



R e c e n z j a

**Pracy doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Koppik-Wróbel na temat:
„Analysis of early-age thermal-shrinkage stresses in reinforced concrete walls”
(Analiza naprężeń w ścianach żelbetowych poddanych wczesnym wpływom
termiczno-skurczowym”)**

Podstawa opracowania recenzji:

Recenzję opracowano na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. inż. Jana Ślusarka z dnia 03.03.2015 r. /pismo znak RB/4020/14/15/.

1. Charakterystyka pracy

Przedmiotowa praca doktorska napisana jest w języku angielskim i liczy 138 stron tekstu plus 20 stron spisów treści, rysunków, tablic i symboli oraz 12-to stronicowe zestawienie bibliografii, zawierające 237 pozycji literatury, w dużym stopniu wykorzystanej w pracy. W tekście pracy znajduje się 78 rysunków i 24 tablice; do wersji anglojęzycznej pracy dołączono suplement w języku polskim, zawierający na 43 stronach skróconą wersję pracy, a także 4-stronicowe Curriculum Vitae autorki oraz kopie jej 4 ważniejszych publikacji w języku angielskim.

Praca składa się z 6 rozdziałów obejmujących: Cel i zakres pracy (R.1), opis „Zachowania się ścian żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu” (R.2), Modele analityczne do analizy ścian żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu (R.3), Modelowanie numeryczne zachowania się ścian żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu (R.4), Analizę naprężeń w ścianach żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu (R.5) oraz Wnioski i konkluzje (R.6). Podstawowymi rozdziałami pracy są rozdziały 3, 4 i 5, obejmujące łącznie około 80 % tekstu.

Praca ma charakter teoretyczny i dotyczy głównie modelowania numerycznego i analizy naprężeń w średnio-masywnych ścianach żelbetowych, poddanych we wczesnym okresie dojrzewania złożonym polom termiczno-wilgotnościowym, generującym w nich znaczne naprężenia termiczno-skurczowe, będące niejednokrotnie przyczyną zarysowań i degradacji tych ścian.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Ocena doboru tematu

Temat rozprawy jest bardzo aktualny tak z punktu widzenia potrzeb praktycznych jak i rozwiązań teoretycznych. Elementy betonowe o średniej masywności ($m = 2\div 7 \text{ m}^{-1}$ czyli o grubości $b = 0,30 \div 1,00 \text{ m}$), do jakich należą m.in. ściany żelbetowe w zbiornikach na ciecze, materiały sypkie, w osłonach reaktorów atomowych, w przyczółkach i ścianowych filarach mostowych ulegają bardzo często niekorzystnym zarysowaniom w ciągu pierwszych dni dojrzewania betonu. Powodowane jest to samonagrzewem tych ścian pod wpływem ciepła hydratacji cementu (nawet o $\Delta T = 30\div 50^\circ \text{C}$) oraz szybkim rozwojem tzw. skurczu autogenicznego (zwłaszcza w betonach wysokich wytrzymałości).

W efekcie powstają w tych ścianach znaczne naprężenia termiczno-skurczowe, wymuszone i własne.

Naprężenia wymuszone są generowane przez więzy zewnętrzne tych ścian, np. w postaci wcześniej wykonanego fundamentu, natomiast naprężenia własne powstają w przekroju tych ścian na skutek istnienia w nim niejednorodnych i niestacjonarnych pól temperatury i wilgotności. Pierwsze z tych naprężeń mogą prowadzić do pionowych i ukośnych, skrośnych zarysowań ścian w pobliżu styku z wcześniej wykonanym fundamentem, drugie zaś mogą być przyczyną rys przypowierzchniowych lub też mogą przyspieszać powstanie rys skrośnych w ścianach.

Opisywane zagadnienie jest trudne do ujęcia obliczeniowego, gdyż wymaga znajomości pól termicznych i wilgotnościowych w analizowanej ścianie, przy uwzględnieniu właściwości fizycznych i mechanicznych dojrzewającego (młodego) betonu, o wartościach jeszcze nieustabilizowanych. I to wszystko przy zmiennych oddziaływaniach środowiskowych (temperatura i wilgotność otoczenia, prędkość wiatru, promieniowanie słoneczne itp.).

Stąd też pojawiają się próby coraz dokładniejszego opisu matematycznego powyższych zjawisk, od różnych modeli analitycznych (np. LULEÅ czy ACI) aż do bardzo zaawansowanych modeli numerycznych. Opiniowana praca wychodzi naprzeciw tym zagadnieniom i jest bardzo udaną próbą uściślenia metodyki postępowania przy obliczaniu naprężeń termiczno-skurczowych w przedmiotowych ścianach oraz prognozowaniu ich zarysowania przy bardzo spektakularnym postawieniu problemu ich granicznego wyężenia pod wpływem naprężeń rozciągających.

2.2. Tezy pracy

Nie są one w pracy postawione jawnie. W 1.3 pt. „Range of Thesis” zestawia autorka w 10 punktach wykaz zagadnień rozwiniętych w pracy. Na ich podstawie można sformułować następujące tezy:

- 1° Dla należytego rozwiązania zagadnień naprężeń termiczno-skurczowych w ścianach żelbetowych w pierwszym okresie ich dojrzewania należy rozważać łączne, zintegrowane pola temperatury i wilgotności w przekroju ścian, uwzględniając zarówno dyfuzję ciepła i wilgoci pod wpływem gradientów ich stężeń jak również zjawiska termo-dyfuzji wilgoci pod wpływem gradientów temperatury oraz dyfuzji ciepła pod wpływem gradientów wilgotności.
- 2° Dokładne, numeryczne rozwiązanie zagadnienia naprężeń termiczno-skurczowych pod wpływem w/w zintegrowanych pól termicznych i wilgotnościowych może być osiągnięte przez zastosowanie lepkosprężysto-lepkoplastycznego modelu betonu rozwiniętego w Politechnice Śląskiej przez B.Klemczak i St.Majewskiego. W modelu tym jako kryterium zniszczenia przyjęto 3-parametrowe kryterium Willama-Warnkego.
- 3° Rozkład wymuszonych naprężeń termiczno-skurczowych w przekroju ściany zależy w dużym stopniu od smukłości ściany L/H , od warunków jej zamocowania w fundamencie (sztywne lub sprężyste), od stosunku sztywności na zginanie ściany do sztywności fundamentu.
- 4° Duży wpływ na wartości i rozkład naprężeń wymuszonych w ścianie mają warunki gruntowe na jakich posadowiony jest fundament ściany. Przy słabych gruntach fundament i ściana w strefach brzegowych ulegają podniesieniu i obrotowi, co znacznie redukuje wymuszone naprężenia termiczno-skurczowe w ścianie

Tezy te mają charakter naukowy i są w pracy konsekwentnie udowodniane. Do tego celu służy autorce naukowa metodyka oparta na bardzo bogatych i obszernych studiach literaturowych oraz na rozwiązaniu metodami numerycznymi skomplikowanych, cząstkowych równań różniczkowych problemu.

2.3. Ocena wartości merytorycznej pracy

Problem naprężeń termiczno-skurczowych w masywnych i średnio-masywnych elementach i konstrukcjach z betonu we wczesnych fazach dojrzewania betonu pojawia się w literaturze technicznej dość wcześnie, bo w latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku. Związane to było głównie ze wznoszeniem w Stanach Zjednoczonych AP wielkich,

betonowych zapór wodnych, w których dochodziło do samonagrzewu betonu rzędu $\Delta T = 50^{\circ} \text{C}$, w efekcie czego ściany tych zapór wielokrotnie ulegały zarysowaniom i wgłębionym pęknięciom. Do analizy zjawiska wprzęgnięto problemy samonagrzewu betonu pod wpływem ciepła hydratacji cementu, fizyki betonu, wytrzymałości materiałów, hipotez wyężeniowych oraz termosprężystości i termoplastyczności. W efekcie opracowano szereg metod analitycznych, które z grubsza pozwalają opanować w/w problemy i wskazać projektantowi możliwe obszary i wartości niebezpiecznych wyężzeń, związanych głównie z przekroczeniem wytrzymałości betonu na rozciąganie.

Przykładem rozwiązań pod wpływem tych metod analitycznych są np. wartości tzw. współczynników oporów ruchu R_N zawarte w Eurokodzie 2. Wartości tych współczynników są zależne od sposobu utwierdzenia krawędzi ściany (wzdłuż podstawy, wzdłuż dwóch naprzeciwległych krawędzi, wzdłuż dwóch przyległych krawędzi i wzdłuż 3 krawędzi). Współczynnik oporu R_N przeciwko przesunięciu (translation restraint) oznacza iloraz wymuszonego naprężenia termicznego σ_x w ścianie do takiegoż naprężenia wymuszonego w ścianie ze sztywnymi więzarami zewnętrznymi σ_x^{fix} . Wartości współczynników R_N określonych wg Eurokodu 2, szwedzkiej metody LULEÅ i amerykańskiej metody ACI są punktem wyjścia do rozważań autorki.

W większości analiz numerycznych pomija ona – dla większej przejrzystości – naprężenia własne w przekroju (na grubości) ściany, skupiając się na naprężeniach σ_{xx} i σ_{yy} w płaszczyźnie ściany. Aby dojść do wartości tych naprężeń musi całe dwa obszernie rozdziały (R3 i R4) poświęcić omówieniu modeli analitycznych oraz modelowaniu zachowania się ścian żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu. W tym celu w R3 dokładnie analizuje problemy:

- odkształceń termicznych i wilgotnościowych w młodym betonie,
- ciepła hydratacji cementu Q_{tot} ,
- tzw. funkcji źródeł, będącej szybkością wydzielania się ciepła hydratacji w dojrzewającym betonie $q_v(t)$,
- odkształceń skurczowych w młodym betonie, zwłaszcza tzw. skurczu autogenicznego ϵ_{ca} ,
- naprężeń termiczno-skurczowych na długości ściany wg metody płaszczyzny kompensacji oraz 3 w/w metod analitycznych,
- wpływu efektów nieliniowych i poślizgu ściany po fundamencie w warstwach brzegowych ściany na wartości w/w naprężeń,

- możliwości wystąpienia rys w ścianach wg kryterium wytrzymałościowego lub odkształceniowego,
- wpływu pęczania i dojrzewania betonu na wartości naprężeń termiczno-skurczowych.

Natomiast w R4 poddaje szczegółowej analizie problemy związane z wczesnym okresem dojrzewania betonu, a to:

- dojrzałości betonu M i tzw. efektywnego czasu dojrzewania t_e w oparciu o funkcje temperatury SAULA oraz HANSENA i PEDERSENA,
- stopnia hydratacji cementu $\alpha_H(t)$,
- energii aktywacji cementu wg JONASSONA,
- równań różniczkowych opisujących pola termiczne i wilgotnościowe w betonie,
- warunków brzegowych wymiany ciepła i wilgoci przez dojrzewający (młody beton) z otaczającą atmosferą,
- wartości parametrów termicznych i wilgotnościowych młodego betonu,
- funkcji pęczania młodego betonu $J(t, t_0)$,
- rozwoju w czasie cech mechanicznych betonu,
- analizy zniszczenia wg „damage intensity factor” jako ilorazu aktualnego poziomu naprężenia τ_{oct} do wartości naprężenia na powierzchni zniszczenia wg Willama-Warnkego, τ_{oct}^f ,
- modelowania podłoża gruntowego (właściwości, przewodzenie ciepła i wilgoci, model sprężysto-idealnie plastyczny ze zmodyfikowanym kryterium zniszczenia Druckera-Pragera),
- modelowania zbrojenia w ścianach.

Dopiero wszystkie te szczegółowe, obszerne analizy pozwoliły autorce na dokonanie zasadniczych obliczeń (analitycznych i numerycznych) naprężeń w ścianach żelbetowych we wczesnych fazach dojrzewania betonu. Wymienione powyżej, przeprowadzone w R3 i R4 pracy analizy wykonane zostały b. starannie i wykazały dużą wiedzę autorki w skomplikowanych problemach przewodzenia ciepła i wilgoci przez młody beton w pierwszych dniach (1÷7) dni swojego dojrzewania oraz w konsekwencji – w generowanych w przedmiotowych ścianach żelbetowych naprężeniach termiczno-skurczowych.

Rozdział piąty pracy obejmuje finalną analizę problemu w oparciu o wcześniej przygotowane, w R3 i R4, podstawy i dane wyjściowe. Najpierw, w celu weryfikacji zastosowanych metod obliczeń, wykonuje autorka obliczenia sprawdzające dla 2 przypadków praktycznych, dla których znane są wyniki pomiarów temperatury w ścianach żelbetowych

we wczesnym okresie dojrzewania, parametry składu betonu i zastosowanego zbrojenia oraz właściwości mechaniczne betonu i stali zbrojeniowej. Pierwszy przykład dotyczy ściany żelbetowej we francuskiej elektrowni atomowej zaś drugi – żelbetowych ścian tunelu w Szwecji.

W obu tych przypadkach autorka potwierdziła obliczeniowo, w oparciu o zastosowaną metodę numeryczną, dobrą zgodność jej obliczeń z rzeczywistymi przebiegami temperatury w analizowanych ścianach oraz z rzeczywistym stanem zarysowania tych ścian. To dało jej podstawę do przeprowadzenia obszernych analiz, dotyczących wpływu geometrii ścian i warunków ich utwierdzenia w fundamentach na naprężenia termiczno-skurczowe we wczesnych fazach dojrzewania betonu. Wyników tych obliczeń nie będę analizował, bo będą one zapewne przedmiotem wystąpienia autorki na obronie opiniowanej pracy doktorskiej.

Ważnymi rezultatami tych obliczeń jest wykazanie, że:

- dokładne obliczenia numeryczne potwierdziły jakościowy charakter wartości stopnia oporu ściany $\gamma_R^t = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^{fix}}$ na naprężenia wymuszone w funkcji współrzędnej pionowej ściany „y”, podobny do charakteru tych wartości z obliczeń analitycznych. Pod względem ilościowym wartości te są różne,
- przy krótkich ścianach (niskie wartości $L/H = 2 \div 3$) duży wpływ ma rozkład naprężeń w ścianach ma moment zginający (współczynnik oporu γ_R^t), wynikający z działania siły poziomej T na styku z fundamentem (naprężenia znakozmienne, rozciąganie ścian dołem i ściskanie górą),
- przy długich ścianach ($L/H \geq 7$) naprężenia na całej wysokości ściany są rozciągające i przy wysokich wartościach L/H – prawie równomierne. Świadczy to o dużym wpływie momentu zginającego, powstającego na krańcach ściany od sił pionowych usiłujących oderwać ścianę od fundamentu,
- powyższe zjawisko uwidoczniło się w pełni przy zamodelowaniu fundamentu ściany na słabym gruncie, gdzie doszło do podniesienia się końcówek ściany i ich obrotu.

Przedstawione przez autorkę w tym rozdziale wyniki obliczeń są bardzo pouczające i bardzo wartościowe z punktu widzenia rzeczywistej pracy statyczno-wytrzymałościowej tych ścian we wczesnym okresie dojrzewania betonu, a także z punktu widzenia potrzeb praktycznych, a to dopracowania łatwiejszych w stosowaniu metod analitycznych takich obliczeń.

Z merytorycznego punktu widzenia pracę oceniam b. wysoko.

3. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest b. starannie, czytelnym językiem. Zwraca uwagę duża dbałość o właściwe oznaczenia analizowanych wielkości. Rysunki i tablice nie nasuwają większych zastrzeżeń. Z dostrzeżonych usterek formalnych pracy należy wymienić:

- Str. 10, rys. 2.5 - Rysa najczęściej powstaje w momencie przecięcia się krzywej σ_{xx} z krzywą $f_{ctm}(\tau)$ w punkcie (τ_{cr}) ,
- Str. 38, rys. 3.7 - W jakich jednostkach jest E_c/E_f ?
- Str. 40, rys. 3.9 - Co oznaczają poszczególne linie na rysunku?
- Str. 104, rys. 5.15 - Skąd liczy się parametr X?
Co oznacza wartość naprężenia po powstaniu rysy. Rysa jest rozmyta, czy jest to wartość naprężenia w pobliżu rysy?
- Str. 113₁₆ - Sprawa grubości ekwiwalentnej d_{eq} wyjaśniona jest dość mgliście,
- Str. 125, rys. 5.35 (A) - Brak jednej linii na wykresie,
- Str. 126₄ - Parametr R_i nie jest w pełni wyjaśniony.

4. Uwagi krytyczne

- 4.1. Dlaczego tak łatwo pominięto w analizie naprężeń naprężenia termiczno-skurczowe powstające na etapie wzrostu temperatury w ścianie. Prawdą jest, że na początku są one małe (z uwagi na niskie R_c) oraz ściskające, ale później – jeszcze przed osiągnięciem T_{max} , przyczepność na styku ściany i fundamentu rośnie i naprężenia te nie są zerowe, jak to pokazano na rys. 2.1 (A) i (C).
- 4.2. W analizie przyjęto pełne zespolenie ściany z fundamentem. Z praktyki wiadomo, że przy pewnych proporcjach ścian i fundamentów, w okresie rozgrzewu ściany naprężenia przyczepności na styku tych elementów są małe i może dojść do poślizgu ściany po fundamencie. Zwraca na to uwagę m.in. cytowany przez autorkę pracy NILLSON [177].
- 4.3. Czy w związku z powyższym nie należało zamodelować na styku tych dwu elementów warstwy stykowej – interfejsu (o określonych wartościach np. przenoszącego naprężenia pionowe, rozciągające przez pionowe płyty zbrojeniowe, ale nie przenoszącego ścinania); podobnie jak to autorka zrobiła dla styku fundamentu.
- 4.4. W analizie naprężeń w zasadniczym pkt. 5.3 pracy podano tylko wartości współczynnika oporu ruchu $\gamma_R(y)$ na naprężenia poziome σ_{xx} . Wiadomo, że w ścianach takich występuje też współczynnik oporu na naprężenia pionowe σ_{yy} – o

znaczących wartościach w strefach brzegowych ściany. Przypuszczam, że współczynnik ten nie był przez autorkę analizowany. Autorka powinna na to zwrócić uwagę w dalszych pracach, gdyż istnieje ścisła więź obu tych współczynników oporu przy kształtowaniu się wartości naprężeń termiczno-skurczowych w ścianach.

- 4.5. Podobnie postąpiła autorka w rozdziale 5.2 pracy, weryfikującym na podstawie obserwacji realnych konstrukcji inżynierskich główne założenia i metodykę modelowania zjawiska naprężeń termiczno-skurczowych zastosowaną w opiniowanej pracy doktorskiej. Jest tam zastosowane kryterium wyężeniowe, ale tylko do naprężeń poziomych σ_{xx} . Dlaczego nie zastosowano tego kryterium do naprężeń rozciągających głównych? Wówczas byłaby większa spójność pracy z postulowanym kryterium wyężeniowym wg modelu Willama-Warnkego.
- 4.6. Czy w analizie naprężeń w zasadniczym pkt. 5.3 pracy uwzględniono zbrojenie ścian i fundamentu. Nie ma na ten temat wzmianki. Wartołoby w przyszłych pracach autorki zwrócić większą uwagę na temat roli zbrojenia ścian i fundamentów w rozwoju i przebiegu naprężeń termiczno-skurczowych w ścianach.
- 4.7. Interesujące byłoby wykazanie, czy pola wilgotnościowe we wczesnym okresie dojrzewania mają znaczący wpływ na wartości wymuszonych naprężeń termiczno-skurczowych. Czy były takie analizy wykonane przez autorkę?

5. Wniosek końcowy

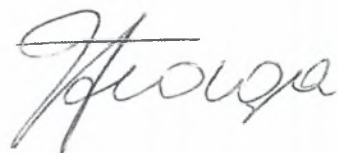
Na podstawie przeprowadzonej szczegółowej analizy recenzowanej pracy doktorskiej, stwierdzam, że:

- 5.1. Praca ma charakter naukowy; zarówno tezy pracy, zastosowana metodyka jak i wnioski zawierają elementy naukowe i twórcze.
- 5.2. Praca dotyczy b. trudnego i skomplikowanego zagadnienia jakim są naprężenia termiczno-skurczowe, wymuszone i własne w żelbetowych ścianach we wczesnym okresie dojrzewania betonu. Autorka wykazała dużą wiedzę, doświadczenie i determinację zarówno w przygotowaniu danych do obliczeń jak i umiejętnym zastosowaniu bardzo zaawansowanego modelu numerycznego.
- 5.3. Praca ma charakter teoretyczny i ważne znaczenie praktyczne. Rysy i pęknięcia średnio-masywnych ścian żelbetowych stanowią duży problem w budownictwie mostowym, zbiornikach na ciecze i materiały sypkie, w zbiornikach oczyszczalni ścieków i osłon w elektrowniach jądrowych. Każda praca prowadząca do rozpoznania ich pracy statyczno-wytrzymałościowej pod wpływem „niewidocznych” pól termicznych i

wilgotnościowych oraz zaprojektowania odpowiedniej technologii wznoszenia i ich zbrojenia ma ważne znaczenie gospodarcze.

- 5.4. Praca stanowi ważny wkład do rozwoju dyscypliny naukowej budownictwo, ze szczególnym uwzględnieniem mechaniki naprężeń dystorsyjnych, termiczno-skurczowych w betonowych budowlach o dużej i średniej masywności.
- 5.5. Praca wykonana jest samodzielnie i świadczy o dobrym przygotowaniu autorki do pracy naukowej. Należy zaznaczyć, że ma ona na swoim koncie ponad 30 publikacji naukowych i naukowo-technicznych, w tym liczne w języku angielskim.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe okoliczności uważam, że praca doktorska Pani mgr inż. Agnieszki Koppik-Wróbel spełnia wszystkie warunki Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U Nr 65 i z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o Jej dopuszczenie do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Koppik' or similar, written in a cursive style.