

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Kołodziejczyk**

*pt. Efektywność stosowania stali o podwyższonej wytrzymałości jako zbrojenia żelbetowych elementów prętowych*

### **1. Podstawa opracowania**

Pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, WP Prof. dr hab. inż. Dariusza Gawina, z dnia 1.IV.2016 r. informujące o powołaniu niżej podpisanego na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Eweliny Kołodziejczyk; ustawa z dnia 14 III 2003, Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595 (z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

### **2. Cel i tezy pracy**

Stal podwyższonej wytrzymałości (HSS – High Strength Steel) zaczyna być coraz szerzej stosowana do zbrojenia konstrukcji i elementów żelbetowych. Autorka w rzetelny i wyczerpujący sposób udokumentowała ten proces w rozdziale 1 pracy. Jednym z obszarów gdzie stal HSS znalazła praktyczne zastosowanie są silnie obciążone ściskane słupy. W elementach takich stosowanie stali HSS może przynieść wymierne korzyści redukując nadmierny stopień zbrojenia i/lub zmniejszając wymiary przekroju poprzecznego bądź umożliwiając zastosowanie elementów żelbetowych w miejsce stalo-betonowych (tzn. z użyciem kształtowników stalowych). Prawidłowa ocena nośności i odkształcalności słupów zbrojonych stalą HSS stanowi problem, zarówno badawczy, jaki i projektowy. Obecnie stosowane normowe metody projektowania (EC 2, Model Code 2010, ACI 318) nie pozwalają na wykorzystanie obliczeniowej granicy plastyczności przy osiowym ściskaniu przekroju już dla stali St 500. Autorka poprawnie zdiagnozowała istniejący problem. Zgodnie z sugestiami zawartymi w literaturze przedmiotu rozwiązaniem problemu może być uwzględnienie skrępowania betonu i efektów pełzania. Uwzględnienie tych czynników może prowadzić do przyjęcia większych wartości odkształceń granicznych betonu przy ściskaniu niż to wynika z ustaleń normowych. Autorka postanowiła w pracy w sposób wszechstronny zbadać eksperymentalnie i na drodze symulacji numerycznych czynniki warunkujące efektywność wykorzystania stali HSS w elementach ściskanych. Doprowadziło to do sformułowania następujących 3 tez pracy:

**Teza I** – Stopień wykorzystania wytrzymałości stali zbrojeniowej w elemencie prętowym, traktowany jako wskaźnik efektywności tego zbrojenia, zależy od możliwości odkształcania się tego elementu na skutek obciążenia.

**Teza II** – Zdolność elementu prętowego ze zbrojonego betonu do odkształcania się zależy od wzajemnie ze sobą powiązanych czynników. Są to stopień podłużnego zbrojenia przekroju, stopień skrępowania betonu, cechy wytrzymałościowe betonu i zbrojenia, mimośród siły ściskającej, smukłość słupa, pełzanie betonu.

**Teza III** – Stopień efektywności stali HSS zastosowanej jako zbrojenie może być bardzo różny w zależności od konfiguracji czynników wpływających na odkształcenia przekroju. Należy go każdorazowo ustalać obliczeniowo, uwzględniając rzeczywiste warunki materiałowe i konstrukcyjne elementu.

### **3. Szczegółowa zawartość pracy**

Recenzowana praca składa się z dwóch tomów. Tom I zawiera podstawową treść rozprawy, podzieloną na 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis najważniejszych oznaczeń, bibliografię oraz załączniki A i B. Tom I liczy 10 stron o numeracji rzymskiej (streszczenia, spis treści, spis najważniejszych oznaczeń) i 163 strony o numeracji arabskiej (podstawowa treść i załączniki). Bibliografia liczy 66 pozycji. Tom II liczy 102 strony i zawiera załączniki 1, 2 i 3.

Rozdział 1. „Wprowadzenie” przedstawia genezę tematu. Autorka omawia w nim pojawienie się stali HSS w Europie (stale SAS 670/800 i SAS 950/1050), Ameryce (Grade 100 i Grade 120) i Japonii (Grade 135 i Grade 185), ich dotychczasowe zastosowanie w konstrukcjach żelbetowych, istniejące wytyczne normowe, przeprowadzone badania i piśmiennictwo naukowe. Autorka dołożyła starań by omówić w możliwie pełny sposób stan wiedzy na temat elementów i konstrukcji żelbetowych zbrojonych stalami podwyższonej wytrzymałości. Nie ogranicza się do problematyki elementów ściskanych, ale omawia również badania i wiedzę dotyczącą zginania, ścinania, ugięć, zarysowania, przyczepności i zakotwienia. Następnie Autorka przedstawia cel pracy i omawia szczegółowo jej zakres. Rozdział zamyka postawienie 3 tez pracy.

Rozdział 2. „Stan wiedzy” zawiera szczegółowe omówienie literatury przedmiotu w zakresie ograniczonym do problemów analizowanych przez Autorkę w dalszych punktach pracy. Punkt 2.1 przedstawia 3 raporty amerykańskie dotyczące stali HSS przygotowane odpowiednio na zlecenie ACI, AASHTO i NIST. W omówieniu raportów Autorka skoncentrowała się na przedstawieniu cech mechanicznych stali, możliwych opisach związków naprężenie-odkształcenie, przeprowadzonych badaniach elementów żelbetowych w zakresie zginania i ściskania oraz rekomendacjach do projektowania. Punkt 2.2 omawia 3 serie badań słupów żelbetowych zbrojonych stalą HSS.

Przedstawione badania dotyczą słupów wykonanych z betonu zwykłego oraz HPC (High Performance Concrete). Autorka koncentruje się na analizie odkształceń granicznych w betonie i związanego z nimi mniejszego lub większego wykorzystania wytrzymałości stali. Punkt 2.3 przedstawia 3 teoretyczne opisy skrzepowania (confinement) betonu w słupach żelbetowych i związane z nimi możliwości uzyskania odpowiednio dużych odkształceń granicznych. Punkt 2.4 opisuje 5 wybranych badań słupów żelbetowych pod obciążeniem długotrwałym. Badania dotyczą słupów krępych i smukłych wykonanych z betonu zwykłego i HPC dla różnych mimośrodów. Omawiany rozdział ma charakter świadomie wybiórczy, skoncentrowany na problemie zwiększenia odkształceń granicznych w betonie poprzez wprowadzenie skrzepowania lub uwzględnienia pełzania od obciążenia długotrwałego. Autorka dochodzi do wniosku, że korzystny wpływ skrzepowania i pełzania ogranicza się do elementów krępych obciążonych z małym mimośrodem.

Rozdział 3. „Obliczenia przekroju wg zaleceń EC2” przedstawia analizę nośności i odkształcalności przekrojów żelbetowych zbrojonych stalą HSS zgodnie z założeniami EC2. W Stanie Granicznym Nośności Autorka buduje krzywe interakcji (krzywe nośności granicznej) według metody uproszczonej – zakładając prostokątny wykres naprężeń w betonie ściskanym i odpowiednio ograniczając odkształcenia graniczne (rozdzielając beton zwykły i HPC). W Stanie Granicznym Użytkowalności Autorka buduje zależności moment-krzywizna dla różnych poziomów siły osiowej, wykorzystując metodę analizy warstwowej przekroju (w wersji zaproponowanej przez Czkwianianca i Kamińską) przy przyjęciu realistycznego wykresu naprężenie-odkształcenie betonu zarówno dla ściskania, jak i rozciągania (uwzględnienie zjawiska usztywnienia przy rozciąganiu dla betonu zarysowanego - „tension stiffening”). Autorka dochodzi do wniosku, że stosując metody analizy zgodne z EC2 stal HSS może być w sposób efektywny wykorzystana w elementach zginanych lub ściskanych z dużym mimośrodem (jednak przy odpowiednio zwiększonej krzywiznie, co może prowadzić do nadmiernych ugięć i zarysowań). Natomiast, w przypadku małego mimośrodu ograniczenia normowe narzucone na odkształcenia graniczne betonu prowadzą do sprężystej pracy stali HSS w chwili wyczerpania nośności granicznej – co przekreśla korzyści możliwe do uzyskania ze stosowania tej stali.

Rozdział 4. „Badania doświadczalne stali zbrojeniowej” przedstawia badania prętów zbrojeniowych o średnicy 18 mm wykonanych ze stali SAS 670/800, SAS 950/1050 i St500, splotów sprężających 7x5 mm oraz prętów o średnicy 5 i 6 mm ze stali St500 i St800 użytych na strzemiona. Badania wykonano bardzo starannie uzyskując pełne krzywe naprężenie-odkształcenie, osobno dla rozciągania i ściskania. Dla stali SAS 670/800, SAS 950/1050 uzyskano inne zależności naprężenie-odkształcenie dla rozciągania i ściskania z wyraźnie niższą umowną granicą plastyczności przy ściskaniu. Badania na ściskanie całego splotu 7x5 mm (nie pojedynczego drutu) zakończyły się niepowodzeniem.

Rozdział 5. „Badania doświadczalne słupów żelbetowych” przedstawia badania własne Autorki podzielone na dwie serie. Seria I obejmowała słupy o przekroju kołowym zbrojone prętami o średnicy 18 mm ze stali SAS 670/800 i SAS 950/1050. Słupy były krępe o wysokości 60 cm i średnicy 20 cm wykonane z betonu o dwóch projektowanych wytrzymałościach na ściskanie 100 MPa (8 słupów) i 25 MPa (2 słupy). Liczba słupów wynosiła 10. Zmiennymi parametrami w badaniach były: stopień zbrojenia (3.23 i 8.09 %), rozstaw strzemion (5 i 30 cm), zastosowanie maty CFRP jako zbrojenia poprzecznego. Słupy zostały poddane osiowemu ściskaniu. Słupy wykonane z betonu o wytrzymałości 25 MPa wstępnie obciążono cyklicznie w okresie 14 dni. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń podłużnych i poprzecznych słupów w funkcji przyłożonego obciążenia oraz szczegółowo opisano formę i mechanizm zniszczenia. Na podstawie znanej z eksperymentu krzywej naprężenie-odkształcenie dla stali (patrz rozdział 4) oszacowano siłę, a następnie naprężenie przenoszone przez beton w całym przekroju i w rdzeniu ograniczonym strzemionami (dla rozstawu strzemion 5 cm). Otrzymane wyniki wskazują, że decydujący wpływ na nośność słupów miał rozstaw strzemion – dla strzemion o rozstawie 5 cm proces zniszczenia zaczynał się od odspojenia otuliny, po czym następowało zmiżdżenie betonu w rdzeniu. Dla strzemion o rozstawie 15 cm proces zniszczenia miał charakter gwałtowny wraz z wyboczeniem prętów zbrojenia głównego. Seria II obejmowała 5 krępych słupów prostokątnych (wymiary słupów 14 x 25 x 60 cm) wykonanych z betonu o wytrzymałości 61.7 MPa zbrojonych 4 splotami 7x5 mm bez uprzedniego sprężenia. Zmiennym parametrem był rodzaj i rozstaw strzemion oraz zastosowanie maty CFRP jako zbrojenia poprzecznego (dla jednego słupa). Słupy poddano osiowemu ściskaniu. Tak jak dla słupów serii I przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń podłużnych i poprzecznych słupów w funkcji przyłożonego obciążenia oraz szczegółowo opisano formę i mechanizm zniszczenia. Tak samo jak w przypadku słupów serii I na podstawie odkształceń słupa i znajomości krzywej naprężenie-odkształcenie dla stali (patrz rozdział 4) oszacowano rozdział siły w słupie na beton i stal i wartość naprężenia w betonie w chwili zniszczenia. Podobnie jak dla serii I charakter zniszczenia zależał od rozstawu strzemion.

Rozdział 6. „Propozycja obliczeniowego ujęcia czynników wpływających na nośność” przedstawia procedurę obliczeniową opracowaną przez Autorkę w celu numerycznego ustalenia zależności siła-moment-krzywizna-przemieszczenie dla słupa przegubowo podpieranego ze stałą wartością mimośrodową początkową (schemat statycznie wyznaczalny). Autorka bazowała na sprawdzonej i dobrze zweryfikowanej doświadczalnie metodzie analizy warstwowej przekroju (w wersji zaproponowanej przez Czkwianianca i Kamińską). Autorka rozszerzyła metodę o trzy ważne elementy: wprowadzenie dla betonu w strefie ściskanej krzywych naprężenie-odkształcenie umożliwiających opis betonu w stanie skrępowania (według prac Razvi-Saatcioglu i Pellegrino-Modena), uwzględnienie efektów drugiego rzędu (na drodze iteracyjnej zakładając przybliżoną

sinusoidalną postać deformacji) oraz stosunkowo proste, heurystyczne ujęcie wpływu pełzania betonu (zakładając znajomość współczynnika pełzania betonu). Opracowana procedura obliczeniowa została zweryfikowana poprzez porównanie wyników analizy numerycznej z badaniami serii I. Należy ocenić, że osiągnięto bardzo dobrą zgodność zarówno co do określenia wartości siły niszczącej, jak i przebiegu zależności siła-odkształcenie podłużne. Równie dobrze wypadła weryfikacja metody na 46 smukłych słupach przebadanych przez Goyala i Jacksona oraz 6 słupach z badań Khalila i współpracowników. W tych przypadkach było możliwe porównanie z badaniami dotyczącymi słupów o różnych smukłościach, różnych mimośrodkach i obciążonych w części długotrwale. Niestety nie powiodła się weryfikacja na słupach serii II – nie osiągnięto zadowalającej zgodności z eksperymentem, ani co do wartości siły niszczącej, ani co do przebiegu zależności siła-odkształcenie podłużne (pozytywny wyjątek stanowiły obliczenia dla słupa S-5). Rzeczą charakterystyczną dla słupów S-1 do S-4 jest dobra zgodność zależności siła-odkształcenie podłużne otrzymanych z symulacji numerycznych dla samego betonu z zależnościami siła-odkształcenie podłużne otrzymanymi w eksperymencie dla całego słupa. Zjawisko to świadczy o nieprzeniesieniu siły ściskającej przez sploty stalowe dla tych słupów.

Rozdział 7. „Obliczeniowa ocena efektów stosowania stali HSS” stanowi studium parametryczne nośności i odkształcalności słupów ściskanych zbrojonych stalą HSS wykonane za pomocą procedury obliczeniowej przedstawionej w rozdziale 6. Autorka przeprowadziła analizę dla dwóch różnych wytrzymałości betonu (30 i 90 MPa), trzech stopni zbrojenia (0.5, 4 i 10 %) oraz przy uwzględnieniu lub pominięciu efektu skrępowania. Najpierw zbudowano i przebadano krzywe interakcji (nośności granicznej) na szczeblu przekroju poprzecznego. Następnie zbadano wpływ smukłości (5 różnych smukłości dla dwóch wartości mimośrodów). Przeanalizowano również wpływ pełzania dla przekroju osiowo ściskanego i wpływ pełzania dla elementów mimośrodkowo ściskanych o różnych smukłościach. (trzy różne wartości mimośrodu i trzy różne smukłości). Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdzają w sposób jakościowy i ilościowy obserwacje podawane w literaturze (patrz rozdział 2).

Rozdział 8. „Wnioski i uwagi końcowe” stanowi posumowanie pracy. Autorka rekapitułuje zawartość pracy i formułuje 5 wniosków końcowych. Wnioski te wynikają z analizy parametrycznej przeprowadzonej w rozdziale 7 i mogą w zwartej formie być streszczone jak następuje: Stal HSS jest wykorzystana w efektywny sposób przy zginaniu i ściskaniu z dużym mimośrodem, kiedy o nośności elementu decyduje stal rozciągana. W przypadku małego mimośrodu w celu efektywnego wykorzystania stali HSS konieczne jest wytworzenie efektu skrępowania w betonie ściskanym w celu zwiększenia odkształcenia granicznego. Efekt skrępowania daje się wytworzyć wyłącznie dla elementów krępych ściskanych osiowo lub z bardzo małym mimośrodem. Zwiększenie mimośrodu i/lub zwiększenie smukłości niweluje efekt

skrępowania. Uwzględnienie pełzania prowadzi tylko w pewnych przypadkach do bardzo ograniczonego wzrostu nośności (nie więcej niż o 9 %). Łączne działanie pełzania i efektów II rzędu dla słupów smukłych może prowadzić do zmniejszenia nośności. Autorka stwierdza, że sformułowane wnioski dowodzą słuszności 3 tez pracy postawionych w rozdziale 1. Rozdział zamyka propozycja kierunków dalszych badań. Autorka postuluje prowadzenie dalszych badań dotyczących smukłych słupów zbrojonych stalą HSS z uwzględnieniem pełzania betonu, przede wszystkim przy użyciu symulacji numerycznych.

Załącznik A (tom I) podaje szczegółowe wyniki analiz numerycznych dla krzywych interakcji na szczeblu przekroju, których rezultaty przedstawiono w rozdziale 7.

Załącznik B (tom I) podaje szczegółowe wyniki analiz numerycznych wpływu pełzania na szczeblu przekroju, których rezultaty przedstawiono w rozdziale 7.

Załącznik 1 (tom II) stanowi szczegółowy raport z badań materiałowych stali i betonu.

Załącznik 2 (tom II) stanowi szczegółowy raport z badań słupów serii I.

Załącznik 3 (tom II) stanowi szczegółowy raport z badań słupów serii II.

## **4. Ogólna ocena pracy**

### **4.1 Aspekty pozytywne**

Należy podkreślić bardzo trafny wybór tematu – stal HSS staje się obecnie coraz szerzej stosowana w praktyce dla konstrukcji i elementów żelbetowych, a brak jest jeszcze wystarczającej liczby prac eksperymentalnych i symulacji numerycznych, które wyjaśniałyby w pełni zachowanie się elementów zbrojonych stalą HSS. Projektanci chcący zastosować taką stal napotykają na brak kompleksowych regulacji normowych. Praca Autorki przyczynia się do poszerzenia wiedzy w zakresie zachowania się krępych i smukłych słupów żelbetowych zbrojonych stalą HSS.

Autorka bardzo umiejętnie połączyła w pracy badania eksperymentalne z symulacjami numerycznymi. Zastosowana metodyka jest przykładowa – przeprowadzenie własnych badań eksperymentalnych, budowa modelu numerycznego, szeroka weryfikacja symulacji numerycznych na badaniach własnych i znanych z literatury, tych które mają charakter wzorcowy.

Według recenzenta podstawową zaletą pracy jest stworzenie sprawnego i wiarygodnego modelu numerycznego, który może służyć do prowadzenia studiów parametrycznych i analiz ilościowych, stanowiąc tym samym cenną pomoc dla badaczy i projektantów (rozdział 6).

Autorka w pracy przeprowadziła obszerne studia parametryczne. Pozwoliły one na pogłębienie wiedzy o zachowaniu się krępych i smukłych słupów żelbetowych zbrojonych stalą HSS w sensie ilościowym. Między innymi Autorka dokonała dokładnej analizy wpływu pełzania na nośność (rozdział 7). Wyniki symulacji numerycznych prowadzą do wniosku, że wszystkie 3 tezy postawione przez Autorkę w rozdziale 1 zostały pozytywnie zweryfikowane.

## 4.2 Aspekty krytyczne

Tytuł pracy nie jest trafny – jest on zbyt szeroki. Autorka skupia się na elementach mimośrodowo ściskanych, przede wszystkim rozpatrując Stan Graniczny Nośności, tytuł zaś sugeruje ogólną analizę żelbetowych elementów prętowych.

Autorka nie przeprowadziła badań zależności naprężenie-odkształcenie dla zastosowanego w badaniach betonu. Udział betonu w przenoszeniu siły ściskającej w słupach badanych jest wyznaczany pośrednio jako różnica pomiędzy całkowitą siłą, a siłą przenoszoną przez stal. Znajomość charakterystyki naprężenie-odkształcenie dla betonu umożliwiłaby próbę bezpośredniego wyznaczenia siły przenoszonej przez beton na podstawie odkształceń. W efekcie końcowym można by uzyskać wiedzę o różnicy zachowania się betonu przy ściskaniu próbki walcowej i betonu ściskanego w słupie.

Brak jest pomiarów odkształcenia stali zbrojeniowej w słupach. Utożsamianie odkształceń pomierzonych na powierzchni zewnętrznej słupa z odkształceniami zbrojenia jest dyskusyjne.

Słupy były poddane osiowemu ściskaniu. Jest rzeczą znaną, że w badaniach eksperymentalnych wyeliminowanie mimośrodów przypadkowych jest rzeczą trudną. Brak jest w pracy oszacowania wartości mimośrodów przypadkowych. Jest to możliwe do przeprowadzenia na podstawie znajomości różnic w odkształceniach pionowych mierzonych w różnych miejscach na powierzchni zewnętrznej słupa (np. Rys. 5.30b).

Kluczowym czynnikiem umożliwiającym efektywne wykorzystanie stali HSS jest skrępowanie betonu przy ściskaniu. Autorka ograniczyła się do przedstawienia 3 współczesnych opisów teoretycznych (punkt 2.3). Brak jest przedstawienia teoretycznych podstaw zjawiska z punktu widzenia mechaniki betonu – problemu dylatacji w betonie. Cytowana literatura poświęcona skrępowaniu betonu jest niepełna – brak między innymi prac: Sargin, Cusson-Paultre, Fafitis-Shah, Spoelstra-Monti, Sheikh-Uzumeri, Watanabe ze współpracownikami. Pro domo sua należałoby również wspomnieć o pracach polskich: Olszak, Korzeniowski, Korentz.

Autorka słusznie ogranicza efekt skrępowania do rdzenia przekroju. Nie wyjaśnia jednak, czy i jak efekt skrępowania działa dla włókien przekroju położonych blisko osi obojętnej (w przypadku dużego mimośrodu, kiedy to istnieje w przekroju strefa rozciągana). Istniejące badania wskazują na możliwość wytworzenia skrępowania w strefie ściskanej nawet dla czystego zginania, jednak efekt ten będzie mniejszy niż w przypadku kiedy cały rdzeń jest ściskany. Nie jest więc jasne, czy krzywe interakcji dla betonu skrępowanego z Rys. 7.5 i 7.6 poprawnie odwzorowują rzeczywistość w swojej dolnej części.

## 5. Redakcja formalna pracy

Praca jest bardzo starannie zredagowana. Na pochwałę zasługuje bardzo ładna forma graficzna pracy. Cenne jest bardzo dobre udokumentowanie badań eksperymentalnych w postaci załączników zawartych w tomie II pracy.

Uwagi korektorskie: „balanced reinforcement ratio” (rozdział 2) to nic innego jak graniczny stopień zbrojenia przy przejściu z dużego do małego mimośrod; zamiast mówić o „stopniu zbrojenia skorygowanym proporcjonalnie do odpowiedniej obliczeniowej granicy plastyczności zastosowanej stali zbrojeniowej” (rozdział 3) można po prostu wprowadzić pojęcie mechanicznego stopnia zbrojenia; warto wspomnieć, że krzywe interakcji (rozdziały 3 i 7) z punktu widzenia mechaniki konstrukcji to krzywe nośności granicznej; Autorka używa pojęcia „smukłość” na oznaczenie stosunku długości obliczeniowej słupa do wysokości przekroju – jest to niepoprawne, smukłość to stosunek długości obliczeniowej do promienia bezwładności przekroju.

## 6. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska mgr inż. Eweliny Kołodziejczyk spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 14.III.2003 r. (z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Uzyskane przez Autorkę wyniki w zakresie badań eksperymentalnych i komputerowych symulacji stanowią oryginalny i wartościowy wkład w rozwój dyscypliny *Budownictwo*. Przedstawiona praca spełnia wszelkie kryteria merytoryczne i formalne stawiane rozprawom doktorskim, przeto recenzent wnosi o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony rozprawy.

