

Kraków, 4.12.2017.

Prof. Maciej Pietrzyk

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Kisiela pt. "Model Approach for Polymer Flexible Joints in precast element joints of concrete pavements".

Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej pismem z dnia 4 października 2014 roku. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Pawła Kisiela przedstawiam poniższą opinię.

### 1. PRZEDMIOT OCENY

Przedmiotem oceny jest praca doktorska napisana w języku angielskim składająca się ze spisu treści, wstępu, 9 rozdziałów zasadniczych oraz wniosków i spisu literatury, zawierająca 170 rysunków i 16 tablic. Spis literatury obejmuje 56 pozycji. Pracę uzupełnia obszerne streszczenie w języku polskim.

### 2. OGÓLNA OCENA PRACY

#### Dobór problematyki badawczej i tematu rozprawy

Przedmiotem pracy są prefabrykowane nawierzchnie betonowe, a dokładnie zastosowanie podatnego złącza polimerowego do łączenia płyt betonowych (ang. Polymer Flexible Joint – PFJ). Autor rozprawy podjął się opracowania numerycznego modelu takiego złącza. PFJ jest to nowa technologia opracowana w Politechnice Krakowskiej, pozwalająca na wzajemne przemieszczanie się płyt przenosząc jednocześnie obciążenie między płytami. Technologia PFJ była przedmiotem rozprawy habilitacyjnej Promotora i została opisana w kilku publikacjach w czasopiśmie nie indeksowanym przez Web of Science. Nie wgłębiając się w szczegóły zalet i ograniczeń tej technologii należy podkreślić, że jest ona nadal na etapie badań niezbędnych do jej wdrożenia. Otwarta jest sprawa doboru optymalnych parametrów złącza, co wymaga analizowania wielu różnych wariantów. Numeryczne modelowanie będzie ważnym narzędziem wspomagającym projektowanie złącza, pozwalającym na znaczne skrócenie czasu oraz kosztów wdrożenia. W tym aspekcie uważam wybór tematyki pracy za w pełni uzasadniony. Tytuł rozprawy odpowiada jej treści, chociaż użycie w tytule dwa razy słowa „joint” nie jest stylistycznie najlepsze.

#### Układ i treść pracy

Autor zaplanował i konsekwentnie zrealizował sekwencję badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych zmierzających do zbudowania modelu opisującego zachowanie się złącza PFJ w różnych warunkach obciążenia. Układ pracy jest poprawny. W rozdziale 1 rozprawy Autor przedstawił skrótowo genezę problemu i sformułował cele pracy. Przegląd literatury skupia się na konstrukcjach betonowych [SZY04, DEL14, CON03] oraz przyczynach ich uszkodzeń [AJD01]. Kilka pozycji w spisie literatury dotyczy materiałów stosowanych obecnie na złącza, np. gumy. Jedyną publikacją wybiegającą poza tą tematykę jest praca doktorska z Politechniki Gdańskiej [RAL13] traktująca o własnościach polimerów stosowanych na izo-



latory sejsmiczne. Pozostała część przeglądu literatury dotyczy wcześniejszych prac zespołu Promotora, w tym prac Doktoranta, omawiających różne aspekty stosowania złączy PFJ. W sumie w spisie literatury przeważają publikacje w materiałach konferencyjnych i czasopismach lokalnych. Niewiele jest prac w renomowanych czasopismach.

Z przeglądu literatury niewątpliwie wynikają duże możliwości złączy PFJ. Dla pełnego praktycznego zastosowania tych złączy nadal potrzebne są dogłębne badania, w tym modelowanie zachowania się złączy pod obciążeniem. Zabrakło jednak w przeglądzie literatury prac dotyczących metod modelowania połączeń płyt betonowych, a takich prac opublikowanych zostało dość dużo, np. po 2010 roku: C.R. Byrum, Development of a new joint load transfer versus slab temperature: modeling procedure for airfield concrete pavements, Airfield & Highway Pavement Conference, Los Angeles, 2013; S.T. Jouybari, G.A. Shafabakhsh, Finite element investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements, Computational Research Progress in Applied Science & Engineering, 3, 2017, 91-96; S.R. Maitra, K.S. Reddy, L.S. Ramachandra, Estimation of critical stress in jointed concrete pavement, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104, 2013, 208-217.

Na podstawie przeglądu literatury sformułowane zostały cele pracy przedstawione na str. 11. Jak już wspomniałem na wstępie, jest to przemyślanie zaplanowana sekwencja obszer-nych badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych zmierzających do zbudowania modelu opisującego zachowanie się złącza PFJ. Na następnej stronie przedstawiono podstawowe założenia przyjęte do budowy modelu. W większości założenia są akceptowalne, chociaż przyjęcie do badań jednej prędkości odkształcenia, nie analizowanie cyklicznych obciążeń czy pominięcie własności reologicznych wymaga szerszego uzasadnienia. Do tych zagadnień wrócę w uwagach szczegółowych. Na tej samej stronie Autor sformułował tezy pracy, które są dość oczywiste, szczególnie teza numer 2. Zabrakło mi tezy zakładającej, że opracowanie dokładnego i wiarygodnego modelu złączy PFJ stworzy użyteczne narzędzie wspomagające projektowanie optymalnych nawierzchni z zastosowaniem tych złącz.

W rozdziale 2 Autor omawia stan zagadnienia od strony modelowania łączonych elementów betonowych. Przytoczone są znane równania dla sprężystości i hiper sprężystości. Podany jest podział modeli na teoretyczne, teoretyczno-doświadczalne i doświadczalne. Przytoczone są również czynniki mające wpływ na zachowanie się polimeru. niespójność tych czynników z założeniami na str. 12 powinna być szerzej wyjaśniona.

W rozdziale 3 rozprawy opisano doświadczenia fizyczne przeprowadzone przez Doktoranta. Jest to bardzo wartościowa część pracy. Badania zostały zaplanowane kompleksowo mając na uwadze cel, jakim było dostarczenie danych do identyfikacji i weryfikacji modelu. Badania objęły przygotowanie materiału wsadowego i wyznaczenie własności jego składowych, a następnie przeprowadzenie fizycznych symulacji obciążania złącza. Wykonane elementy poddano badaniom w czterech schematach obciążenia: ścinanie, zginanie, rozciąganie i ściskanie. Zastosowano specyficzne metody badawcze adekwatne do własności badanych wyrobów. Przeprowadzane badania dostarczyły danych niezbędnych do budowy modelu konstytutywnego. Ten rozdział potwierdza wiedzę i przygotowanie Autora do prowadzenia badań doświadczalnych. Pewne mankamenty w prezentacji i analizie wyników omówię w uwagach szczegółowych. Nie zmieniają one faktu że materiał zawarty w rozdziale 3 ma istotne znaczenie dla pracy. Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant w dalszej części pracy proponował szereg rozwiązań, które pozwoliły Mu opracować efektywny i dokładny dyskretny model złącza PFJ. Pozytywnie oceniam tą część pracy i całość badań doświadczalnych (fizycznych) uznaję za znaczące osiągnięcie Doktoranta.

Rozdział 4 zawiera opis modelu numerycznego i wyniki numerycznych symulacji obciążania złącza PFJ. Symulacje zostały wykonane w programie Abaqus. Na str. 63 zebrane zo-



stały wszystkie założenia modelu. Rozwiązanie jest typowe i nie widzę nowatorskiego wkładu Doktoranta w część numeryczną. Zresztą, jak już wspomniałem, w przeglądzie literatury Doktorant nie analizował żadnej pracy związanej z modelowaniem elementów nawierzchni betonowych nie stwarzając tła do swojego wkładu w rozwiązanie numeryczne. Główne osiągnięcie w tej części pracy widzę natomiast po stronie aplikacyjnej wymagającej staranności w opracowaniu modelu materiału oraz w prawidłowym sformułowaniu warunków brzegowych dla skomplikowanych prób doświadczalnych. Wykonane zostały próby rozciągania i ściskania badanego polimeru i na tej podstawie opracowano model polimeru. W rozdziale 4 zamieszczono wyniki wielu testów numerycznych oraz symulacji prób doświadczalnych omówionych w rozdziale 3.

Rozdział 5 poświęcony jest porównaniu wyników numerycznych symulacji z wynikami prób doświadczalnych, czyli weryfikacji modelu. Rozdział zawiera obszerny materiał obejmujący porównanie wyników pomiarów i symulacji dla wszystkich wykonanych prób doświadczalnych. Rozdział podsumowując szczegółowe wnioski do każdego zestawu obliczeń.

Za szczególnie wartościowe uważam wykonanie prób doświadczalnych dla pełno gabarytowych złączy opisane w rozdziale 6, a następnie wykonanie symulacji obciążania nawierzchni tramwajowej opisanych w rozdziale 10. Zamieszczone zostały interesujące wyniki rozkładów naprężeń w złączach, które pozwalają ocenić lokalne obciążenia materiału. Przeprowadzona weryfikacja modelu w rozdziale 6 i wykonane symulacje w rozdziałach 6 i 10 potwierdziły przydatność modelu do wspomagania projektowania różnych nawierzchni wykorzystujących złącza PFJ.

W rozdziałach 7 i 8 podjęto próbę uogólnienia wyników i wyznaczenia zastępczych parametrów złącza przydatnych do projektowania nawierzchni betonowych. W rozdziale 7 wprowadzono skalowanie wymiarów próbek poprzez wprowadzenie współczynnika kształtu. Miało to na celu wyeliminowanie różnic między wynikami obliczeń sztywności i odkształcalności złącza otrzymanymi dla różnych wymiarów próbek. Odniesienie własności do współczynników kształtu nie dało znacznej poprawy spójności wyników w porównaniu do analizy próbek z bezwzględnymi wymiarami. Problem skalowania wymiarów w celu uzyskania spójnych wniosków powinien być przedmiotem dalszych badań. Wartościowym osiągnięciem rozdziału 8 są obliczone zastępcze moduły dla złączy o różnych wymiarach. Są to praktyczne dane przydatne w projektowaniu nawierzchni.

Całość wykonanych prac podsumowano w rozdziale 11. Wnioski są bardzo szczegółowe dedykowane oddzielnie do każdego zestawu doświadczeń. Brak jest uogólnień i próby połączenia wniosków ze sobą, co omówię dokładnie w szczegółowej ocenie pracy.

Podsumowując ogólną ocenę pracy należy stwierdzić, że Doktorant opracował efektywny model dyskretny złącza PFJ, który zastosował do symulacji całego cyklu prób doświadczalnych w warunkach laboratoryjnych oraz symulacji obciążenia pełno gabarytowych elementów nawierzchni betonowych. Symulacje prób doświadczalnych posłużyły do oceny poprawności przyjętego modelu. Porównanie wyników wykazało prawidłowość działania modelu, z dokładnością akceptowalną w warunkach pracy złączy. W ten sposób Doktorant udowodnił dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania zachowania się konstrukcji betonowych poddawanych złożonym obciążeniom cieplnym i mechanicznym. Potwierdził On swoją wiedzę i bardzo dobre zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu komercyjnych programów MES, a w szczególności metod identyfikacji parametrów materiałowych na potrzeby modelowania. W pracy zawarto obszerny, uzyskany na drodze dużego nakładu pracy, materiał dotyczący trudnego problemu teoretycznego opisu zachowania się złączy PFJ w warunkach obciążeń cieplnych i mechanicznych. Do najważniejszych, istotnych osiągnięć Autora zaliczyłbym:



1. Wykonanie obszernych i pracochłonnych badań doświadczalnych obejmujących obciążanie złączy o różnej skali wymiarowej w czterech różnych schematach obciążenia. Szczególnie wartościowe jest zbudowanie stanowiska i wykonanie prób doświadczalnych dla pełno wymiarowych złączy.
2. Poprawne sformułowanie modelu MES w programie komercyjnym. Trudny problem cieplno-mechaniczny został zaimplementowany i prawidłowo zadano złożone warunki brzegowe dla różnych obciążeń próbek. Znaczącym osiągnięciem jest wprowadzenie hiperplastyczności do modelu materiału, co pozwoliło analizować duże odkształcenia próbek.
3. Wykonanie analizy porównawczej różnych modeli polimeru i wybór najlepszego modelu do dalszych zastosowań.
4. Wykonanie sekwencji numerycznych symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu. Symulacje objęły zarówno wszystkie próby doświadczalne próbek w mniejszej skali jak i odkształcenie pełno gabarytowych próbek poddanych obciążaniom odpowiadających warunkom ich pracy w nawierzchniach. Symulacje poszczególnych procesów dostarczyły danych do identyfikacji modeli jak i do weryfikacji i walidacji modelu. Symulacja pełno gabarytowych złączy potwierdziła przydatność modelu do projektowania nawierzchni betonowych i jest nowatorskim osiągnięciem Autora, które może znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji nawierzchni.
5. Wykonanie obliczeń stanu naprężenia w skalach mikro i makro dla próbek o różnych wymiarach, co pozwoliło na przewidywanie lokalnych naprężeń w różnych próbkach i ocenę podatności materiału na pękanie.

### 3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

#### Ustalenia merytoryczne – rezultaty badawcze

Jak już wspomniałem w ogólnej ocenie pracy, sumarycznie pozytywnie oceniam merytoryczną stronę opisanych badań. Nie mam poważniejszych ogólnych zastrzeżeń do przeprowadzonych prób doświadczalnych oraz do opisanego rozwiązania numerycznego. Moje główne krytyczne lub może raczej dyskusyjne uwagi, na które oczekiwałbym wyjaśnień ze strony Doktoranta, są następujące:

1. Problem identyfikacji modelu jest ważną częścią pracy. Identyfikacja własności jednego materiału, np. polimeru, jest sprawą jasną. Ale procedura identyfikacji przedstawiona w punktach na str. 68 nie jest przejrzysta. Obecnie do identyfikacji parametrów modeli materiałów stosuje się rozwiązanie odwrotne przekształcone w zadanie optymalizacyjne, np.: G. Bolzon, M. Talassi, An effective inverse analysis tool for parameter identification of anisotropic material models, International Journal of Mechanical Sciences, 77, 2013, 130-144. Byłoby dobrze gdyby Autor zamieścił w pracy schemat blokowy procedury opisanej na str. 68, aby można było prześledzić na ile jest to poszukiwanie parametrów modelu metodami optymalizacji, a na ile jest to metoda prób i błędów. Inaczej patrzę na identyfikację parametrów modelu złącza. Zachowanie złącza jest superpozycją zachowania się poszczególnych jego elementów. Czy można mówić o module sprężystości złącza (np. str. 105, wiersz 5). Jest to raczej zastępczy moduł lub jako odwrotność zastępcza sztywność złącza. Proszę Doktoranta o komentarz odnośnie założenia, że identyfikacja modelu materiału powinna dotyczyć materiałów składowych złącza (polimer, beton), a porównanie symulacji z wynikami pomiarów dla całego złącza powinno służyć do walidacji i do weryfikacji modelu.
2. W całej pracy Autor operuje miarami inżynierskimi, np. prędkość odkształcenia w %/mim. Także opis modeli materiału np. str. 15 jest w miarach inżynierskich. Zabrakło mi wyjaśnienia dlaczego stosowane są miary inżynierskie. W założeniach na str. 12 pkt. 4 Autor pisze, że całość analizy została przeprowadzona dla jednej prędkości odkształcenia



100%/min, bez oceny na ile zmiana prędkości wpływa na zachowanie się złącza. Budzi to wątpliwość szczególnie, że na str. 19 zastosowany polimer jest sklasyfikowany jako materiał lepkosprężysty. We wnioskach na str. 139 wiersz 9 od dołu czytamy, że zmiana prędkości obciążenia może prowadzić do znacznych zmian charakteru zachowania się złącza. Inne cechy polimeru (pełzanie, relaksacja) kłócą się z założeniami na str. 12 pkt. 5. Te uwagi prowadzą do sformułowania ważnego mankamentu pracy, jakim jest brak analizy wrażliwości (ang. Sensitivity Analysis). Jest to ważny element współczesnego modelowania procesów i zjawisk fizycznych. Analiza wrażliwości powinna dostarczyć informacji w jakim stopniu poszczególne parametry wpływają na wyjście modelu. W konsekwencji, istotność poszczególnych parametrów złącza oraz parametrów modelu mogłaby zostać określona. Analiza wrażliwości pozwoliłaby w sposób naukowy uzasadnić pominięcie wpływu mało istotnych parametrów.

3. Dyskusja wyników i wnioski po każdym zestawie badań są bardzo obszerne, ale z drugiej strony również chaotyczne. Trudno jest je śledzić. Brakuje konstruktywnych wniosków ogólnych. Jest tylko jeden bardzo ogólny wniosek dotyczący PFJ. Pozostałe to są wnioski napisane w formie bezpośredniej interpretacji pojedynczych wyników, wynikające wprost z analizy wyników doświadczeń. Te wnioski nie uogólniają problemu. Ponadto, stosunkowo duży rozrzut wyników powoduje, że często wyciągane są 2 kontrowersyjne wnioski dotyczące jednego problemu. Np.: str 34. Wiersz 11 od dołu.
4. Niektóre wnioski i obserwacje są oczywiste, np. mniejsze wartości przemieszczeń występują dla mniejszych próbek (str. 34). Takich przekładów jest więcej we wnioskach szczegółowych pod każdym zestawem wyników, przykładowo dwa wnioski na dole str. 41., pierwszy wniosek na str. 52, względnie wszystkie wnioski na dole str. 56. Szczegółowe wnioski na podstawie poszczególnych wyników badań czasem budzą wątpliwości. Np. na str. 59 wiersz 3-4 pod rys. 3.50 czytamy, że dla ściskania charakter wyników dla małych i średnich próbek jest podobny. Oznaczałoby to podobieństwo rys. 3.52 z 3.30 obydwu „top right”, a tak chyba nie jest. Kolejna wątpliwość to dlaczego przy ściskaniu model przewiduje liniowy wzrost siły z przemieszczeniem (str. 84). Przy małych grubościach polimeru oczekiwałbym większego przyrostu siły, co widać w wynikach pomiarów. Na rys 5.14 dla jednej próbki (400x100x20) następuje gwałtowna zmiana nachylenia krzywej. Czy to jest fizyczne, czy też było jakieś zakłócenie w eksperymencie?
5. Kontynuując komentarze powyżej, interpretacja wyników jako np. moduł sprężystości złącza nasuwa wątpliwości. Własności materiałów składowych powinny być wyznaczone dokładnie, natomiast złącze jako całość powinno być modelowane znając te własności. Można się zastanowić nad możliwością zastosowania analizy odwrotnej do identyfikacji modeli. Analiza odwrotna przekształcona w zadanie optymalizacyjne z normą kwadratową różnicy wyników pomiarów i obliczeń jako funkcją celu byłaby pomocna w wyznaczeniu parametrów modelu.
6. Rozdział 4.4 jest niejasny. Nie ma opisu jak identyfikowano model polimeru w pracy [KWB11]. Zatem w tezie drugiej na stronie 12 powinna być informacja o dwóch metodach identyfikacji. Rysunki na str. 77 świadczą, że pierwszy model był całkiem zły. Potwierdza to rysunek 11.3 pokazujący duże rozbieżności wyników dla modelu z [KWB11] i z obecnej pracy. Dodatkowo, sformułowania w dalszej części pracy „new parameters obtained by the new identification ...” są nienaukowe. Na przykład na str. 148 w 6-ym oryginalnym osiągnięciu zamiast „Identification of new mechanical parameters” powinno być „New identification of mechanical parameters” – nie ma nowych własności.
7. Na niektórych krzywych naprężenie-odkształcenie występuje punkt przegięcia, czym jest spowodowany?
8. Dlaczego uzyskano bardzo dobrą zgodność między wynikami dla różnych modeli dla rozciąganie (rys.4.13), a znacznie większe rozbieżności dla ścinania.



9. W pracy Autor często używa sformułowania model MES. Z rozdziału 4.2 wynika, że opracowanych zostało kilkadziesiąt modeli MES przyjmując dla każdej próbki jest inny model. W opinii recenzenta powstał jeden model MES, który był rozwiązywany dla różnych wymiarów próbek i warunków brzegowych. W podpisie pod rys. 4.14 czytamy, że są to mapy dla modeli, a jest wykorzystany jeden model.
10. Należy podać jak zdefiniowany jest współczynnik kształtu. Odwołanie do pracy [GEA09] nie jest wystarczające, szczególnie że nie jest to łatwo dostępna publikacja.
11. Rozdział 10.1.5 zawierający modelowanie pełno gabarytowego złącza jest bardzo interesujący i ważny dla pracy. Czy jednak obliczone przemieszczenia rzędu ułamków mm mają znaczenie dla tak dużych wymiarów płyt?
12. Zabrakło w pracy ważnych aspektów nowoczesnego modelowania procesów czy zjawisk. Oprócz wspomnianej wcześniej analizy wrażliwości, mam tutaj na myśli badanie złożoności obliczeniowej modelu oraz badanie wpływu gęstości siatki na dokładność obliczeń.

### Strona formalna pracy

Strona formalna pracy zasługuje na niską ocenę. Wprawdzie rozprawa jest napisana zasadniczo zrozumiałym językiem, ale jest zredagowana niestarannie i zawiera dużo drobnych błędów. Praca jest napisana w języku angielskim. W opinii recenzenta w tekście jest wiele błędów językowych oraz pomyłek, które utrudniają śledzenie przepływu informacji. Dostrzeżone błędy językowe przekazane zostały Doktorantowi poza recenzją. Bibliografię sporządzono niestarannie. Brak jest spójności w formatowaniu literatury. W wielu publikacjach w spisie literatury brak jest danych bibliograficznych, numerów tomów, numerów stron itp. W pozycji [52] inicjały powinny być pisane z dużej litery. Poniżej zauważone drobne braki, nieścisłości, błędy i usterki w pracy:

1. Do badań wybrano polimer typu PM, co jest określeniem ogólnym. Autor powinien uściślić, jaki to był polimer. Ponadto brakuje uzasadnienia, dlaczego wybrano ten właśnie materiał.
2. Nie należy stosować gwiazdki jako symbolu mnożenia we wzorach, np. równanie (2.6).
3. Symbole w tekście powinny być pisane frontem *kursywa*.
4. Wiele symboli w równaniach nie jest objaśnionych, np. w równaniach (2.14) – (2.17). Z drugiej strony symbole  $F/A$  oraz  $E$  i  $G$  podane pod wzorami nie występują we wzorach (są z indeksami).
5. W wielu miejscach stosowane są skróty myślowe, często utrudniające śledzenie myśli Autora. Kilka przykładów. Str. 47, wiersz 6: „The thicker sample ...” – czy chodzi o grubość polimeru? Str. 113, wiersz 5 w 10.1.1: Co to jest „strain displacement”? Co to jest „stress stiffness” w tytule 10.4? Str. 116, wiersz 4 od dołu: “... most optimal ...” – co to znaczy?
6. W pracy jest zbyt dużo rysunków, np. wykresy zarejestrowanych sił dla wszystkich prób. Wystarczyłoby pokazać 1-2 przykłady, a dla wszystkich podać wykresy uśrednione.
7. W pracy jest za dużo Tablic. Na przykład Tablica 4.4, wymiary próbek powinny być zebrane w jednej tablicy i ponumerowane, a potem powinny być odwołania do numeru próbki.
8. Na kilku rysunkach font w legendzie i opisie osi jest zbyt mały, np. rys. 4.7 - 4.11.
9. Str. 6, wiersz 7 od dołu: Jaki następny etap technologii Autor ma na myśli?
10. Str.9, wiersz 6 od dołu: O jaki opisany problem chodzi? Czy o usterki widoczne na rys. 1.3?
11. Nie jest jasne powiązanie rys. 1.4 z dwoma grupami stosowanych złącz na dole strony 8.
12. W podpisie pod rys. 2.2 na końcu (on the right).
13. Str. 15, „shape deformation” zastąpiłbym „shear deformation”.



14. Wiersz 3 pod równaniem (2.13): "... material model identification ...".
15. Brak opisu osi na rys. 2.4.
16. Należy rozróżnić w podpisie lewy i prawy rysunek 3.5.
17. Str.28, wiersz 6: "... 80x80 ..."
18. Str. 28, próbki pękały na złączu polimeru z betonem. W jakim stopniu jest to akceptowalne z punktu widzenia identyfikacji własności złącza.
19. Należy rozróżnić w podpisie lewy i prawy rysunek 3.30.
20. Str. 58, wiersz 3 od dołu: Jak oceniano maksymalne przemieszczenie przy ściskaniu?
21. Podpis pod rys. 6.3: "... range of 0-9 mm ..."
22. Co to jest za wartość współczynnika tarcia  $1.2 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ? (str. 115, wiersz 6).
23. Podpis pod rys. 10.8: Na odwrót, „Dependence of maximum displacement on the temperature difference”.
24. Rys. 10.15: Jeżeli przemieszczenia są w mm, jak to podano w podpisie, to wychodzą wartości rzędu  $10^{-4} - 10^{-5}$  mm. Czy tak ma być?
25. Na rys. 10.18 warianty S3 i S4 dotyczą ściskania, dlaczego próbki (2) i (3) są różne?
26. Na dolnym rysunku 10.19 jest zginanie, z podpisu wynika, że jest to ścinanie.
27. Nie sprecyzowano jaka jest idea „strips” (str. 126). Tłumaczenie sugeruje taśmę, tymczasem jest to dodatkowa wolna przestrzeń w polimerze. To powinno być lepiej objaśnione.
28. Rozdział 11 zawiera niejasności, nieścisłości i skróty myślowy. Podam tylko kilka wybranych. Pierwsze 2 zdania w 11.1 są niejasne. W tekście przewija się słowo „appropriate” bez wyjaśnienia co oznacza. Podobnie „positive impact” bez podania jaki jest to wpływ. Fatalny jest styl w 11.2.1 utrudniający zrozumienie tekstu. W 11.2.2 jest odwołanie do rys 3.37 top, podczas gdy ten rysunek ma jeden poziom. Poniżej jest odwołanie do rys 8.1 jako do ściskania, a wyniki są dla ścinania. Wnioski na górze str. 139 odwołują się do modułu sprężystości złącza, który zależy od sposobu przyłożenia siły. Oczekiwałbym bardziej praktycznego ogólnego wniosku. Jak określano „specimen failure energy” w 11.2.3? Wniosek poniżej dotyczący zakresu odkształceń dla różnych prób jest oczywisty. Dalej czytamy o istotnym wpływie prędkości obciążania, co nie zgadza się z założeniem na str.12. Tekst „the scale effect impact” pojawia się 2 razy w pierwszym zdaniu 11.2.4. Na czym polega “optimization analysis for this bond” w 11.2.7, wiersze 6-7? Czy 11.2.5 nie powinno być połączone z 11.2.8? Szczególnie, że w 11.2.8 czytamy, że numeryczne modele zostały wykorzystane do oceny wpływu kształtu próbek. Zła składnia w ostatnim wierszu na str. 142. Co to znaczy „graph ... is far from asymmetric, str. 143 wiersz 10. Co oznacza nonlinear distribution w 11.3.5? Udawadnianie tezy 2 i 3 przepisano dosłownie z artykułu. Zamiast „Within the scope of the paper ...” powinno być „Within the scope of the dissertation ...”. W podpisie pod rys. 11.1 pomyłono rysunek lewy z prawym.

#### 4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując opinię stwierdzam, że poziom merytoryczny pracy spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w odpowiedniej ustawie, ale praca zawiera wiele nieścisłości i drobnych pomyłek, które wymieniłem w recenzji. Uważam, że przed dopuszczeniem do obrony praca powinna zostać poprawiona z uwzględnieniem uwag zawartych w recenzji. Doktorant powinien rozważyć również możliwość uzupełnienia wyjaśnienia pewnych wątpliwości wymienionych w części recenzji zatytułowanej „Ustalenia merytoryczne – rezultaty badawcze”. Przykładowo dotyczy to zamieszczenia w pracy informacji dlaczego badano jedną prędkość odkształcenia, jak zdefiniowano współczynnik kształtu, itp.

