



RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGRA INŻ. ROBERTA CYBULSKIEGO

„ANALYSIS OF LOCAL STABILITY

OF DOUBLY CORRUGATED THIN-WALLED STRUCTURES”

(ANALIZA STATECZNOŚCI LOKALNEJ

PODWÓJNIE GIĘTYCH KONSTRUKCJI CIENKOŚCIENNYCH)

Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejszą rozprawę opracowałem na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Pana profesora Jana Ślusarka, wyrażoną w piśmie z dnia 30 marca 2015 roku, nawiązującym do uchwały Rady wymienionego Wydziału, podjętej w dniu 25 marca 2015r.

Formalną podstawą recenzji jest umowa z dnia 30 marca 2015r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Roberta Cybulskiego pt. „Analysis of local stability of doubly corrugated thin-walled structures (Analiza stateczności lokalnej podwójnie giętych konstrukcji cienkościennych)”. Praca ta została przygotowana na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Pana dra hab. inż. Ryszarda Walentyńskiego prof. Pol. Śl. jako promotora.

Opiniowana dysertacja zawarta jest w jednym tomie liczącym 180 stron, w języku angielskim. Towarzyszy jej załącznik zawierający polskojęzyczne streszczenie.

Problematyka rozprawy

Jako tematykę swojej rozprawy Doktorant wybrał problematykę dotyczącą zachowania się elementów konstrukcyjnych wykonanych w postaci podwójnie giętych profili łukowych z cienkiej blachy stalowej. Elementy takie wykorzystywane są do wznoszenia hal stalowych w technologii ABM (Automatic Building Machine). Opisane profile są dość powszechne

w Stanach Zjednoczonych, natomiast coraz częściej stosowane są w Europie, w tym w Polsce. Problemem projektowym jest odwzorowanie obliczeniowe zachowania się podwójnie giętych profili pod obciążeniem, bowiem procedury zawarte w Eurokodzie 3 prowadzą do zawyżenia nośności obliczeniowej. Podstawowym tego powodem jest brak właściwego opisu zjawiska utraty stateczności lokalnej w takich profilach.

W powyższym kontekście Doktorant jako podstawowy cel pracy przyjął *pełne zrozumienie zjawiska stateczności lokalnej podwójnie giętych paneli cienkościennych w celu zapewnienia punktu wyjścia dla procedur obliczeniowych tych konstrukcji*. Jako tezę pracy zrozumieć tu można zapis o przewidywanej różnicy mechanizmu utraty stateczności lokalnej pomiędzy panelami podwójnie giętymi i panelami prostymi.

W opisanym stanie rzeczy temat badawczy podjęty przez Doktoranta należy uznać jako aktualny i ważny.

Treść rozprawy

Treść rozprawy zawarta jest w ośmiu rozdziałach, uzupełnionych wykazem cytowanej literatury (102 pozycje, w tym 13 autorstwa lub współautorstwa Doktoranta).

Rozdział 1 (10 stron) zawiera opis systemu konstrukcyjnego będącego podstawą prowadzonych prac, a dalej sformułowanie podejmowanych problemów, celu i tezy rozprawy.

W rozdziale 2 (22 strony) Autor przedstawia stan wiedzy w zakresie badań i obliczeń podwójnie giętych profili cienkościennych. W pierwszej części rozdziału opisane i dyskutowane są zasady technologii wytwarzania elementów i wznoszenia obiektów, zagadnienia związane z modelowaniem elementów oraz problemy spotykane przy projektowaniu i użytkowaniu obiektów. Druga, obszerniejsza część rozdziału poświęcona jest przeglądowi zagadnień bezpośrednio związanych ze zjawiskiem utraty stateczności lokalnej w przedmiotowych elementach

Rozdział 3 (7 stron) poświęcony jest krótkiemu opisowi modeli stosowanych przez Doktoranta w numerycznej analizie zjawiska utraty stateczności lokalnej, a rozdział 4 (15 stron) zawiera podstawy obliczeniowej analizy zjawiska (w tym procedury Eurokodu 3).

Rozdział 5 (23 strony) opisuje wstępne badania numeryczne (ABAQUS) i testy laboratoryjne. Doktorant ograniczył tutaj długość badanych elementów, co pozwoliło na uniknięcie zniszczenia wskutek utraty stateczności globalnej. W pierwszej kolejności analizowane były numerycznie modele proste – pierwsza postać deformacji zależała tutaj od typu analizy (liniowa / nieliniowa). Kolejno analizowane były modele podwójnie gięte. Uzyskany obraz deformacji oraz nośność zależał tutaj od typu analizy (liniowa / nieliniowa)

oraz od miejsca przyłożenia siły. Generalnie, utrata stateczności lokalnej zawsze następowała w miejscu któregoś z fałdowań poprzecznych. Wstępnym wnioskiem z tego etapu analizy było wskazanie na analizę nieliniową, jako lepiej opisującą zjawisko. Istotną uwagą jest tutaj fakt przyjęcia w modelowaniu idealnej geometrii elementów, na podstawie uśrednionych pomiarów.

Wstępne badania laboratoryjne obejmowały 3 modele elementów prostych oraz 3 serie po 3 modele elementów pofałdowanych (każda seria odpowiadała innemu punktowi przyłożenia siły).

Porównanie wyników badań modelowych i analizy nieliniowej dało zadowalającą zbieżność, lecz niepokojące było każdorazowe przeszacowanie nośności uzyskane w efekcie analizy numerycznej. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu była niedoskonałość wykonania rzeczywistych elementów, obarczonych nieznaną wielkością imperfekcjami.

Rozdział 6 jest bezpośrednią konsekwencją powyższej konkluzji, zawiera bowiem (na 29 stronach) obszerny opis identyfikacji cech geometrycznych i materiałowych elementów pofałdowanych. Szczególnie istotne jest tutaj rozpoznanie geometrii elementu, bowiem nawet niewielkie imperfekcje stanowić mogą „punkt startowy” utraty stateczności lokalnej. Do rozpoznania rzeczywistej geometrii próbek użyto skanera optycznego 3D odwzorowującego kształt skanowanego elementu. Uzyskana tak chmura punktów została odwzorowana w postaci modelu przestrzennego (z dokładnością 25 μm) i – poprzez model CAD – przetransponowana do programu ABAQUS. Właściwości materiałowe rozpoznano w bezpośrednich badaniach 15 próbek wyciętych z paneli (prostych i pofałdowanych). Szczególnie godne zainteresowania są tutaj próbki wycięte z naroży elementów płaskich (wyraźny wzrost granicy plastyczności i wytrzymałości) oraz wycięte ze stref pofałdowanych (brak istotnych zmian właściwości mechanicznych).

W rozdziale 7 (49 stron) zawarte są opisy i wyniki badań najistotniejszych z punktu widzenia celu ocenianej pracy. Dla elementów płaskich autor analizuje obraz utraty stateczności lokalnej w modelach o różnej długości (co pozwala na ostateczne przyjęcie długości elementu badawczego jako 540 mm), a dalej wylicza nośność elementu płaskiego zgodnie z procedurami Eurokodu 3. Według tych samych procedur (jak dla przekroju klasy 4, z pominięciem poprzecznego fałdowania) wylicza nośność elementu podwójnie fałdowanego. Tak otrzymane wartości porównane są następnie z wynikami badań laboratoryjnych i analiz numerycznych.

Analizy numeryczne modelu płaskiego prowadzone były w dwóch krokach – uzyskana w pierwszym kroku deformacja wprowadzana była w kroku drugim jako imperfekcja

geometryczna, w dwóch różnych procedurach obliczeniowych. Modele zróżnicowano także pod względem właściwości materiałowych, uwzględniając lub nie, podwyższenie wytrzymałości stali w narożach. W celu uniknięcia niestateczności dystorsyjnej na model nałożono odpowiednie więzy wzdułuż swobodnych krawędzi.

Analiza numeryczna modelu pofałdowanego prowadzona była w trzech wersjach, lecz na elementach o geometrii uzyskanej ze skanowania 3D, to jest odwzorowującej zarówno rzeczywisty układ fałd, jak i krzywiznę podłużną całego elementu (odpowiadającą teoretycznemu promieniowi gięcia 5,0 m, 7,5 m i 10,0 m).

We wszystkich przypadkach obliczeniowych wyniki wyprowadzono w postaci dwóch sił: nośności P_u (odpowiadającej w elemencie płaskim sile przy której materiał osiąga w pierwszym punkcie granicę plastyczności, a w elemencie pofałdowanym sile powodującej skrócenie elementu o 0,01%) oraz siły niszczącej $P_{cr,M}$ będącej największą siłą przenoszoną przez element, a także w postaci map naprężeń i deformacji.

Wyniki uzyskane dla modeli płaskich były w czterech liczonych kombinacjach (2 procedury \times 2 zestawy właściwości materiałowych) nieznacznie (w granicach około 2%) zróżnicowane, o czym dalej, w uwagach krytycznych.

W modelach pofałdowanych wyniki uzyskane dla poszczególnych elementów w dwóch procedurach nieliniowych były bardzo spójne (różnice do 2,3%), natomiast wyraźniej widoczny był wpływ przyjęcia wyższych parametrów stali w narożach (wzrost nośności w granicach od 7,5% do 10,3% i wzrost siły niszczącej w granicach od 3,7% do 5,9%). Bardzo istotna z praktycznego punktu widzenia była zależność wyników od promienia gięcia całego panelu. Przy przyjęciu panelu giętego z promieniem 5,0 m jako podstawowego, nośność elementu o promieniu 7,5 m rosta w granicach od 11,7% do 14,3%, a elementu o promieniu 10,0 m w granicach od 24,3% do 24,7%. Analogicznie, wzrost siły niszczącej wynosił od 6,5% do 7,7% (promień 7,5 m) oraz od 18,0% do 19,3% (promień 10,0 m).

Badania laboratoryjne wykonane zostały na 3 próbkach każdego typu. Wyniki uzyskane na modelach paneli płaskich były jednorodne, lecz wyraźnie (o kilkanaście procent) niższe od uzyskanych w analizie numerycznej. Autor tłumaczy to nieuwzględnieniem w obliczeniach numerycznych drobnych wstępnych imperfekcji modeli (nie były one skanowane).

Wyniki badań modeli pofałdowanych również były jednorodne w ramach każdej z grup (różniących się promieniem gięcia) i nieco wyższe (o 3,6% do 4,7%) od uzyskanych w analizie numerycznej. W przypadku pojedynczych próbek wcześniej skanowanych różnica wyników oscylowała wokół 1%. Jednocześnie z powyższym, spójne wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych i analizie numerycznej były wyraźnie niższe od rezultatów uzyskanych w obliczeniach elementu wg Eurokodu, jak dla przekroju klasy 4.

Bardzo zbliżony był obraz zniszczenia próbek uzyskany w analizie numerycznej i rzeczywisty, z badań. W przypadku elementów pofałdowanych dochodziło do zaciśnięcia pojedynczych fałd, co nazwano efektem akordeonu.

W rozdziale 8, liczącym 7 stron, Autor zawarł podsumowanie i wnioski oraz przedstawił plany dalszych prac badawczych. Elementy te zostaną omówione w dalszej części recenzji.

Merytoryczna ocena rozprawy

Już na początku tej części recenzji stwierdzam, że opiniowaną rozprawę doktorską Pana magistra inżyniera Rafała Cybulskiego oceniam pozytywnie. Za taką oceną przemawiają następujące argumenty.

- Temat rozprawy jest dobrany trafnie, ma bowiem zarówno znaczenie poznawcze, jak i bezpośrednie odniesienie do praktyki budowlanej. Jest to, w moim pojęciu, szczególnie cenne, świadczy bowiem o umiejętności sformułowania tematu badawczego powiązanego z rzeczywistymi problemami konstrukcyjnymi.
- Autor wykazał dobrą znajomość poruszanej tematyki, wyrażoną w krótkim, ale treściwym przeglądzie stanu wiedzy w zakresie technologii, badań i obliczeń podwójnie giętych paneli stalowych.
- Program badań i obliczeń został prawidłowo dobrany i umiejętnie zrealizowany. Na szczególne podkreślenie zasługuje tutaj wykorzystanie w badaniach nowoczesnej technologii przestrzennego skanowania optycznego, co pozwoliło na modelowanie elementów w ich rzeczywistej geometrii (wraz z drobnymi nawet imperfekcjami), a w efekcie na uzyskanie znakomitej korelacji pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i analiz numerycznych (w przypadku modeli skanowanych różnica wyników oscylowała wokół 1%).
- Wyniki badań i analiz zostały przedstawione w sposób bardzo zwięzły, ale jednocześnie jasny i czytelny. Ta zwięzłość nie jest tutaj wadą, bowiem ułatwia wychwycenie i zrozumienie najistotniejszych elementów pracy.
- Autor wykazał się umiejętnością prawidłowego i logicznego wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników badań i analiz. Jest to cenna umiejętność, bowiem najlepiej nawet opracowane wyniki bez odpowiedniej interpretacji pozostają jedynie zbiorem liczb i wykresów.

Wśród szczegółowych osiągnięć poznawczych pracy wymienić należy:

- wykazanie, że panele proste można traktować obliczeniowo jako przekroje klasy 4 (wg Eurokodu),

- udowodnienie, że panele podwójnie fałdowane nie mogą być liczone jako przekroje klasy 4, bowiem prowadzi to do niebezpiecznego zawyżenia nośności obliczeniowej,
- wykazanie istotnie różnego mechanizmu utraty stateczności lokalnej w panelu prostym i pofałdowanym,
- wykazanie, że możliwe jest wiarygodne oszacowanie nośności panelu w analizie numerycznej,
- wskazanie metody skanowania optycznego jako narzędzia pozwalającego na uściślenie geometrii modelu numerycznego, a w efekcie na uzyskanie lepszej zgodności wyników.

Obowiązkiem recenzenta jest także sformułowanie uwag krytycznych, w tym o charakterze dyskusyjnym. Na szczęście są one nieliczne i w żadnym wypadku nie umniejszają wartości pracy.

- Niepokój budzi Tabela 7.3, a w szczególności kolumna w której przedstawiono wartości nośności P_u . Dlaczego elementy w których przyjęto podwyższenie parametrów wytrzymałościowych stali w narożach wykazują nośność niższą od elementów o stałych parametrach materiałowych?
- Skąd, przy eksporcie modelu płaskiego z pierwszą postacią deformacji, zmiana znaku krzywizny deformacji?
- Jaki był zakres geometryczny wprowadzenia w narożach materiału o lepszych cechach wytrzymałościowych. Czy zmiana cech materiałowych w modelu miała charakter skokowy, czy też zastosowano strefę przejściową (elementy o cechach pośrednich)?
- Czym Autor tłumaczy nierealnie wysoką wartość siły krytycznej dla modelu pofałdowanego w analizie liniowej (str. 138)?
- Pomimo fachowo przeprowadzonych i rzetelnie udokumentowanych badań modelowych trzeba pamiętać, że zostały one ograniczone do niewielkiej liczby niemal identycznych modeli. Tym samym bazujące na nich wnioski nie mają charakteru ogólnego, co powinno być wyraźnie podkreślone w punkcie 8.2 (zwłaszcza, że Autor ma świadomość wskazanych ograniczeń, na co wskazują zapisy w punkcie 8.3, o zasadności przebadania innych systemów konstrukcyjnych).
- Brakuje mi praktycznych wniosków w zakresie analizy nośności paneli pofałdowanych. Dla przeciętnego projektanta analiza numeryczna na poziomie przedstawionym w pracy jest nierealna, zatem oczekuje on raczej zestawu wzorów, tablic lub nomogramów pozwalających na bezpieczne, a jednocześnie ekonomiczne

zaprojektowania obiektu z typowych elementów. W tym zakresie jedynymi wprost stosowanymi wynikami są wykresy 8.1 i 8.2, prezentujące zależność nośności przekroju od promienia gięcia paneli.

W zakresie edytorskim praca stoi na dobrym poziomie – razi jedynie kilka rysunków zeskanowanych z Eurokodu.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Roberta Cybulskiego pt. „Analysis of local stability of doubly corrugated thin-walled structures (Analiza stateczności lokalnej podwójnie giętych konstrukcji cienkościennych)” stanowi cenny wkład w rozwój wiedzy w zakresie dość często stosowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Jest to tym istotniejsze, że Autor wykazał fakt niebezpiecznego zawyżania nośności rozpatrywanych konstrukcji przy obliczaniu ich na podstawie bezpośrednich zapisów normowych.

Pomimo sformułowanych wcześniej nielicznych uwag krytycznych uważam recenzowaną pracę za oryginalną i cenną, spełniającą wymagania stawiane w Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Ponadto, co istotne, recenzowana praca w pełni udowadnia spełnienie przez Doktoranta wymagań stawianych na ósmym poziomie uczenia się (wg Europejskich Ram Kwalifikacji) w zakresie wiedzy, umiejętności i kompetencji.

Tym samym wnoszę o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Roberta Cybulskiego do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.



.....
dr hab. inż. Jacek Hylimka, prof. nzw. w Pol. Śl.