

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa LASKA**  
**pt. „Efektywność wzmacniania żelbetowych elementów na zginanie wstępnie**  
**naprężonymi taśmami z włóknami węglowymi”**  
opracowana zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii  
Środowiska Politechniki Łódzkiej, na podstawie zlecenia z dnia 6 listopada 2015r.

## 1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa przedstawiona do recenzji zawiera 141 stron podstawowego tekstu oraz 127 stron załączników. Pracę podzielono na 8 rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem, spisem rysunków i tablic oraz wykazem oznaczeń, a na zakończenie części podstawowej podano wykaz cytowanej literatury – 61 pozycji – oraz przywołanych norm – 7 pozycji. Załączniki podzielono na 8 części, zawierających zestawienia grup wyników badań.

Jako tezę ogólną pracy określił Autor wykazanie wysokiej efektywności wzmocnień zginanych elementów żelbetowych za pomocą naprężonych kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami węglowymi (CFRP), także przy silnym obciążeniu elementów przed wzmocnieniem.

Dla potwierdzenia tej tezy Doktorant postawił sobie w pracy cztery cele badawcze dotyczące żelbetowych elementów zginanych:

- 1<sup>0</sup> - analizę wpływu obciążenia elementów przed wzmacnianiem na skuteczność wzmocnienia i wykorzystanie granicznej odkształcalności taśm CFRP;
- 2<sup>0</sup> - analizę wpływu stopnia zbrojenia zwykłego w elementach wzmacnianych;
- 3<sup>0</sup> - analizę wpływu zastosowania kleju łączącego wzmocnienia z elementem;
- 4<sup>0</sup> - opracowanie modelu obliczeniowego do projektowania wzmocnień z uwzględnieniem historii obciążenia przed wzmocnieniem.

Kolejne rozdziały pracy obejmują następujące treści:

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie, oraz sformułowanie celu i zakresy pracy.

Rozdział 2 stanowi zbiór informacji o sposobach wzmacniania elementów żelbetowych na zginanie za pomocą naprężanych polimerów zbrojonych włóknami (FRP), łącznie z omówieniem stosowanych materiałów i urządzeń do naciągu i kotwienia, jakie uzyskały dotąd zastosowanie techniczne na świecie i w kraju.

Rozdział 3 zawiera obszerny i chyba kompletny na chwilę obecną stan wiedzy w zakresie badań zginanych elementów żelbetowych wzmocnionych naprężonymi kompozytami FRP. Scharakteryzowano 18 grup badań dokonanych w różnych ośrodkach na świecie i opublikowanych w latach 1998 – 2014, w tym badanie w ośrodku gliwickim (2008) i w ośrodku łódzkim (2001).

Rozdział 4 prezentuje program badań własnych wraz z opisem stanowiska, elementów, systemu wzmocnienia i metod pomiarowych.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań materiałów zastosowanych w badaniach oraz syntetycznie zestawione - jakościowe i ilościowe wyniki badań elementów.

Rozdział 6 obejmuje analizę uzyskanych wyników pod kątem realizacji postawionych na wstępie celów pracy.

W rozdziale 7 omówił Autor dwa rozważone modele obliczeniowe dla wzmocnionych elementów żelbetowych, jeden bardziej teoretyczny i zaawansowany – oparty na nieliniowej analizie elementów żelbetowych i drugi – uproszczony, określony jako inżynierski. Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą tych modeli porównano z wynikami badań.

Wreszcie rozdział 8 zawiera wnioski pracy oraz założenia dalszych badań zamierzone przez Autora.

Obszerne załączniki zawierają zestawienia wyników badań obcych oraz – kolejno dla badanych 7 elementów szczegółowe wyniki badań własnych, przywoływane w podstawowej części rozprawy.

## 2. Ogólna ocena wartości pracy

Tematyka pracy jest aktualna, jako że problemy wzmocniania konstrukcji za pomocą polimerów wzmocnionych włóknami, w tym głównie taśmami CFRP, są współcześnie przedmiotem intensywnych badań, w związku z rozwojem zastosowań tych nowoczesnych metod wzmocniania w praktyce.

Kwestia wzmocniania konstrukcji w różnym stopniu obciążonych przed zabiegami wzmocniającymi jest czasem przedmiotem wątpliwości co do skuteczności, wyrażanych w gronie projektantów i realizatorów wzmocnień. Dotyczy to zarówno strony jakościowej, czyli zachowania się takich konstrukcji, jak też ilościowej, czyli jak dobierać wzmocnienie w odniesieniu do różnie obciążonych elementów. Chodzi o wątpliwości czy należy odciążać konstrukcje przed zabiegiem wzmocniania, czy nie jest to konieczne.

W stosunku do tradycyjnego żelbetu, a także elementów sprężonych ciągniami stalowymi, problem analizy zginanych elementów żelbetowych, wzmocnionych za pomocą dołączanych elementów polimerowych zbrojonych włóknami, polega na współdziałaniu trzech materiałów o znacząco różnej charakterystyce. Mamy bowiem obok materiału kruchego, o nieliniowej charakterystyce, jakim jest beton, materiał ciągliwy i przechodzący w fazę plastyczności – jakim jest stal zbrojeniowa, a do tego trzeci materiał – polimer zbrojony włóknami, o prawie idealnie liniowej charakterystyce i ograniczonej zdolności odkształceń.

Dlatego konieczne są różne badania i bazujące na ich wynikach próby ujęć analitycznych, prowadzące do racjonalnych metod projektowania. Pamiętajmy, że dzisiejszy zaawansowany poziom teorii żelbetu, był poprzedzony blisko 150-letnim okresem badań i doskonalenia modeli obliczeniowych. Historia szerszych badań elementów z udziałem FRP ma niespełna trzy dekady, a monitorowane zastosowania mniej niż ćwierćwiecze.

Jeśli chodzi o zastosowania sprężenia za pomocą materiałów FRP do czynnych wzmocnień elementów żelbetowych – jak przedstawił Autor w rozprawie – to historia liczy niewiele ponad 20 lat, wliczając w to okres nieśmiałych początków w połowie lat 1990-tych. Tutaj bowiem barierą były nie tylko same materiały FRP i ich początkowo bardzo wysokie koszty, ale przede wszystkim urządzenia do naciągu, pozwalające bezpiecznie uchwycić i trwale połączyć ze wzmocnianymi elementami ciągną FRP, z reguły taśmy zbrojone włóknami węglowymi.

Trafne zestawienie dotychczasowych badań elementów wzmocnianych i urządzeń stosowanych do naciągu, jakie zawarł Autor w rozdziałach 2 i 3 pracy stanowi wartościową część pracy i dowodzi starannego przestudiowania wielu publikacji oraz przedstawienia ich syntezy, wraz z komentarzem.

Oceniając wstępną część pracy warto podkreślić, że Autor odpowiednio określił walory wzmocniania czynnego, za pomocą naprężonych cięgien, w stosunku do wzmocniania biernego, za pomocą dołączanych podobnych cięgien bez naciągu. Podkreślił mianowicie, że zalety wzmocnienia czynnego dotyczą przede wszystkim poprawy użyteczności, czyli w żelbetowych elementach zginanych – prowadzą do redukcji ugięć i zwiększenia

rysoodporności. W zakresie nośności korzyści są niewielkie w porównaniu do biernych wzmocnień, za pomocą podobnie zakotwionych ciągów FRP bez ich naciągu. I z uwagi na nośność stosowanie złożonych operacji naciągu nie znajduje zwykle uzasadnienia ekonomicznego. Podkreślam tę kwestię dlatego, że Doktorant pokazał, że rozumie różnice mechanizmu wzmocnienia czynnego i biernego. Przez szereg lat pokutowały bowiem w tej sprawie tyleż kateryczne, co błędne stwierdzenia, że stosujemy wzmocnienie czynne z uwagi na zwiększenie nośności i użyteczności.

Program badań własnych, dostosowany do postawionych celów, ograniczono do elementów o jednakowym obrysie przekroju  $b \times h = 500 \times 220$  mm i o rozpiętości 6,0 m. Były to więc płaskie elementy belkowe, choć w pracy niezbyt precyzyjnie nazywano je płytami. Nie wyjaśniono przyczyny doboru tak nietypowych elementów.

Łącznie poddano badaniom 7 takich elementów, w których zmieniano zwykle zbrojenie stalowe strefy rozciąganej, stopień obciążenia przed wzmocnieniem oraz sposób zakotwienia taśmy CFRP. Zastosowano jednakowe taśmy o przekroju  $1,2 \times 100$  mm.

Niezamierzone czynniki zmienne dotyczyły parametrów betonu w elementach (patrz Tablica 5.1) i różnic w charakterystyce wytrzymałościowej taśm CFRP (patrz Tablica 5.2).

W sumie podstawowe badania towarzyszące materiałom wykonano starannie i przedstawiono w sposób nie budzący wątpliwości. Wymaga to podkreślenia, bo nie jest to regułą w pracach badawczych i często przyjmowane są albo parametry podawane przez producenta, albo dokonuje się zbyt daleko idącego uśrednienia danych z pomiarów.

Nie przeprowadzono badania skuteczności systemu kotwienia, bazując na danych pomysłodawcy i producenta zakotwień, firmy S&P. Miało to istotne znaczenie, bo w badaniach elementów stwierdzono, że w systemie nie jest zapewnione pełne zakotwienie, przez co rozumiemy wcześniejsze zerwanie taśmy niż wysunięcie z zakotwień.

Siedem badanych elementów podzielono na trzy serie:

seria A – zawierała dwa elementy słabiej zbrojone, wzmacniane taśmą zakotwioną w płytach stalowych – jeden przyczepnością taśmy zapewnioną na długości, a drugi bez przyczepności; seria B – obejmowała trzy elementy słabiej zbrojone; dwa były analogiczne do serii A, ale silnie obciążone przed wzmocnieniem, a trzeci – bez dodatkowego obciążenia - był wzmocniony taśmą z przyczepnością zapewnioną na długości, jednak bez zakotwień końcowych;

seria C – zawierała dwa elementy silniej zbrojone, obydwa wzmocnione taśmą z zapewnioną przyczepnością i zakotwioną na końcach – jeden z elementów był dodatkowo obciążony przed wzmocnieniem.

Taki program badań nie zapewniał powtarzalnych badań, bo każde badanie obejmowało inne czynniki, ale stanowił dostateczne minimum do oceny jakościowej i ilościowej wpływu poszczególnych czynników. Oczywiście wnioskowanie uogólniające musi być w takim przypadku bardzo ostrożne i w analizie wyników badań Autor posunął się we wnioskach nieco zbyt daleko.

O ile wyniki badań materiałów i elementów zostały zamieszczone bardzo szczegółowo w tekście i w załącznikach, o tyle skrótowo potraktowano rozdział 7., zatytułowany „Modele obliczeniowe”, a zwłaszcza zastosowanie modelu bazującego na analizie nieliniowej elementów żelbetowej. Porównano wykresy moment-krzywizna wynikające z tej analizy z wynikami badań, ale nie podano sposobu dojścia do tych wykresów. W podsumowaniu tak podanego porównania zaznaczono, że opracowano program komputerowy do obliczania wzmocnionych elementów zginanych w całym przedziale obciążeń – nic więcej o takim oprogramowaniu nie można znaleźć w pracy, a tylko stwierdzono, cytując „...*stanowi jak dotąd jedyne narzędzie do projektowania tego typu wzmocnień*”.

Model nazwany inżynierskim, nawiązujący do uproszczonej metody normowej dla elementów zginanych, dotyczy jedynie określania nośności przekroju, a więc jest uproszczoną

propozycją uwzględniania wzmocnienia w stanie granicznym nośności. Choć porównanie tak obliczonej nośności i wyników doświadczalnych dla obciążenia niszczącego wypada dobrze, to jednak trzeba pamiętać, że ta zgodność dotyczy tego jednego, szczególnego typu elementu, o zdecydowanej przewodzie nośności strefy ściskanej nad rozciąganą.

Wnioski zbiorcze podane w rozdziale 8. stanowią zebranie wniosków częściowych zawartych w rozdziałach wcześniejszych. Obserwacje i wyniki badań są tu bezspornie znaczącym wkładem Autora do omawianej dziedziny.

### 3. Uwagi krytyczne

#### 3.1. Uwagi terminologiczne

W tekście rozprawy, jak wspomniano już wcześniej, określono elementy przyjęte do badań jako „płyty”, co odbiega od obowiązującej terminologii. Przez płyty rozumiemy elementy, w których wymiar grubości jest znacznie mniejszy od szerokości i długości.

O ile nazwa elementu może być dyskusyjna, o tyle zdecydowanie niepoprawne jest wielokrotne używanie terminu „wytężenie” jako synonimu terminu „obciążenie” lub procent nośności. A już całkiem chybione są np. sformułowania następujące - cytuję:

- „*obciążenie odpowiadające wytężeniu na poziomie 25% nośności elementu.*” (str 128), zamiast „obciążenie odpowiadające 25% nośności elementu”,
- lub „*Elementy wzmocnione pod większym wytężeniem, stanowiącym 76% nośności elementu niewzmocnionego.*”, zamiast „Elementy wzmocnione pod działaniem znacznego obciążenia stanowiącego 76% nośności elementu niewzmocnionego” (str. 113).

Podkreślam to dlatego, że takie sztuczności językowe zaczynają od niedawna być w obiegu publikacji z naszego obszaru. Choćby przez szacunek dla pamięci polskich profesorów Hubera lub Burzyńskiego, powinniśmy dbać o poprawność w tym zakresie, bowiem oni to rozwijali hipotezy wytężeniowe w wytrzymałości materiałów, a chodziło o kombinację działania naprężeń normalnych i stycznych. Termin wytężenie pozostawmy więc dla analizy naprężeń, a nie stosujmy dla stopnia wykorzystania nośności elementu lub całej konstrukcji.

W ogólnym omówieniu materiałów do wzmacniania konstrukcji podano termin „*materiały termoutwardzalne*” w odniesieniu np. do żywic poliestrowych, winylowych, czy epoksydowych. Choć czasem przy utwardzaniu tych materiałów stosuje się - jako dodatkowe - metody przyspieszającej obróbki termicznej, to jednak są to „materiały chemoutwardzalne”, czego dowodzi ich utwardzanie po zmieszaniu (dwóch) składników i skuteczne twardnienie w normalnej temperaturze.

#### 3.2. Uwagi do programu badań

Mając na uwadze ograniczenia możliwego zakresu badań należało ograniczyć liczbę czynników zmiennych, a wprowadzić badania porównawcze elementów. Na przykład, zamiast zmiany stopnia zbrojenia elementów, dużo bardziej pożyteczne byłoby badanie jednakowo zbrojonych elementów, wzmacnianych w sposób bierny i czynny, z analogicznym sposobem kotwienia i z przyczepnością na długości lub bez niej. Mogło to dotyczyć elementów pod różnym obciążeniem początkowym i przy różnej wartości siły sprężającej taśmę. Wyjaśniona byłaby kwestia przyrostu nośności w wyniku wzmocnienia czynnego, a także możliwe byłoby uzasadnienie celowości naprężenia ciągłych w konkretnych sytuacjach. Ale przede wszystkim dałoby to możliwość porównania rozwoju rys i ugięć, a więc efektywności wzmocnienia czynnego w tym zakresie.

Można sobie łatwo wyobrazić, że jeżeli najslabszym ogniwem w procesie zniszczenia były zakotwienia taśmy, to taki sam element, ale wzmocniony biernie może wykazać wyższą nośność niż element wzmocniony czynnie, bo przy sprężeniu taśmy wyczerpuje się znaczną

część zdolności kotwiącej zakotwienia. Taka możliwość występuje w zakotwieniach typu adhezyjno-tarciowego, jakie zastosowano w badaniach.

W pracy wspomniano, że zastosowany system S&P pozwala osiągnąć siły w taśmie odpowiadające odkształceniom 6‰ (str. 36), a tymczasem w programie badań przewidziano i zastosowano już przy samym naciągu niemal wyczerpanie tej wielkości, wywołując odkształcenia taśmy np. 5,2‰. Ponieważ przed zniszczeniem odkształcenia w taśmie sięgały przy zakotwieniach np. 11,8‰, (str. 115), to trudno się dziwić wysunięciu taśmy z zakotwień.

### 3.3. Uwagi do obserwacji zarysowań

W pracy nie przedstawiono obrazu zarysowań w elementach przed wzmocnieniem, w których obciążenie oszacowano na 76% obciążenia niszczącego. Poziom obciążenia świadczy o niewątpliwym zarysowaniu tych elementów przed wzmocnieniem – chodzi o trzy elementy, dwa słabiej zbrojone B12 i jeden silniej zbrojony B16. Tym samym nie wiadomo, czy wzmocnienie czynne spowodowało częściowe zmniejszenie rozwartości rys lub czy spowodowało przyrost rys w toku obciążania elementu wzmocnionego.

Przedstawiono i krótko opisano jedynie obraz zarysowania po zniszczeniu – nie wiadomo jakie rysy były pierwotne, a jakie powstały dopiero w fazie obciążenia niszczącego elementy wzmocnione.

Dziwi to o tyle, że jednym z celów pracy było określenie wpływu wcześniejszego obciążenia na zachowanie się elementów po wzmocnieniu.

### 3.3. Uwagi do badania ugięć

Problem zachowania się elementów silnie obciążonych przed wzmocnieniem, po dokonaniu ich wzmocnienia czynnego, jest w badaniach obarczony skutkami sposobu obciążenia. Wynika to z obciążenia za pomocą siłowników, co znacząco odbiega od praktycznych sytuacji obciążeń grawitacyjnych. Przyłożenie siły sprężającej nie może tu wywołać redukcji ugięcia, bowiem ruch powrotny jest zablokowany siłownikami. Pokazuje to rysunek 5.15, gdzie cofnięcie się ugięć jest znikome. W ten sposób efekt sprężenia jest sztucznie zredukowany. Dla celów praktycznych nie jest dla nas istotne ugięcie przy zniszczeniu, ale ugięcie pod obciążeniami użytkowymi. Najczęściej właśnie redukcja ugięć obciążonego elementu jest celem wzmocnienia czynnego, a nie ugięcia w fazie zniszczenia. Przy możliwym wystąpieniu ugięcia powrotnego bez ograniczenia siłownikami, wykres na rys. 5.16c wyglądałby znacznie korzystniej po względem efektu czynnego wzmocnienia elementu obciążonego.

### 3.4. Uwagi do interpretacji wyników badań nośności

Jak wynika z zestawienia w Tablicy 5.6 i zamieszczonego w niej opisu postaci zniszczenia, tylko jeden z elementów (B12-sp), słabiej zbrojony i wzmocniony sprężoną taśmą bez przyczepności, zniszczył się wskutek wyczerpania nośności strefy ściskanej i doszło do zmiążdżenia betonu. W sześciu pozostałych przypadkach doszło do utraty współpracy elementu ze wzmacniająca naprężoną taśmą – przez wysunięcie jej z zakotwień, a tam gdzie była przyklejona do betonu, także przez odspojenie.

Nie jest to zatem jednorodna próba wyników, pozwalająca na porównania nośności z obliczoną analitycznie nośnością przekroju. Wysuwanie taśmy z zakotwień ma duży – możliwy do ustalenia jedynie na drodze powtarzanych badań i oceny statystycznej – rozrzut wyników i wnosi silną przypadkowość pod względem zachowania się elementów w fazie zniszczenia. Wyniki nośności elementów wzmocnionych były w istocie w dużej mierze badaniem skuteczności zakotwień i próba ta nie okazała się pozytywna dla systemu.

Porównywanie wyników takich badań z wynikami obliczeń nośności według modelu, w którym nie uwzględnia się utraty współpracy wzmocnienia z elementem – stanowi materiał zaledwie orientacyjny, nie będący podstawą do weryfikacji metody obliczeń.

### 3.5. Uwagi do prób modelowania analitycznego

Jak wspomniano w ogólnej ocenie, zastosowanie modelu bazującego na analizie nieliniowej elementów żelbetowych zostało w rozprawie podane skrótowo i jedynie opisowo. Praktycznie podano tylko założenia, bez przykładowej ścieżki postępowania dla elementów z czynnym zbrojeniem kompozytowym. Nie można zatem ustosunkować się do poprawności adaptowania modelu opracowanego dla elementów żelbetowych - do elementów wzmocnionych w sposób czynny, czyli ze sprężeniem. Taka ekstrapolacja podstaw obcego modelu powinna być szczegółowo przedstawiona i przetestowana numerycznie dla różnych przypadków.

Już w tym niewielkim zakresie, w jakim przedstawiono adaptowany model nieliniowej analizy elementów żelbetowych znalazł się błąd w założeniach. W elementach wzmocnionych naprężoną taśmą, bez przyczepności tej taśmy na długości, jak to miało miejsce w dwóch badanych elementach, nie można zakładać zasady płaskości przekrojów (Bernoulliego). Brak współpracy ciągną wzmocniającego z elementem wzmocnianym na całej długości przeczy tej zasadzie, podobnie jak to ma miejsce w elementach sprężanych ciągnami bez przyczepności.

## 4. Uwagi redakcyjne

Praca jest napisana zwięźle, czytelnie podzielona na rozdziały i punkty, a zatem jest bardzo przyjazna dla czytelnika, jeśli pominąć wspomniane zbyt lakoniczne fragmenty. Najbardziej zwraca uwagę niewystarczające przedstawienie modelu obliczeniowego w p. 7.1, gdzie brak podania sposobu dojścia do wyników, dalej wspomnianych, nie pozwala ocenić poprawności tej metodyki.

Materiał graficzny, tablice wyników i porównań oraz objaśnienia oznaczeń podano starannie i kompletnie.

## 5. Podsumowanie recenzji

Podjęto znaczny wysiłek studialny i badawczy dotyczący wybranej tematyki wzmocniania elementów żelbetowych za pomocą polimerów zbrojonych włóknami węglowymi, czyli taśm CFRP.

Zarówno racjonalne zestawienie dotychczasowych prac w tym zakresie i ich skomentowanie, jak i wyniki badań elementów wybranych zgodnie z celami postawionymi w pracy, wnoszą określone wartości merytoryczne do rozwijanej współcześnie problematyki wzmocnień konstrukcji żelbetowych.

Podniesione uwagi krytyczne dotyczą szczegółowych kwestii programu badań, interpretacji wyników lub prób adaptacji metod analitycznych do obliczania wzmocnianych elementów żelbetowych. Niektóre wskazane usterki wynikają ze zbyt skróconej w kilku fragmentach formy przedstawienia.

W sumie jednak Doktorant wykazał dobre opanowanie warsztatu naukowego w zakresie prowadzenia złożonych badań i starannego opracowania ich wyników oraz – w znacznej przewadze zagadnień – poprawnego wnioskowania i prób uogólnień.

Wyrażam przekonanie, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Łaska zatytułowana “Efektywność wzmocniania żelbetowych elementów na zginanie wstępnie naprężonymi taśmami z włóknami węglowymi” zawiera oryginalne fragmenty rozwiązań problemu

naukowego i wskazuje na opanowanie przez Doktoranta warsztatu naukowego, a zatem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Art.13, pkt. 1, Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. Ustaw z 2003r. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi. zmianami).

Wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. M. M.' or similar, written in a cursive style.