

Dr hab. inż. Anna Halicka, prof. PL

RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ

MGR INŻ. RADOSŁAWA KUPCZYKA

PT.

**” WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA NOŚNOŚĆ
ZAKOTWIONYCH HAKIEM STRZEMION
ZE STALI O DUŻEJ CIĄGLIWOŚCI”
PRZYGOTOWANEJ POD KIERUNKIEM
PROF. DR HAB. INŻ. WŁODZIMIERZA STAROSOLSKIEGO**



1. Uwagi ogólne dotyczące tematu i charakteru dysertacji

Tematem recenzowanej dysertacji są strzemiona ze stali o wysokiej wytrzymałości i ciągliwości, a w szczególności wpływ wybranych czynników na nośność tych strzemion.

Tradycyjnie strzemiona wykonywane były ze stali gładkiej. Obecnie stal gładka coraz częściej zastępowana jest stalą żebrowaną wysokiej wytrzymałości i ciągliwości. Projektowane są coraz bardziej obciążone elementy o dużych rozpiętościach, wymagające silnego zbrojenia na ścinanie, a stale żebrowane o dużej wytrzymałości i ciągliwości są powszechnie dostępne na rynku. Ponadto norma EC2 nie przewiduje w ogóle stosowania stali gładkich i wszystkie jej zapisy dotyczą stali żebrowanych. Pomimo tego, że stal klasy C zaczyna być stosowana na strzemiona dość powszechnie, brakuje kompleksowych badań dotyczących zwłaszcza zakotwienia strzemion z niej wykonanych. Norma EC2 oraz normy DIN i ACI zalecają stosowanie haków prostych (zagięcie pod kątem 90°), haków zagiętych pod kątem 135° lub poprzecznych prętów przyspawanych do zakończonych prosto strzemion. Praktyka pokazała jednak, że stosowanie takich zakotwień może być niewystarczające dla pełnego wykorzystania nośności strzemienia na rozciąganie. Taką obserwację poczynił też doktorant, co stało się powodem podjęcia zadania badawczego.

Z powyższych względów podjęty przez doktoranta temat uznaję za interesujący, aktualny i ważny, a postawiony problem jest praktyczny i pomimo istnienia zaleceń normowych oraz dość dużej liczby publikacji naukowych na temat strzemion, jest on wciąż nie do końca rozpoznany.

Praca ma niewątpliwie charakter użyteczny, bowiem autor uznał za cel analizę czynników wpływających na nośność strzemion ze stali wysokiej ciągliwości, a pracę zakończył

konkretnymi zaleceniami, jak takie zakotwienie ukształtować, aby możliwie najlepiej wykorzystać zarówno dużą ciągliwość, jak i wysoką wytrzymałość stali.

2. Zawartość i układ dysertacji

Praca liczy 173 stron tekstu podstawowego, do którego dołączono spis oznaczeń, spis literatury zawierający 131 pozycji (w tym ponad 80% anglojęzycznych, a także pozycje niemiecko- i francuskojęzyczne) oraz załącznik liczący 56 stron.

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Analiza aktualnego stanu wiedzy obejmująca:
 - historię konstrukcji żelbetowych - p.2.1,
 - podstawy stosowania prętów żebrowanych - p.2.2,
 - zagadnienia dotyczące zakotwienia prętów w betonie, w tym mechanizmu współpracy między betonem i stalą, metodologii badań zakotwienia oraz wpływu parametrów betonu i stali na skuteczność zakotwienia – p.2.3,
 - zalecenia normowe w zakresie zakotwienia zbrojenia – p.2.4,
2. Relacja z własnych badań laboratoryjnych (p.3), którymi były:
 - badania zakotwień na elementach drobnowymiarowych – p.3.1,
 - badania belek żelbetowych zniszczonych przez ścinanie – p.3.2,
 - badania nośności otuliny betonowej na wyłamanie – p.3.3,
3. Parametryczna analiza zakotwienia strzemienia, wykonana metodą elementów skończonych – p.4,
4. Podsumowanie i wnioski końcowe – p.5.
5. Załącznik, w którym zawarto studia literaturowe na temat wpływu parametrów betonu i stali na zakotwienie prętów zbrojeniowych.

Oceniając układ pracy stwierdzić można, że brakuje w niej też stanowiących podstawowy element dysertacji doktorskich. Autor postawił natomiast cel. Jest nim odpowiedź na pytanie, jakie warunki musi spełniać skuteczne zakotwienie analizowanych strzemion. Praca jest zatem poszukiwaniem odpowiedzi na zadane pytanie, poprzez badania laboratoryjne i analizę numeryczną, a zawarte w podsumowaniu zalecenia są efektem tych poszukiwań.

Układ pracy jest też nieco zaburzony w stosunku do klasycznego, poprzez wyprowadzenie części studiów literaturowych do załącznika. Wydaje się to być jednak uzasadnione, gdyż w załączniku znalazły się ogólne informacje na temat zakotwienia zbrojenia, a w części głównej tekstu ich synteza w odniesieniu do strzemion.

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna

Ocena merytoryczna dysertacji zostanie przedstawiona przez ocenę poszczególnych jej części.

Ogólnie, w pracy widoczna konsekwencja działań – od literaturowego rozpoznania tematu, poprzez badania laboratoryjne i analizę numeryczną do sformułowania wniosków. Część badawcza jest mocną stroną pracy, najcenniejsza jest duża liczba wyników badań na oryginalnych próbkach, oddających istotę badanego zagadnienia. Również w części analitycznej widoczna jest znajomość zagadnienia, staranność w poszukiwaniu możliwie wiernego opisu modelowanego zagadnienia i parametrów tego opisu.

Analizując wyniki badań oraz dane zawarte w podsumowaniu pracy stwierdziłam, że doktorant osiągnął postawiony cel, to znaczy podał warunki jakie musi spełniać zakotwienie strzemion, aby możliwe było wykorzystanie znacznej ciągłości i dużej wytrzymałości współczesnych stali żebrowanych.

3.2 Ocena części studialnej

Ocena dotyczy całej części studialnej zawartej zarówno w rozdziale 2 jak i załączniku. Zakres poszukiwanych i opisanych przez doktoranta danych literaturowych jest prawidłowy, a część studialną można uznać za kompleksowe wprowadzenie do badań własnych. Autor opisał istotę przyczepności betonu do stali zbrojeniowej, metodologię badań, przeanalizował wpływ parametrów betonu na zakotwienie prętów (p. 2 załącznika), wpływ parametrów stali na zakotwienie prętów (p.3 załącznika), a także zalecenia normowe co do zakotwienia zbrojenia, a zwłaszcza strzemion.

Uwagi szczegółowe są następujące:

1. Studia literaturowe rozpoczynają się podrozdziałem „Historia konstrukcji żelbetowych” składającym się jedynie z 13 linijek tekstu. Nie jest to więc tytułowa „historia” a jedynie dość ogólnikowe stwierdzenia. Ten rozdział można było w redagowaniu pracy pominąć. Natomiast interesujące informacje o rodzajach zbrojenia stosowanych historycznie i rozwoju tego zbrojenia od prętów gładkich aż do dzisiejszych prętów żebrowanych, zawarł autor w rozdziale drugim, który jednak zatytułował dość nieszczęśliwie, nie oddając istoty informacji tam zawartych.

2. Str.29₁₆₋₁₇ oraz 189⁸, 189¹⁵ - Czy rzeczywiście chodzi o pierwiastek stopnia $\frac{1}{4}$ i $\frac{3}{4}$ z wartości f_c' ($\sqrt[4]{f_c'}$, $\sqrt[3]{f_c'}$) czy raczej o f_c' do potęgi $\frac{1}{4}$ i $\frac{3}{4}$, a więc $f_c'^{1/4} = \sqrt[4]{f_c'}$ i $f_c'^{3/4} = \sqrt[4]{f_c'^3}$?
- Str. 191¹¹ – niejasny zapis. Czemu ma być równe „ $\tau_u 1,22$ ”?
 - Str. 191 – nie opisano zmiennej s występującej we wzorze (13).
 - Str. 194⁷ – Jako synonim tarcia między materiałami podano w nawiasie kohezję, tymczasem kohezja dotyczy spójności wewnętrznej materiałów, a nie efektów między dwoma materiałami. Omawiany drugi składnik powinien być określony jako adhezja, ale ona też nie jest synonimem tarcia. Podobnie str. 30⁸⁻⁹.
 - Str. 203₁ i str. 236₉ – co autor rozumie pod pojęciem *sztywność zakotwienia*?

3.3 Ocena części badawczej

Część badawcza składała się z trzech etapów, w dwóch etapach badania prowadzono na oryginalnych próbkach autorskich. Przeprowadzane były w logicznej kolejności: najpierw badania na elementach drobnowymiarowych prowadzonych w celu ustalenia parametrów wpływających na nośność i mechanizm zakotwienia strzemienia, następnie weryfikacja wniosków na belkowych elementach pełnowymiarowych, a wreszcie badania zagadnienia cząstkowego, którego rozpoznanie niezbędne było do zamodelowania omawianego zakotwienia metodą elementów skończonych.

3.3.1 Badania na elementach drobnowymiarowych

W pierwszej kolejności doktorant wykonał badania wyciągania strzemion z oryginalnych elementów drobnowymiarowych. Różnicował: średnicę strzemienia, kształt haka (prosty, ostry i tzw. pozanormowy z podwójnym zgięciem), grubość otuliny, wytrzymałość betonu, naprężenia normalne do płaszczyzny zagięcia pręta, ponadto w elementach było zbrojenie podłużne lub go nie było. Obserwował obraz zniszczenia tych elementów oraz mierzył naprężenia w strzemieniu i jego wysuw. Wyniki badań opracował bardzo dobrze w formie graficznej (rys.60-79), wykresy są czytelne, zawierają wszystkie niezbędne informacje i jasno obrazują wyniki.

Uwagi szczegółowe są następujące:

1. Badania zostały zaprogramowane starannie, zwraca uwagę duża liczba próbek wynikająca z dużej liczby różnicowanych parametrów. Widać też, że sposób badania był przemyślny i pozwolił na uzyskanie poszukiwanych wyników. Jednak dokonując podsumowania

uzyskanych wyników sam autor nie podawał zależności liczbowych, motywując to faktem, że badania nie były powtarzalne (str. 105¹⁻⁶). Może warto było zmniejszyć zakres różnicowania parametrów np. tylko dwie średnice $\phi 8$ i $\phi 12$ i tylko dwa betony o różnych średnich wytrzymałościach kostkowych 25 MPa i 40 MPa (bardziej zróżnicowanych niż w badaniach doktoranta), a może nawet nie wykonywać serii bez zbrojenia podłużnego (przecież strzemiona zwykle występują łącznie z prętami podłużnymi), a w to miejsce wykonać po trzy próbki każdej serii?

2. Jeden z betonów użytych w badaniach, zwany betonem o niskiej wytrzymałości kostkowej miał średnią wytrzymałość kostkową $14 \div 18$ MPa, a więc nie odpowiadał klasie betonu, który może być uważany za konstrukcyjny (najmniejszej klasie C12/15 według EC2 odpowiada $f_{cm} = 15 + 8 = 23$ MPa, co jest wartością znacznie większą niż w badaniach). Ponadto przyjęte przez autora zróżnicowanie betonu na *beton o podwyższonej wytrzymałości kostkowej $26 \div 32$ MPa* i *beton o wysokiej wytrzymałości kostkowej $35 \div 38$ MPa* jest nieostre (różnica między górną granicą pierwszego a dolną granicą drugiego wynosi zaledwie 3 MPa). Nie można też dziś mówić o betonie o wytrzymałości rzędu 35 MPa, jako o betonie mającym wysoką wytrzymałość.
3. Podając skład betonu (tabela 4) lepiej byłoby pokazać zawartość składników w 1 m^3 , dobrze byłoby także podać wskaźnik w/c i konsystencję mieszanki betonowej – w części studialnej autor przytaczał informacje mówiące o zależności przyczepności od konsystencji.
4. W tabeli 5 nie podano składu dla serii XX.
5. Czy podana w tabeli 7 wartość wytrzymałości na rozciąganie była uzyskana w próbie brazylijskiej? Jeśli tak, to jest to wartości $f_{ct,sp}$, a nie jak napisano f_{ctm} . Aby uzyskać f_{ctm} należy dokonać przeliczenia.

3.3.2 Badania na belkach

W drugim etapie doktorant wykonał badania belek żelbetowych o wymiarach $200 \times 400 \times 4000$ mm. Belki były silnie zbrojone podłużnie (nie podano jaki był stopień zbrojenia podłużnego) i zaprojektowane tak, aby zniszczyły się na ścinanie. Belki wykonane były w dwóch seriach – w serii I badano belki z hakiem prostym, w serii II – z hakiem pozanormowym. Tu również widoczna jest staranność w realizacji badań jak i prezentacji wyników. Pytania i uwagi do tej części są następujące:

1. Czy opisany mechanizm zniszczenia (przesuwanie betonowych krzyżulców ściskanych ku górze) autor wiąże z zastosowanym sposobem kotwienia strzemion? W pierwszej serii z hakami prostymi tego efektu nie obserwowano.

2. Na rysunku 103 niewłaściwie przywołano źródło literaturowe (powinna być raczej przywołana praca doktoranta).

3.3.3 Badania nośności otuliny betonowej na wyłamanie

Trzeci etap obejmował oryginalne badania, których celem było określenie nośności otuliny, warunkującej nośność zakotwienia strzemion w przypadku haka prostego. Próba dotyczyła przepychania pręta stalowego bądź trzpienia stalowego przez cienką warstwę otuliny betonowej. Próba ta pozwoliła ustalić obraz zniszczenia i oszacować wartość siły niszczącej otulinę. Uwagi szczegółowe:

1. W tabeli 16 szacowano wytrzymałość na rozciąganie na podstawie walcowej wytrzymałości na ściskanie powołując się na normę m.in. EC2. Stosowano wzór $f_{ctm} = 0,3 f_{c,core}^{2/3}$, a za $f_{c,core}$ wstawiono wartość średnią. Tymczasem według EC2 (tablica 3.1) we wzorze tym należy wstawić nie wartość średnią, ale charakterystyczną.
2. Dlaczego przy obliczaniu siły wyłamującej otulinę ze wzorów (5, 6) przyjęto, że boczne płaszczyzny ostrosłupa nachylone są pod kątem 45° , skoro w badaniach stwierdzono kąt $19-35^\circ$ (str. 131_{4,3}) ?
3. W tabeli 17 obliczono wysokość użyteczną jako $d = c_{nom} + \phi$, tymczasem na rys.109 zapisano $d = c + \phi/2$.

3.4 Ocena części analitycznej

W części analitycznej wykonano analizę parametryczną dotyczącą wpływu średnicy pręta, grubości otuliny i jej sztywności oraz współczynnika tarcia między betonem a strzemieniem na siłę wyłamującą otulinę. Modelowanie wykonano dwoma programami MES w przestrzeni dwuwymiarowej. Model podstawowy stworzono w programie *Robot*. Stanowi go strzemień, a otaczający beton zamodelowano w formie podpór, o sztywności szacowanej na modelu numerycznym w programie *Abaqus*. Doktorant uzyskał bardzo ciekawe rezultaty m.in. określił długość odcinka, na którym pojawiają się siły wyłamujące otulinę, a także wartości tych sił.

Wykonując obliczenia autor przyjął bardzo wiele uproszczeń. W związku ze sposobem modelowania rodzi się kilka pytań:

1. Dlaczego podpory charakteryzowane sztywnością K_4 są tylko na odcinku za zagięciem, a na odcinku przed zagięciem (rys.113) nie założono żadnych podpór?
2. Jak ustalił autor parametry s_1, s_2, s_3 krzywych naprężenie-siła na rys.125? W tabelach 23 i 24 podał tylko sposób obliczenia maksymalnych narażeń przyczepności.

3. Dlaczego modyfikacja parametru K1 przebiegała tylko na odcinku łuku (str. 164⁷) i co w praktyce oznacza *podłoże słabe*, *podłoże mocne*? Czy sztywność podpór, która modeluje różne betony może różnić się ponad dwukrotnie, nawet dla betonów niskiej i wysokiej klasy (autor przyjął 8,5kN/mm/mm i 18,5kN/mm/mm)? Jaki moduł sprężystości betonu przyjęto szacując sztywność podpory w programie *Abaqus*?
4. Nie bardzo jasne jest, jakie wartości umieścił autor w tablicy 30 w kolumnie 6 i 8. W nagłówku zapisano, że obok *siły wyłamującej* (jak rozumiem otrzymanej z analizy MES) umieszczono *nośności otuliny według tabel 29*, tymczasem występują tu inne wartości. Dobrze byłoby też w tabeli 30 obok siły niszczącej uzyskanej w badaniach podać uzyskany w badaniach model zniszczenia i porównać z modelem ocenionym na podstawie kolumn 6 i 8 (przekroczenie lub nie przekroczenie nośności otuliny).

4. Uwagi redakcyjne

Ogólnie praca napisana jest porwanym językiem, myśli prowadzone są dość jasno. W pracy występują jednak pewne usterki i uchybienia redakcyjne:

1. Autor zastosował aż 7 poziomów numeracji podrozdziałów, co zmniejsza przejrzystość pracy
2. Występuje podwójne oznakowanie średnicy prętów zbrojeniowych. Nie jest jasne, kiedy autor używa oznaczenia d_b a kiedy ϕ , zwłaszcza, gdy występują w jednej linii np. str. 38₁₄₋₉ dla $d_b \leq 16$ mm minimalna średnica gięci wynosi 4ϕ , a na str. 39₅₋₁ - dla pręta $\phi \leq 16$ mm, długość ... powinna wynosić co najmniej $6d_b$.
3. Obok bardzo starannie opracowanych rysunków występują gorsze, zwłaszcza w załączniku, gdzie pojawiają się rysunki zeskanowane, na których znajdują się opisy w języku angielskim. Nie ujednolicono wielkości czcionki opisów na rysunkach, zdarzają się czcionki różnej wielkości nawet na tym samym rysunku (rys. 29, 30).
4. Występują pewne niezręczności stylistycznie np. str. 40₁, 59¹⁻², 65³⁻⁴, 135⁴⁻⁵ 185⁷, 198₃, 199⁸, 202¹⁴, 214¹³, 206₁₂, 206₈, 210¹⁰⁻¹². W studiach literaturowych, szczególnie w załączniku, zamieszczone są fragmenty oparte o teksty w języku angielskim, mające nie zawsze poprawną polską składnię, np. 213²⁻⁵, 213⁷, 216⁷⁻¹¹, 216₁₃₋₁₀, 218⁹⁻¹², 223¹⁻³.

Wymienione uchybienia nie stanowią o poziomie merytorycznym pracy nie mają wpływu na merytoryczną ocenę dysertacji.