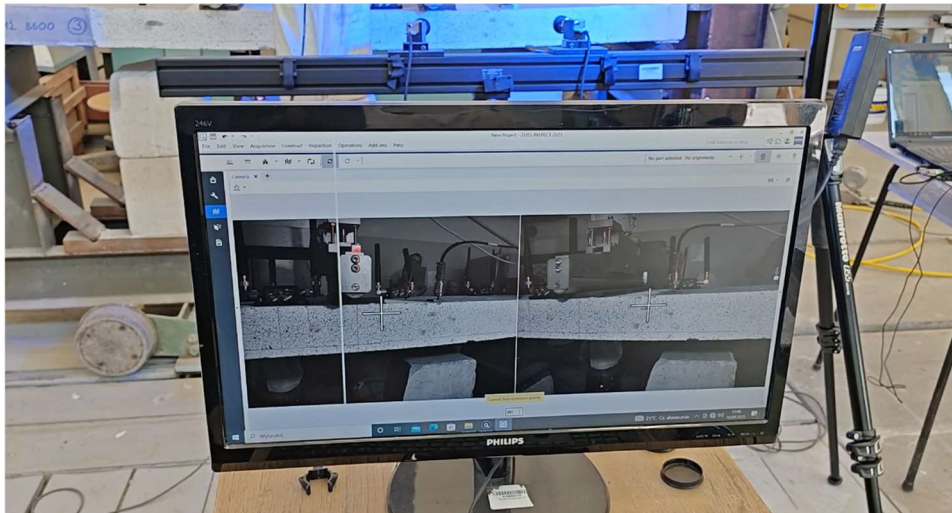
Rys.52. Obraz zniszczenia – płyta K100-2.



Rys. 53. Monitorowanie rys płyt GFRP.



Rys. 54. Pomiar ugięcia płyt GFRP.



Rys. 55. Obraz z systemu Digital Image Correlation – płyty GFRP.



Rys. 56 System pomiarowy (u dołu system SCADA LMS Siemens analizy dynamicznej, z prawej DIC – Zeiss wraz z kamerami 3D: system cyfrowej korelacji obrazu) – płyty GFRP.

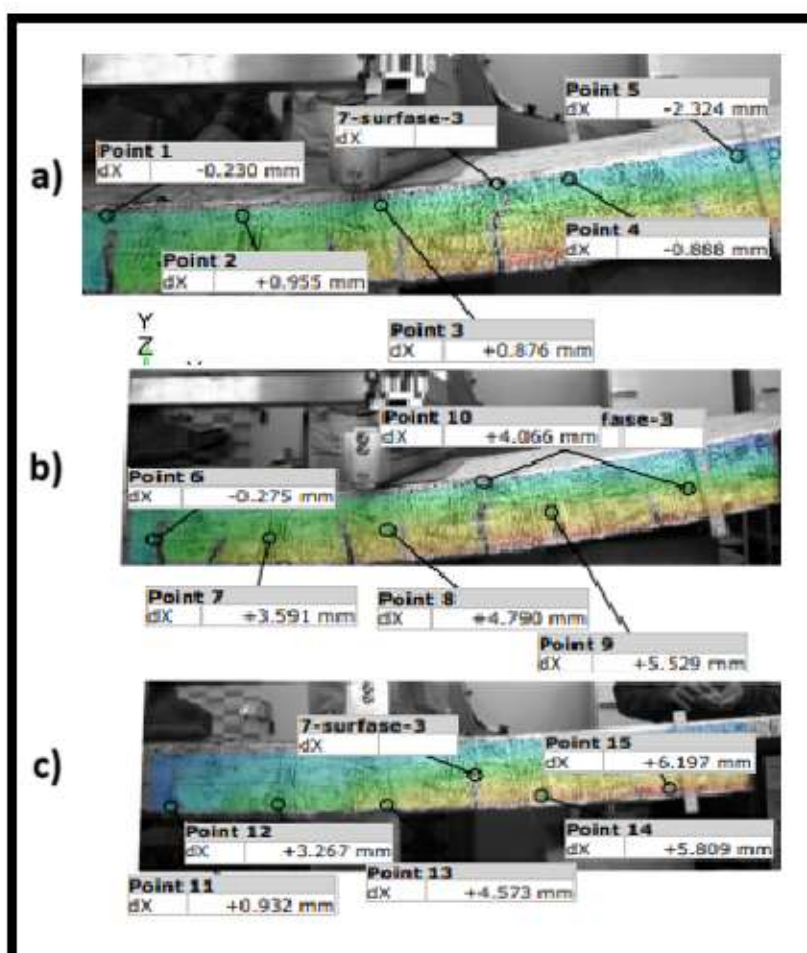


Rys. 57. System pomiarowy – kamery 3D – płyty GFRP.

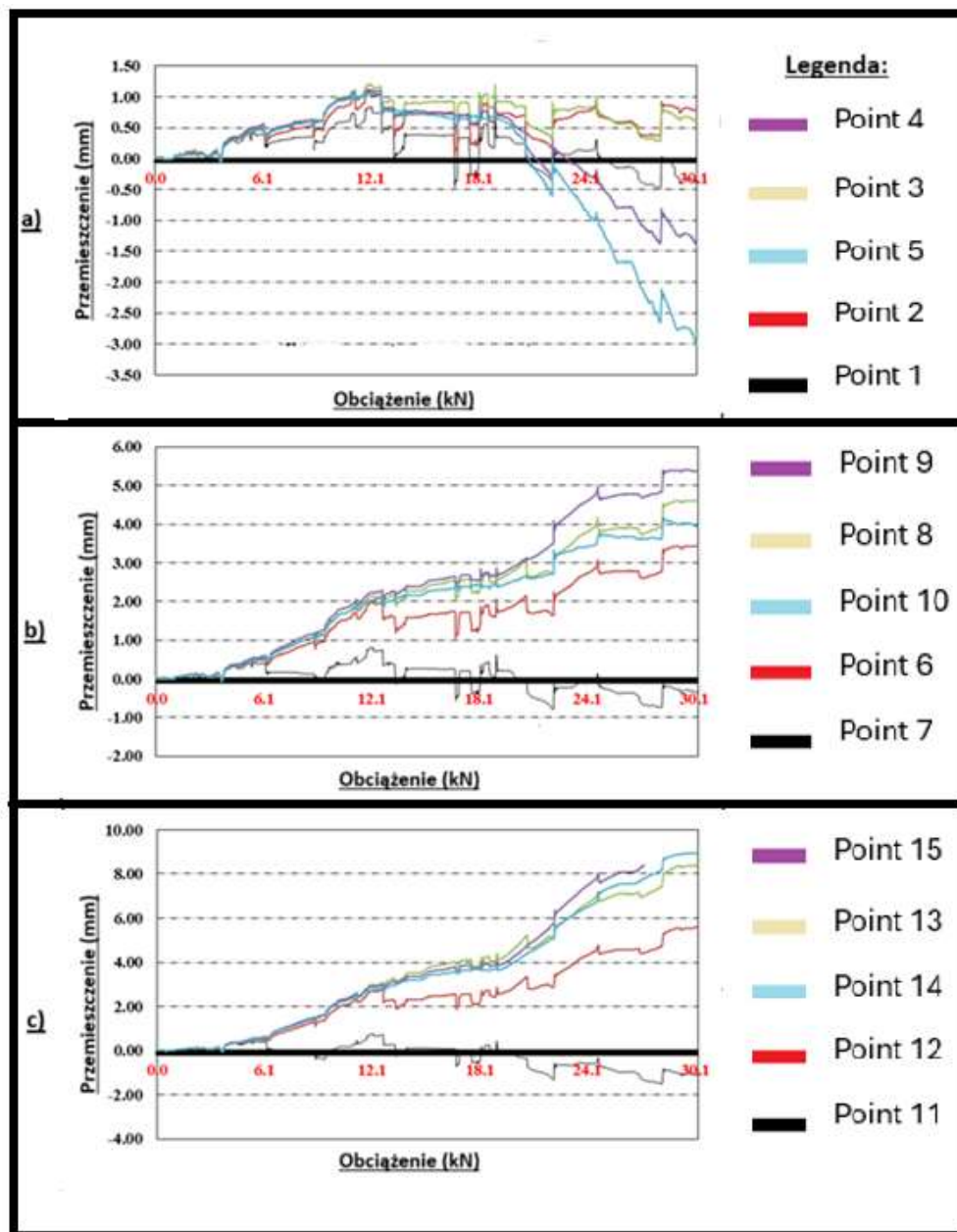
Załącznik nr 10 Wyniki badań wytrzymałościowych płyty betonowej z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego GFRP oraz włókien polipropylenowych LPPF (serii VI)

Wyniki przeprowadzonych szczegółowych badań eksperymentalnych płyty K100-6 przedstawiono w zakresie analizy przemieszczeń oraz charakterystyce powstałych rys w płycie żelbetowej zbrojonej długimi włóknami polipropylenowymi (LPPF).

Przemieszczenia w kierunku X (ugięcia)



Rys. 58. Obraz przemieszczeń płyty K100-7 pod obciążeniem w kierunku X a) górna powierzchnia płyty b) środek płyty c) dolna powierzchnia płyty.



Rys. 59. Wykres zmiany przemieszczeń w miarę wzrostu obciążenia w kierunku X a) górna powierzchnia płyty b) środek płyty c) dolna powierzchnia płyty.