

Dr hab. inż. Agnieszka Tomaszewska, prof. uczelni  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Katedra Mechaniki Budowli  
e-mail: atomas@pg.edu.pl

Gdańsk, 22 sierpnia 2023

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgra inż. Artura Matusiaka**

**pt. „Analiza wpływu powłoki z polimocznika na parametry wytrzymałościowe  
wybranych elementów konstrukcyjnych”**

Promotor: dr hab. inż. Jacek Szafran, prof. PŁ

### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Pana Przewodniczącego Rady do spraw Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej, prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina z dnia 16.06.2023.

### **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

#### **2.1. Struktura formalna**

Praca jest napisana w języku polskim. Obejmuje 136 stron maszynopisu podzielonego na 8 rozdziałów oraz 37 stron zawierających spis rysunków i tabel, bibliografię, listę osiągnięć Doktoranta i załączniki, którymi są karty techniczne powłok z polimocznika trzech producentów oraz potwierdzenia przyjęcia dwóch wniosków o udzielenie patentu przez Urząd Patentowy RP. W swojej rozprawie Doktorant odnosi się do 112 pozycji literaturowych oraz 15 norm projektowych i wytycznych. Wśród referencji znajdują się publikacje w czasopismach i materiałach konferencyjnych polskich i zagranicznych wydawnictw oraz książki wydane w języku polskim. Każdy rozdział Doktorant kończy podsumowaniem, co wpływa na dobre zrozumienie pracy.

#### **2.2. Krótkie przedstawienie treści rozprawy**

Praca zawiera analizę wpływu powłoki polimocznikowej na parametry wytrzymałościowe oraz zarysowanie elementów betonowych i żelbetonowych pod obciążeniem. We wprowadzeniu Doktorant przedstawia motywację do podjęcia tematu oraz krótko omawia treść pracy. W

kolejnym rozdziale mgr Matusiak przedstawia cel, zakres i tezy pracy. W rozdziale 3. Doktorant dokonuje przeglądu literatury w zakresie diagnostyki i napraw elementów konstrukcyjnych, po czym przedstawia technologię powłok polimocznikowych w zastosowaniach w budownictwie i innych gałęziach techniki oraz w badaniach naukowych. W rozdziale 4. mgr Matusiak opisuje badania próbek polimocznika, wyciętych z samodzielnie wykonanej membrany polimocznikowej. Doktorant identyfikuje podstawowe parametry wytrzymałościowe tego materiału, takie jak: naprężenie niszczące, wydłużenie przy zerwaniu i moduł sprężystości podłużnej. Doktorant wykonuje testy jednoosiowego rozciągania 13. wiosełkowych próbek materiału, w trzech seriach pomiarowych różniących się prędkością przemieszczenia. Autor pracy konkluduje, że moduł sprężystości badanych próbek zależy od prędkości przemieszczenia w teście – rośnie przy większej prędkości badania, natomiast wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne nominalne maleją wraz ze wzrostem prędkości badania. W badaniach tych Doktorant uzyskał dane potrzebne do obliczeń wykonanych w późniejszym etapie pracy, opisanych w rozdziale 7. Doktorant zastosował kamerę termowizyjną do obserwacji rozkładu temperatury na powierzchni rozciąganych elementów. Jest to ciekawa propozycja sposobu wykrywania nieciągłości materiału.

W rozdziale 5. Doktorant opisuje badania na ściskanie 13. walcowych próbek betonu komórkowego pokrytych polimocznikiem w dwojaki sposób – na całej powierzchni próbek lub bocznej. Autor szczegółowo opisuje stanowisko pomiarowe oraz proces nakładania polimocznika na próbki. Następnie Doktorant przedstawia wyniki pomiarów i dokonuje ich analizy konkludując m. in., że zastosowanie powłoki z polimocznika prowadzi do spadku wytrzymałości próbek na ściskanie i wyjaśnia przyczynę tego zjawiska.

W rozdziałach 6. i 7. mgr Matusiak opisuje badania elementów konstrukcyjnych w skali naturalnej, którymi są kolejno: kręgi betonowe (9 próbek) i belki żelbetowe o długości 3,6m (18 próbek). W obu przypadkach Autor dokładnie opisał sposób przygotowania próbek oraz stanowiska pomiarowe. Doktorant wykazał, że pokrycie obu powierzchni kręgu betonowego: zewnętrznej i wewnętrznej powłoką z polimocznika prowadzi do znacznego zwiększenia wytrzymałości kręgów betonowych na ściskanie. Część poświęcona belkom żelbetowym jest najobszerniejsza w pracy. Doktorant w ciekawy sposób wykorzystał możliwości optycznego systemu pomiaru pola przemieszczeń do identyfikacji rys belki pod powłoką z polimocznika. Badania belek z różnym stopniem zbrojenia wykazały znikomy przyrost wytrzymałości belek żelbetowych po zastosowaniu powłoki z polimocznika w porównaniu do belek bez tej powłoki. Natomiast, we wszystkich badaniach Autor obserwuje mostkowanie rys powłoką z polimocznika. Ta część badań jest uzupełniona obliczeniami teoretycznymi belek, dotyczącymi ich stanów granicznych nośności i użytkowania.

### **3. Szczegółowa ocena rozprawy**

#### **3.1 Ocena merytoryczna, uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne**

Doktorant podjął się realizacji ważnego i aktualnego tematu, dotyczącego analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcyjnych pokrytych nowoczesną powłoką z polimocznika. Bada, czy oprócz korzyści użytkowych zastosowania takich powłok (zabezpieczenie powierzchni przed degradacją) są korzyści wytrzymałościowe.

Praca ma charakter w większości eksperymentalny. Należy podkreślić duże znaczenie wykonanych badań, bowiem zwłaszcza te, wykonane w skali naturalnej najlepiej informują o mechanicznym zachowaniu elementów. W pracy o profilu eksperymentalnym kluczowe znaczenie ma rzetelny opis sposobu przygotowania próbek do badań, stanowiska pomiarowego oraz uzyskanych wyników. Autor bardzo dobrze wywiązuje się z tego zadania. Szczegółowo opisana jest technologia wykonania elementów do badań, a w opisie próbek belek żelbetowych podane są charakterystyki wytrzymałościowe użytych materiałów. Dobrze opisane są również stanowiska pomiarowe. Wyniki badań przedstawione są z dużą dokładnością – podano wykresy mierzonych wielkości dla wszystkich próbek oraz tabelarycznie zebrano wartości identyfikowanych wielkości. Wyjaśniono również sposób ich identyfikacji. W przypadku analizy belek żelbetowych, istotnym z punktu widzenia korzyści wytrzymałościowych zastosowania powłok z polimocznika, Doktorant wykonał dodatkowo obliczenia teoretyczne momentu rysującego i momentu niszczącego belkę żelbetową i taką samą belkę ale z powłoką z polimocznika. Autor uzyskał wysoką zgodność teoretycznych i eksperymentalnych momentów niszczących w każdym analizowanym przypadku.

W ogólności, praca napisana jest poprawnie, przedstawia logiczny ciąg badań naukowych, które ostatecznie prowadzą do wniosków praktycznych. Mam jednak kilka wątpliwości dotyczących sposobu analizy danych pomiarowych lub wyciąganych wniosków, podaję je poniżej.

#### *Rozdział 4*

4.1 Jak podaje Doktorant, podczas testów próbek polimocznika rejestrowano siłę rozciągającą oraz przemieszczenie trawersy maszyny i na tej podstawie zidentyfikowano: naprężenie niszczące, wydłużenie względne nominalne przy zerwaniu i moduł sprężystości przy rozciąganiu. Doktorant odnosi się do normy PN-EN ISO 527-1, która zaleca zastosowanie ekstensometru do pomiaru odkształceń próbki (z odstępstwem w przypadku kształtowania się przewężenia próbki w strefie uplastycznienia). Z treści pracy wynika, że Doktorant wyznaczył odkształcenia nominalne na podstawie rejestrowanego ruchu trawersy. W takim przypadku wyznaczone wartości modułu sprężystości są obarczone zwiększonym błędem, ponieważ w wyznaczaniu modułu Younga na podstawie testu jednoosiowego rozciągania zakłada się jednoosiowy stan naprężenia próbki, co jest prawdziwe tylko w jej środkowej części.

4.2 Dodatkowo, Doktorant nie podaje, jaki był początkowy rozstaw zacisków maszyny wytrzymałościowej. Czy wynosił on 30 mm, tyle samo co długość pomiarowa próbki? Na zdjęciach zaprezentowanych na Rys. 4.10 można zauważyć, że ten rozstaw jest większy. W przypadku użycia pomiarów położenia trawersy do wyznaczenia odkształceń nominalnych próbek materiału rozstaw ten jest wielkością  $L_0$  użytą do wyznaczenia odkształceń inżynierskich, więc ma zasadnicze znaczenie.

4.3 Doktorant podaje wartości modułu sprężystości podłużnej w MPa, co jest zgodne z zaleceniem normowym. Jednak, w określaniu właściwości mechanicznych membran uznane jest podawanie wyniku, również naprężeń, w N/m. Wynika to z małej, trudnej do dokładnego zmierzenia grubości próbki. Brak dokładności tego pomiaru skutkuje błędem określania wartości modułu sprężystości.

4.4. Kolejna uwaga dotyczy przyjętych prędkości rozciągania próbek (50, 100, 500 mm/min). Doktorant w rozdziale 4.1. pisze, że wykonuje testy statyczne. Jednak, jeśli przyjąć długość pomiarową próbki równą 30 mm, w tak zdefiniowanych testach prędkość odkształcenia wynosi kolejno 0,0277; 0,0557; 0,277 1/s. Uznaje się, że prędkość odkształcenia w testach statycznych powinna być mniejsza od 0.01 1/s. Dlatego, testy wykonane przez Doktoranta trudno uznać za statyczne. Ogólnie rzecz biorąc, prędkość odkształcenia w badaniach materiałów lub elementów konstrukcyjnych dobiera się tak by odpowiadała ona warunkom ich użytkowania w praktyce. Z tego punktu widzenia, prędkość odkształcenia w badaniach próbek polimocznika powinna odpowiadać przynajmniej prędkości odkształceń przyjętych w badaniach belek żelbetowych, bo w tym przypadku eksperymentalnie zidentyfikowane parametry mechaniczne polimocznika są użyte do obliczeń momentu rysującego i nośności tych belek.

4.5. Doktorant podaje, że „W trakcie wykonywanych badań rejestrowano: (...) przemieszczenia głowicy pomiarowej, które były wynikiem deformacji próbek pod rosnącym obciążeniem rozciągającym”. Trzeba sprostować, że zjawisko jest odwrotne – w testach sterowanych przemieszczeniem, jak w przypadku badań Doktoranta, deformacja próbki jest wynikiem przemieszczenia głowicy. Ten sam błąd zapisu jest w Rozdz. 5.1.

4.6. Ze zdjęcia zamieszczonego na Rys 4.4a można wnioskować, że próbki wycięto w jednym kierunku z jednego arkusza membrany. Proszę o informację, czy zadaniem Doktoranta kierunek wycięcia próbek w odniesieniu do kierunku wykonywania natrysku w procesie tworzenia membrany nie ma znaczenia? Czy Doktorant może zna wcześniejsze badania stwierdzające izotropię membrany wykonanej w zastosowanej w pracy technologii?

4.6. W ostatnie zdanie Podrozdziału 4.1 wkradł się błąd, ponieważ Doktorant napisał, że „Kamera termowizyjna (...) dokonywała pomiarów temperatury powierzchni materiału w funkcji czasu i w zależności od zmiany prędkości badania”. Taki pomiar jest niemożliwy w przypadku opisanych w pracy badań ze stałymi prędkościami przemieszczeń.

4.7. Na stronie 48. Doktorant pisze „Wartości modułów sprężystości, w etapie początkowym i drugim, były większe dla większych prędkości rozciągania materiału”. Jednak z wykresu zamieszczonego na Rys. 4.6 można odczytać, że wartości te są niższe w przypadku testów próbek typu P-500 niż w przypadku pozostałych dwóch typów próbek. Dotyczy to obu odcinków relacji naprężenie-odkształcenie, tzn. przed i po granicy plastyczności materiału.

## *Rozdział 5*

5.1. W opisie testów Doktorant podaje, że próbki typu I badano do całkowitego zniszczenia. Nie jest jednak wskazane, jakie było kryterium zakończenia testów próbek typu II i III.

## *Rozdział 6*

6.1 Doktorant mierzy przemieszczenia kręgów betonowych w dwóch kierunkach, z zastosowaniem dwóch czujników indukcyjnych na każdej osi pomiaru i nie wyjaśnia dokładnie, jak określa „deformację” próbki w tych osiach. Wydaje się, że skoro  $\mu\text{p}$  i  $\mu\text{V}$  są współliniowe to ich wartości powinny być sobie równe, jednak wyniki zamieszczone w Tabeli 6.4 i na Rys. 6.9 i 6.10 są różne, pomimo podobnego podpisu pod tymi rysunkami.

## Rozdział 7

7.1 W opisie stanowiska do badań belek żelbetowych (rozd. 7.4) brakuje wskazania pozycji czujników indukcyjnych mierzących ugięcia. W konsekwencji, nie wiadomo gdzie dokładnie pomierzono wartości  $u_3$  i  $u_2$ . Nie podano też prędkości przykładania obciążenia w testach mechanicznych badanych belek.

7.2 Oznaczenie parametru  $f_{ctmC} / f_{ctmP}$  w tabeli 7.10 jest mylące – można przypuszczać, że chodzi o stosunek dwóch parametrów, przy czym w tekście nie znajduje się wyjaśnienia parametru  $f_{ctmP}$ . Wydaje mi się, że w rzeczywistości chodzi wartość  $f_{ctm}$  przyjętą różnie w różnych przypadkach belek. W dojściu do takiego wniosku pomogła mi publikacja współautorstwa Doktoranta cytowana w rozdz. 7.10.

### • Pytania do Doktoranta

1. Proszę o wyjaśnienie, jak wyznaczono wartości  $\mu H$  i  $\mu V$  w badaniach opisanych w Rozdz. 6.
2. W badaniach kręgów betonowych Doktorant zastosował tensometry elektrooporowe, które standardowo służą do pomiaru odkształceń. Proszę o wyjaśnienie, jak Doktorant planował ich użyć do pomiaru rozwarcia rysy (opis stanowiska pomiarowego ze str. 71)?
3. W rozdz. 7. Doktorant napisał o użyciu systemu Aramis do pomiaru szerokości rys. Proszę o wyjaśnienie, czy w tym programie jest dostępna taka funkcja, czy jednak należy samodzielnie wykonać pomiar na mapie odkształceń?
4. Jak Doktorant interpretuje teoretycznie wyznaczoną wartość momentu rysującego w przypadku belki z powłoką z polimocznika, wynoszącą np. dla belki typu 4#14 63,6 kNm, skoro w badaniach laboratoryjnych zaobserwowano rysy w betonie w takiej belce na poziomie 20%  $F_{max}$ , czyli w tym przypadku wynoszącym 21,72 kNm?

### 3.2 Ocena formalnej strony rozprawy

#### • Poprawność języka technicznego

1. W rozdziałach 4. i 6. Doktorant napisał o obserwacji „pracy próbek”, nie analizuje jednak pracy w sensie podawanym przez podręczniki mechaniki. W kontekście opisywanych obserwacji sugerowałabym pisać o zachowaniu mechanicznym próbek, pamiętając o tym, że „praca” ma ścisłą definicję mechaniczną.
2. Doktorant używa zamiennie słów „powłoka” i „membrana” w odniesieniu do warstwy polimocznika powlekającej badane elementy. Jest to zapewne podyktowane nazewnictwem z kart technicznych produktu – jeden z producentów nazywa tę warstwę membraną. W mechanice membrana jest samodzielnym tworem, a ciekłe tworzywo, które zastyga na pewnej powierzchni powinno się raczej nazwać powłoką.
3. W rozdziałach 5. i 6. Doktorant używa słowa „deformacja” w odniesieniu do przemieszczeń. Wprowadza to trudność w zrozumieniu, co faktycznie jest pomierzone. O ile w Rozdz. 5. jest mowa tylko o jednym rodzaju przemieszczenia, zgodnym z ruchem trawersy maszyny wytrzymałościowej, to w Rozdziale 6. Doktorant opisuje przemieszczenia próbek

pomierzone w dwóch kierunkach, z zastosowaniem dwóch czujników indukcyjnych na każdej osi pomiaru i nie wyjaśnia dokładnie, jak określa „deformację” próbki w tych osiach. W opisywanym kontekście poprawniejsze jest użycie słowa „przemieszczenie”, ponieważ słowo „deformacja” ma w mechanice szersze znaczenie.

4. Doktorant napisał w pracy o „optycznej korelacji obrazu” (Rozdz. 2. i 7.). W języku polskim przyjęła się nazwa „cyfrowa korelacja obrazu” (pomimo faktycznie wykonywanej korelacji obrazów cyfrowych) i tę lepiej przyjąć w tekstach technicznych.
5. Doktorant używa zamiennie słów „elastyczność” i „sprężystość”, np. w rozdz. 3. i 7. W rozdziale 3. pisze też „elastyczność i sprężystość”. W mechanice oba słowa oznaczają to samo z tym, że jedno jest używane w języku polskim, a drugie w angielskim.

#### • **Poprawność języka polskiego**

W ogólności pracę napisano poprawnie stylistycznie i gramatycznie, chociaż można znaleźć pewne błędy. Kilka przykładów przytaczam poniżej:

- „(...) przedstawiono szczegółową charakterystykę badań (...) próbek (...), z których szesnaście zostało **pokryte** powłoką (...)” (1. zdanie Rozdz. 5.1);
- „W części pierwszej pracy – przegląd literatury – przeanalizowano dostępne prace badawcze, **która była podstawą do...**” (str. 12);
- „Wiele uwagi zostało poświęcone...” (str. 11);
- w kilku miejscach można znaleźć słowo „ilość” zamiast „liczba” w odniesieniu do rzeczowników policzalnych, np. na str. 63, w tabelach 4.1, 6.1;
- znalazłam w pracy także kilka literówek, których nie wyszczególniam.

#### **4. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Przedstawione uwagi krytyczne są głosem w dyskusji naukowej i nie wpływają na zasadniczo pozytywną opinię Recenzentki o opisywanej rozprawie. Doktorant może je wziąć pod uwagę podczas projektowania swoich przyszłych badań naukowych, jeśli się z nimi zgadza.

Praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy dotyczący wzmacniania i zabezpieczania konstrukcji żelbetowych. Autor pracy stawia w pracy pięć tez i je udowadnia wykonując różne doświadczenia. Trzeba zaznaczyć, że tezy 1 i 3 okazały się prawdziwe w przypadku badań elementów w skali naturalnej.

We wprowadzeniu do pracy, na str. 13. mgr Matusiak pisze, że „niestety”, z powodów obiektywnych, którymi były „ograniczenia finansowe i czasowe” nie zrealizował badań elementów wykonanych z innych materiałów, takich jak: stal, aluminium, drewno oraz elementów murowych. Trzeba przyznać, że w Polsce badacze często spotykają tego typu ograniczenia, ale też często udaje się zaplanowane badania zrealizować w kolejnym etapie pracy naukowej, co z resztą Doktorant planuje, jak napisał w Rozdz. 8. Z drugiej strony wykonane przez Doktoranta badania elementów konstrukcyjnych takich jak belki żelbetowe i kręgi betonowe w skali naturalnej są rzadko spotykane w pracach naukowych, właśnie z powodu wysokiego kosztu ich wykonania związanego nie tylko z kosztem przygotowania elementów do badań ale również z kosztem przeprowadzenia tych badań w laboratorium. Prace te wiązały się też niewątpliwie z dużym zaangażowaniem czasowym i organizacyjnym

Doktoranta, a także pomysłowością i innowacyjnością w budowie stanowisk pomiarowych, o czym świadczy m. in. zgłoszenie patentowe współautorstwa Doktoranta. Doktorant ma w dorobku 2 zgłoszenia patentowe, co właśnie ujawnia Jego zdolności wynalazcze. Ponadto, w dorobku naukowym Doktoranta znajduje się 6 wystąpień konferencyjnych i 12 publikacji w czasopiśmie i monografiach naukowych (w tym 2 publikacje w czasopiśmie, które mają Journal Impact Factor), co wskazuje na dużą aktywność publikacyjną mgra Matusiaka.

Autor wykazał wszechstronność zainteresowań zaawansowanymi metodami doświadczalnymi, a uzyskane przez Niego wyniki wnoszą wiele ciekawych elementów poznawczych. Za oryginalne elementy pracy należy uznać badania porównawcze mechanicznego zachowania się i wytrzymałości elementów betonowych i żelbetowych (w skali technicznej i naturalnej) pokrytych powłoką z polimocznika i analogicznych elementów bez powłoki wraz z zastosowaną technologią termowizyjną i cyfrowej korelacji obrazu, wykorzystaną do diagnostyki próbek w czasie pomiarów oraz zaproponowanie procedur określania stanów SGN i SGU belek żelbetowych pokrytych polimocznikiem.

Praca wnosi znaczący wkład w rozwój zaawansowanych technik badawczych. W szczególności badania Doktoranta przyczyniły się do lepszego zrozumienia wpływu powłoki z polimocznika na mechanikę konstrukcyjnych elementów betonowych i żelbetowych, co jest Jego wkładem w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

**W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra Artura Matusiaka spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018r., poz. 1668, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do obrony.**

*Adamewicz*

