

dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska
i Architektury
ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów
slęczka@prz.edu.pl

Rzeszów, 25 listopada 2016 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Sneli

**pt. „Szacowanie temperatury krytycznej stalowych ram przechyłowych w pożarze
rozwiniętym z uwzględnieniem zmieniającej się podatności węzłów”**

1. Krótka charakterystyka rozprawy

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Sneli. Praca została wykonana na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Mariusz Maślak, prof. P.K. Rozprawa liczy 205 stron maszynopisu i została podzielona na sześć rozdziałów, z umieszczonymi na końcu spisem piśmiennictwa oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Bibliografia zawiera 160 pozycji piśmiennictwa, cytowanego lub wykorzystanego w różnym stopniu w treści pracy.

W rozprawie Autorka zajęła się analizą stanów granicznych nośności stalowych ram przechyłowych poddanych działaniu pożaru. W przeprowadzonych analizach rozpatrzono zarówno oddziaływania mechaniczne i termiczne, jak i zmianę właściwości strukturalnych węzłów wywołaną działaniem pożaru.

2. Ocena tematu rozprawy

Do niedawna projektowanie konstrukcji stalowych w sytuacji pożarowej polegało na doborze środków ochrony przeciwpożarowej, w szczególności parametrów izolacji ogniochronnej, zabezpieczającej na pewien czas konstrukcję przed działaniem ognia. Wprowadzone do praktyki, w ciągu ostatnich lat, pakiety europejskich norm konstrukcyjnych umożliwiają szacowanie realnej odporności ogniowej elementów i konstrukcji. Wymaga to jednak odrębnej analizy, uwzględniającej specyfikę wyjątkowej sytuacji obliczeniowej, jaką jest pożar. Analiza taka powinna brać pod uwagę zarówno wpływy termiczne, mechaniczne, jak i redukcję właściwości mechanicznych stali pod wpływem zmieniającej się temperatury. Przeprowadzenie wiarygodnej analizy tego typu wymaga również uwzględnienia wpływu wysokiej temperatury na węzły łączące elementy konstrukcyjne. Pomimo ciągłego postępu

w tej dziedzinie, odczuwalny jest nadal brak kompleksowego rozwiązania metodyki szacowania stanów granicznych konstrukcji stalowych, poddanych oddziaływaniom pożarowym. W szczególności brak jest metodyki takiej, która będzie przyjazna dla projektanta.

Podjęcie przez Autorkę zagadnienia polegającego na rozpoznaniu mało wyjaśnionego do tej pory wpływu podatności i nośności węzłów, na zachowanie ram stalowych poddanych sytuacji pożarowej jest zadaniem ambitnym i łączącym w sobie dwa zagadnienia badawcze: węzłów podatnych w konstrukcjach stalowych i globalnej analizy konstrukcji stalowych w sytuacji pożarowej.

Rozpatrywany przez Autorkę temat jest aktualny, ciekawy i celowy z naukowego punktu widzenia. Nawiązuje do światowych osiągnięć naukowych uzyskanych na tym polu. Należy go również wysoko ocenić z punktu widzenia aplikacyjnego i możliwości wykorzystania w praktyce.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Zasadniczym celem rozprawy jest analiza zachowania przechyłowych układów ramowych w sytuacji pożarowej, z uwzględnieniem pomijanego dotychczas efektu zmieniającej się sztywności i nośności węzłów wraz ze zmianą temperatury pożarowej. W pracy skoncentrowano się na identyfikacji modeli zachowania węzłów doczołowych, typu rygiel-słup oraz styków belek, pod wpływem pożaru rozwiniętego oraz wpływu zmian charakterystyk strukturalnych węzłów na zachowanie ustrojów ramowych w warunkach pożaru. Zagadnienie rozwiązywano w ujęciu deterministycznym.

W rozdziale 1, we wstępie pracy, tuż po wprowadzeniu i krótkiej charakterystyce rozpatrywanej tematyki Doktorantka sformułowała tezę, która dotyczy możliwości wiarygodnego i formalnie jednoznacznego opisu zachowania węzłów w warunkach pożaru. Można tego dokonać – według Autorki – za pomocą pęku zależności $M-\phi$, z których każda odniesiona będzie do zadanej temperatury węzła. Tego typu relacje posłużą do wyznaczenia odporności ogniowej stalowych ram przechyłowych.

Rozdział 2 przedstawia aktualny stan rozpatrywanego zagadnienia. Zawarto w nim przegląd badań eksperymentalnych oraz stosowane modele analityczne i numeryczne dotyczące węzłów w warunkach pożaru. Rozdział stanowi kompendium wiedzy odnoszącej się do działania temperatur pożarowych na węzły rozpatrywane jako wyizolowane, jak i stanowiące część układu konstrukcyjnego.

Rozdział 3 stanowi najbardziej praktyczną część pracy. Przedstawiono i porównano w nim alternatywne metody wyznaczania charakterystyk strukturalnych węzłów w sytuacji pożarowej. Pierwszą z metod stanowi globalna transformacja zależności moment – obrót, wyznaczonej jak dla sytuacji obliczeniowej trwałej (czyli temperatury normalnej). Autorka podała procedurę przekształcenia tej zależności tak, aby otrzymać zależności $M-\phi$ dla dowolnych temperatur pożaru rozwiniętego. Krzywe odniesienia mogą być uzyskane z bazy literaturowej i badań doświadczalnych węzłów w temperaturze pokojowej. Drugą metodą, rozpatrzoną i częściowo wyprowadzoną przez Autorkę, jest metoda składnikowa uogólniona na przypadek temperatur pożarowych. Autorka zaproponowała metodykę i podała merytoryczne uzasadnienie takiego podejścia. Obie metody poddano krytycznej analizie i porównano otrzymywane za ich pomocą wyniki. Pokazano, że nie są one równoważne ze sobą. Autorka konstatuje, że podejściem miarodajnym jest uogólniona metoda składnikowa. Drugim wątkiem rozwiniętym w tym rozdziale jest wpływ siły podłużnej na cechy strukturalne węzła i modele formalne węzłów uwzględniających interakcję zginania, siły podłużnej i ewentualnej siły poprzecznej. Rozdział ten jest bardzo obszerny. Liczy 87 stron, co stanowi 42% objętości całej pracy.

W rozdziale 4 Autorka zajęła się analizą i sprawdzaniem stanów granicznych nośności wybranych ustrojów ramowych z uwzględnieniem zmieniających się charakterystyk strukturalnych węzłów. W szczególności w rozdz. 4.1 rozpatrzono i opisano redystrybucję siły podłużnej w stalowym ryglu z uwzględnieniem podatności podłużnej więzów ograniczających swobodę termicznego wydłużenia rygla. W rozdziale 4.2 przedstawiono charakterystykę zachowania się rygla poddanego oddziaływaniom mechanicznym i termicznym, w zależności od sztywności węzłów podporowych na obrót i na przemieszczenie w kierunku podłużnym. Rozdz. 4.3 zawiera analizę ramy wykonaną z wykorzystaniem doświadczalnych charakterystyk $M-\phi$ przy różnych podejściach obliczeniowych. Celem przeprowadzonych analiz jest określenie temperatury krytycznej rozpatrywanych ustrojów. Rozdział 4 jest najciekawszy pod względem poznawczym.

Rozdział 5 przedstawia symulację zachowania się w warunkach pożaru dwu podukładów konstrukcji ramy stalowej, wykonaną za pomocą MES-u. Obliczenia ujmują w sobie zarówno sprężysto – plastyczny model materiału, redukcję właściwości materiału wywołaną temperaturą, oddziaływania mechaniczne i termiczne, jak i bardzo detaliczne modelowanie połączeń, z uwzględnieniem istnienia śrub, blachy czołowej, zjawiska kontaktu, itp.

Rozprawę kończy rozdział 6, w którym dokonano jej podsumowania i przedstawiono możliwe kierunki dalszych prac.

Jak wynika z przedstawionego opisu rozprawa zawiera zarówno walory naukowe, jak i praktyczne. Przegląd piśmiennictwa i stanu zagadnienia są kompetentne i przedstawiają istotę dotychczasowych prac badawczych i uzyskanych na tym polu wyników. Przedstawiony w rozprawie problem naukowy jest jasno postawiony, a teza jest wyraźnie sprecyzowana.

Do oryginalnego wkładu Autorki można zaliczyć uogólnienie metody składnikowej do wyznaczania charakterystyk strukturalnych węzłów w temperaturach pożarowych. W szczególności w rozprawie wykazano jakościowy i ilościowy wpływ temperatury na zmianę sztywności i nośności węzłów. Autorka udowadnia, że nośność węzła nie zmienia się proporcjonalnie do redukcji granicy plastyczności, i podobnie sztywność nie ulega redukcji proporcjonalnie do zmniejszania się modułu sprężystości podłużnej stali wywołanych wzrostem temperatury. Decydującym czynnikiem w wielu przypadkach okazuje się zmiana charakterystyki śrub wywołana temperaturą pożarową. Autorka wykazuje także interesujące zjawisko, polegające na zmianie składnika decydującego o osiągnięciu przez węzeł nośności przy zginaniu, przy wzroście temperatury węzła.

Drugim oryginalnym efektem dysertacji są analizy wykazujące wpływ sztywności obrotowej węzłów i sztywności na przesuw podłużny na zachowanie i odporność ogniową układów ramowych. Przeprowadzone analizy, uzyskane wyniki i przedstawione uogólnienia mogą stanowić podstawę do specyfikacji zasad prowadzenia analizy globalnej konstrukcji w warunkach pożaru, w miejsce stosowanych, jak do tej pory, rozważań o charakterze lokalnym, ujmującym element lub podukład konstrukcji.

Metody rozwiązania postawionego w rozprawie problemu są poprawne z punktu widzenia reprezentowanej dyscypliny naukowej. Autorka nie przeprowadziła własnych badań doświadczalnych, lecz zastąpiła je wieloma analizami przeprowadzonymi metodą elementów skończonych. Niektóre są bardzo wyrafinowane i złożone, w szczególności analiza ramy stalowej, przeprowadzona w rozdziale 5.

Stopień zaawansowania zawartej w rozprawie wiedzy jest wysoki a interpretacja wyników uwzględnia dotychczasowy stan wiedzy. Formułując wnioski Autorka zachowała ostrożność i poczucie odpowiedzialności. Sposób uporządkowania materiału, zakres i treść przedstawionych analiz i sposób formułowania wniosków pokazują umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Autorkę.

4. Ocena formalnej postaci rozprawy

Praca jest napisana starannie, poprawną polszczyzną oraz z dbałością o stosowaną terminologię. W niektórych miejscach pojawiają się nieliczne lapsusy i niedoskonałości językowe. Zostały one przedyskutowane bezpośrednio z Doktorantką. Poniżej podano jedynie dostrzeżone niedoskonałości związane z terminologią lub techniką pisania:

- Pożądane byłoby umieszczenie spisu użytych w rozprawie symboli.
- Autorka stosuje w rozprawie tzw. harwardzki system przywoływania źródeł bibliograficznych (w nawiasach znajdujących się bezpośrednio w tekście zawarte jest nazwisko autora i rok wydania publikacji). Brak jest jednak konsekwencji w jego stosowaniu. W niektórych cytowaniach źródła posiadające kilku autorów podawane są jako (Autor 1, Autor 2, Autor 3, rok), w innych to samo źródło podane jest jako (Autor 1 i inni, rok). Na przykład na stronie 66 (wiersz 4d) jest zawarte odwołanie (Swanson i Leon, 2001) a na innej (str. 59 wiersz 1d) odwołanie do tego samego źródła podano jako (Swanson, 2001). W pewnej liczbie zamieszczonych odwołań brakuje nawiasu. W niektórych przypadkach brak jest przywołania małej litery alfabetu rozróżniającej pomiędzy publikacjami tego samego autora, a wykonanymi w tym samym roku (np. strona 65, wiersz 6d – którą publikację Autorka przywołuje?).
- Autorka bardzo często używa określenia „podstawowa sytuacja projektowa” (począwszy od str. 11, wiersz 15g; później str. 14, wiersz 9d; strona 15 wiersz 14g itd.). Według PN-EN 1990 jest to „trwała sytuacja obliczeniowa”.
- „Trzon śruby” (str. 43, wiersz 12d) to raczej trzpień śruby.
- „Stopień sztywności” na stronie 70 (wiersz 14g) to raczej współczynnik sztywności.
- W wielu przypadkach Autorka niezbyt poprawnie używa określeń „odkształcenie” zamiast „wydłużenie”. W metodzie składnikowej mamy do czynienia z zależnością siła – wydłużenie charakteryzującą poszczególne składniki (a nie „siła - odkształcenie”, jak np. podano na stronie 57 wiersz 7g, czy na stronie 66, wiersz 7d).
- Umiejętność stawiania przecinków w zdaniach należy do słabszych stron Autorki.

5. Uwagi krytyczne

Poniżej podano uwagi dotyczące merytorycznej zawartości rozprawy:

- Autorka na str. 15 formułuje problem naukowy jako „ocenę odporności ogniowej stalowych ram przechyłowych z uwzględnieniem [...] zmieniającej się wraz z narastającą temperaturą stali **podatności węzłów**”. Zdaniem recenzenta jest to pewne zwięźlenie treści rozprawy. Lepszym sformułowaniem byłoby określenie „zmieniających się wraz

z narastającą temperaturą stali **właściwości strukturalnych węzłów**”. Do właściwości strukturalnych należy zarówno sztywność (podatność), jak i nośność węzła oraz jego ciągliwość i te wszystkie cechy (ciągliwość w mniejszym stopniu) Autorka analizowała w swojej rozprawie.

- W strukturze rozprawy pewne wątki zostały rozbudowane nieco ponad miarę. Rozdział 3.3 przedstawiający macierz sztywności elementu belkowego, opis zachowania elementu poddanego nierównomiernemu ogrzaniu oraz charakterystykę nieliniowej analizy można usunąć lub znacząco skrócić bez uszczerbku dla całości rozprawy. Podobnie w rozdziale 3.5.4 Autorka pracowicie wyprowadza macierz sztywności węzła doczołowego rygiel-słup, choć w kolejnych rozdziałach efekt tej pracy nie zostaje w żaden sposób wykorzystany. Analiza ramy poddanej rozpatrywanemu scenariuszowi pożarowemu (rozdział 4.3) jest także nadmiernie rozbudowana. Zdaniem recenzenta zbędne są części dotyczące analizy według teorii I rzędu oraz uproszczonej analizy drugiego rzędu. Analiza według teorii I rzędu jest dopuszczalna tylko dla jednej ramy, tej z węzłami sztywnymi i to tylko w temperaturach 20° i 100° i 200°C (czyli w trzech przypadkach na 14 rozpatrywanych, co wynika z tablicy 4.2, strona 158). Podobnie przeprowadzanie uproszczonej analizy drugiego rzędu jest mało uzasadnione, skoro można przeprowadzić (i Autorka robi to dalej) dokładną analizę według teorii II rzędu z wykorzystaniem programu ARSA. Nadmiar stosowanych podejść obliczeniowych przenosi nieco środek ciężkości rozprawy na inne tory, niż te określone w jej tytule.
- Zdaniem recenzenta bardziej optymalnym podejściem z punktu widzenia metodologii byłoby najpierw przeprowadzenie zaawansowanej analizy MES podukładów konstrukcyjnych ram stalowych (jak w rozdziale 5), z określeniem ich temperatury krytycznej a następnie przeprowadzenie analizy tych samych ram, podobnej jak w rozdz. 4, używając modeli belkowych, z uwzględnieniem rozmaitej sztywności węzłów w celu porównania uzyskanych rezultatów (temperatury krytycznej).
- Celem rozprawy jest szacowanie temperatury krytycznej. Czy konieczne było wyznaczenie temperatury krytycznej w rozdziale 4.3 za pomocą ekstrapolacji? Dlaczego nie przeprowadzono dodatkowych obliczeń rozpatrywanych ram, przy wyższych temperaturach pożarowych, tak aby dla wszystkich przypadków wyniki uzyskać na drodze interpolacji? Dlaczego nie oszacowano temperatury krytycznej dla układów rozpatrywanych w rozdziale 5?
- Autorka niekonsekwentnie stosuje współczynniki częściowe w opisie nośności poszczególnych składników (rozdział 3.2). Formuły określające nośności niektórych

składników zawierają współczynniki częściowe (np. średnik słupa poprzecznie rozciągnięty, str. 70), inne zaś już nie (np. rozciągnięty średnik belki, str. 72).

- Autorka stwierdza (strona 59, wiersz 4d), że norma PN-EN 1993-1-8 dla modelu króćca teowego podaje „wartości nośności i sztywności specyfikowane w zakresie sprężystym”. Nośność króćca teowego, szczególnie przy modelach pierwszym i drugim zniszczenia (według PN-EN 1993-1-8) jest określana w zakresie plastycznym. Podobnie trudno zgodzić się z stwierdzeniem Autorki na następnej stronie (wiersz 6g), że „we wszystkich przypadkach ostatecznym kryterium decydującym o nośności króćca teowego jest zerwanie śrub”. Model 1 zniszczenia polega wyłącznie na uplastycznieniu blachy czołowej.
- Rys. 3.10 przedstawia sposób wyznaczenia długości efektywnej, niekoniecznie zaś, jak napisano, „linie załomu plastycznego”.
- Czy w opisie sprężysto plastycznej redystrybucji sił wewnętrznych w belce ogarniętej przez pożar z węzłami podatnymi (rozdział 4.2), nie należałoby sprecyzować ograniczenia, że są tam rozpatrywane węzły podatne o pełnej nośności? W przypadku, gdy obliczeniowa nośność węzła jest mniejsza niż nośność belki, zależność (4.35) staje się niemiernodajna.
- Analizy przeprowadzone w rozdziale 4 uwzględniają podatność węzłów na obrót $\kappa_{CR,\theta}$ oraz podatność na przesuw w kierunku podłużnym $\kappa_{C,\theta}$. Ta ostatnia jest w istocie wyłącznie podatnością więzów ograniczających swobodę wydłużania lub skracania rygla. Zdaniem recenzenta ta podatność mogłaby łatwo zostać uzupełniona o człon określający podatność samego węzła na przesuw i wówczas takie ujęcie bardziej odpowiadałoby tytułowi rozprawy.
- W bibliografii brak jest publikacji Yee i Melchera cytowanej na stronie 59 (wiersz 10d) oraz publikacji Robertsa, cytowanej na stronie 73 (wiersz 3g). Recenzentowi nie udało się także znaleźć w treści rozprawy odwołania do publikacji [5] i [33]. Usterki wynikają zapewne z niedoskonałości przyjętego przez Autorkę systemu przywoływania źródeł bibliograficznych.

6. Wniosek końcowy

Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością tematów związanych zarówno z podatnością węzłów, jak i z zagadnieniem globalnej analizy konstrukcji stalowych w sytuacji pożarowej. Uwagi krytyczne przedstawione w poprzednim punkcie nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny i porządkujący.

Opiniowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Sneli rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące wiarygodnej oceny odporności ogniowej stalowych ram przechyłowych z uwzględnieniem zmieniającej się, wraz z narastającą temperaturą, podatności węzłów. Sformułowany w rozprawie cel został zdaniem recenzenta osiągnięty. Ponadto w opinii recenzenta rozprawa ma znaczenie praktyczne.

Biorąc powyższe pod uwagę, uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 r. (Dz. U. 2016 poz. 1586) w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wniosuję o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

