



Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY INŻYNIERIA LĄDOWA
I TRANSPORT**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Mariusz Kosiń

**NUMERYCZNO – DOŚWIADCZALNA ANALIZA
PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH W KONSTRUKCJI Z
LEKKIEGO SZKIELETU STALOWEGO**

*Numerical – experimental analysis of external
partitions in a light steel frame construction*

DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO - TECHNICZNYCH
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. MACIEJ MAJOR, PROF. PCZ

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

PROMOTOR POMOCNICZY

DR INŻ. KRZYSZTOF PAWŁOWSKI

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY IM. JANA
I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY

Bydgoszcz, 2020

Podziękowania

Autor składa serdeczne podziękowania prof. dr hab. inż. Maciejowi Majorowi oraz dr inż. Krzysztofowi Pawłowskiemu za inspirację i opiekę naukową.

WYKAZ SKRÓTÓW, SYMBOLI I JEDNOSTEK

| | |
|---|---|
| B | – bimoment (bimoment) |
| B_{Ed} | – obliczeniowa wartość bimomentu w przekroju pręta (computational value of the bimoment in the bar section) |
| B_{Rd} | – nośność obliczeniowa przekroju przy nieswobodnym skręcaniu (design resistance of a cross-section for free torsion) |
| c | – ciepło właściwe materiału (specific heat of the material) |
| c_w | – ciepło właściwe wody (specific heat of water) |
| d | – wymiar przekroju poprzecznego profilu (profile cross-section dimension) |
| D_φ | – współczynnik lepkości cieczy (liquid viscosity coefficient) |
| f_d, f_y | – wytrzymałość obliczeniowa stali i wartość obliczeniowa granicy plastyczności stali (design strength of steel and design value of the yield strength of steel) |
| f_{max} | – maksymalne przemieszczenia (maximum displacements) |
| f_{gr} | – wartości graniczne przemieszczeń (displacement limit values) |
| g_w | – gęstość strumienia przepływu masy (mass flow density) |
| g_v | – gęstość strumienia dyfuzji pary wodnej (water vapor diffusion flux density) |
| h_E | – entalpia zmiany fazowej pomiędzy parą a cieczą (enthalpy of phase transition between vapor and liquid) |
| h_v | – entalpia parowania wody (enthalpy of water evaporation) |
| H | – całkowita entalpia (total enthalpy) |
| H_s | – entalpia suchego materiału (dry material enthalpy) |
| I_y, I_z | – momenty bezwładności przekroju względem osi y, z (moments of inertia of the section about the y, z axis) |
| I_ω | – główny wycinkowy moment bezwładności przekroju (principal segmental moment of inertia of a section) |
| I_t | – moment bezwładności swobodnego skręcania (moment of inertia of free torsion) |
| l | – długość pręta (bar length) |
| L^{2D} | – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego (linear thermal coupling coefficient) |
| m | – masa próbki w stanie równowagi sorpcyjnej (sample mass at sorption equilibrium) |
| m_o | – masa próbki wysuszonej (mass of the dried sample) |
| M_y, M_z | – momenty zginające względem osi y, z (bending moments about the y, z axis) |
| M_{y,Ed}, M_{z,Ed} | – obliczeniowe momenty zginające w przekroju pręta (design |

| | | |
|----------------------|---|---|
| $M_{y,Rd}, M_{z,Rd}$ | – | bending moments in the bar section) nośności obliczeniowe przekroju przy zginaniu odpowiednio względem osi y, z (design resistance of the cross-section in bending about the y and z axes, respectively) |
| M_t | – | moment swobodnego skręcania (torque of free torsion) |
| M_{cr} | – | moment krytyczny zwłóczenia elementu (the critical moment of torsional buckling of the element) |
| M_o | – | moment nieswobodnego skręcania (moment of unrestrained turning) |
| p | – | źródło ciepła (source of heat) |
| p_H | – | tempo przyrostu ciepła (heat increase rate) |
| p_{sat} | – | ciśnienie pary wodnej nasyconej (saturated steam pressure) |
| S | – | izoterma sorpcji (sorption isotherm) |
| S_y, S_z | – | momenty statyczne względem osi y, z (static moments about the y, z axis) |
| S_o | – | wycinkowy moment statyczny (fragmentary static moment) |
| T | – | temperatura (temperature) |
| t_i, t_e | – | temperatura wewnętrzna i zewnętrzna (internal and external temperature) |
| q | – | gęstość strumienia ciepła (heat flux density) |
| U | – | współczynnik przenikania ciepła (heat transfer coefficient) |
| u | – | wilgotność masowa (bulk moisture) |
| V | – | objętość próbki (sample volume) |
| V_y, V_z | – | siły poprzeczne w przekroju pręta (transverse forces in the bar section) |
| w | – | całkowita zawartość wody (total water content) |
| w_e | – | zawartość zamrożonej wody (content of frozen water) |
| w_{kp} | – | ilość odparowującej lub kondensującej wilgoci (the amount of evaporating or condensing moisture) |
| w_n | – | nasiąkliwość próbki (sample water absorption) |
| w_s | – | zawartość wilgoci po osiągnięciu stanu równowagi (moisture content after equilibrium has been achieved) |
| δ | – | grubość ścianki profilu (profile wall thickness) |
| δ_p | – | współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu (water vapor diffusion coefficient in the air) |
| λ | – | przewodność cieplna materiału (thermal conductivity of the material) |
| λ_L | – | smukłość względna (relative slenderness) |
| $\lambda(w)$ | – | przewodność cieplna wilgotnego materiału (thermal conductivity of the moist material) |

| | |
|-------------|---|
| $\mu(\phi)$ | - współczynnik oporu dyfuzyjnego wilgotnego materiału (diffusion resistance coefficient of moist material) |
| ρ | - gęstość materiału (material density) |
| σ | - naprężenia normalne (normal stresses) |
| τ | - naprężenia styczne (tangential stresses) |
| ϕ | - wilgotność względna (relative humidity) |
| ϕ_L | - współczynnik zwiczenia (buckling factor) |
| ω | - główna współrzędna wycinkowa (main slice coordinate) |

SPIS TREŚCI

| | |
|---|----|
| I. Część studialna | 8 |
| 1. Wstęp..... | 8 |
| 2. Uzasadnienie podjętego tematu pracy | 9 |
| 3. Założenia projektowe dotyczące lekkiego szkieletu stalowego | 11 |
| 3.1 Ogólny opis technologii i systemu | 11 |
| 3.2 Rozwiązania konstrukcyjne połączeń i elementów..... | 12 |
| 4. Podstawy teorii profili cienkościennych | 14 |
| 5. Podstawy teoretyczne transportu masy i energii w przegrodach zwnętrznych..... | 18 |
| 6. Cel, zakres i tezy pracy..... | 22 |
| 6.1 Cel pracy..... | 22 |
| 6.2 Zakres pracy | 22 |
| 6.3 Tezy pracy | 23 |
| II. Część badawcza w zakresie mechaniki konstrukcji | 24 |
| 7. Ogólna ocena stateczności przegród zwnętrznych | 24 |
| 7.1 Analiza numeryczna wpływu demontażu poszycia ścian..... | 24 |
| 7.2 Autorskie rozwiązanie zapewnienia stateczności bryły budynku | 32 |
| 7.2.1 Opracowanie wkładki montażowej zwiększającej sztywność profilu w miejscu osadzania stężeń | 32 |
| 7.2.2 Stężenia przegród zwnętrznych budynków | 34 |
| 8. Analiza numeryczno - doświadczalna wstępnych przemieszczeń giętno – skrętnych na nośność cienkościennych profili stalowych | 43 |
| 8.1 Analiza doświadczalna | 43 |
| 8.1.1 Opis stanowiska badawczego | 44 |
| 8.1.2 Przebieg wykonywanych badań | 52 |
| 8.1.3 Analiza otrzymanych wyników | 57 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 8.2 | Analiza numeryczna..... | 64 |
| 8.2.1 | Ogólne zasady modelowania MES dla profili cienkościennych | 64 |
| 8.2.2 | Budowa modelu numerycznego | 65 |
| 8.2.3 | Analiza wyników numerycznych | 68 |
| 8.3 | Walidacja analizy numerycznej..... | 79 |
| 8.4 | Podsumowanie wyników analizy numeryczno - doświadczalnej..... | 82 |
| III. | Część badawcza w zakresie fizyki budowli | 82 |
| 9. | Analiza numeryczno - doświadczalna zawilgoconych przegród zewnętrznych..... | 82 |
| 9.1 | Badania doświadczalne | 82 |
| 9.1.1 | Opis stanowiska badawczego | 83 |
| 9.1.2 | Przebieg badań | 86 |
| 9.1.3 | Analiza wyników doświadczalnych | 89 |
| 9.2 | Analiza numeryczna..... | 92 |
| 9.2.1 | Model numeryczny | 93 |
| 9.2.2 | Symulacja numeryczna..... | 96 |
| 9.2.3 | Analiza obliczeń numerycznych..... | 99 |
| 10. | Podsumowanie i wnioski końcowe | 103 |
| | Streszczenie w języku polskim..... | 106 |
| | Streszczenie w języku angielskim | 107 |
| | Literatura | 108 |
| | Załącznik 1 | 120 |
| | Załącznik 2 | 134 |
| | Załącznik 3 | 146 |
| | Załącznik 4 | 158 |

I. CZĘŚĆ STUDIALNA

1. WSTĘP

Powodzie będące efektem wezbrania wody w rzekach lub wynikające z intensywnych opadów deszczu to naturalne procesy, które odgrywają ważną rolę w kształtowaniu środowiska naturalnego. Powodują jednak znaczne szkody materialne i zagrażają życiu. Chociaż polityka planowania unika niewłaściwego nowego rozwoju na obszarach zagrożonych powodzią i kieruje rozwój z dala od obszarów najbardziej zagrożonych, to i tak może się zdarzyć, że natura nie po raz pierwszy może zaskoczyć. Zwiększony popyt na mieszkania i ograniczona dostępna przestrzeń oznacza, że w przyszłości może być nieuniknione budowanie na terenach, na których istnieje pewne ryzyko powodzi, nawet gdy podjęte zostaną działania mające na celu jego zmniejszenie. Dodatkowo domy budowane w technologii lekkiego szkieletu stalowego są planowane na okres eksploatacyjny do 50 lat [100, 131]. W tym czasie mogą nastąpić zmiany klimatyczne mające wpływ na środowisko wodne i zwiększające ryzyko powodzi.

W Polsce i Europie można zauważyć zwiększoną tendencję wznoszenia domów o niskim stopniu zużycia energii. Tego rodzaju budynki wznoszone są także w technologii lekkiego szkieletu stalowego. Atutem tej technologii jest możliwość uzyskania znacznie wyższej izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych w porównaniu do budynków wznoszonych tradycyjnie. Wadą lekkich konstrukcji stalowych jest między innymi wrażliwość na zawilgocenie przegród zewnętrznych czego skutkiem może być spadek izolacyjności cieplnej. W przypadku wód powodziowych elementy nośne konstrukcji szkieletowych oraz ich poszycie może łatwiej ulec zniszczeniu. Między innymi z tego względu wydaje się być koniecznym przeanalizowanie konstrukcji lekkiego szkieletu stalowego pod względem mechaniki i fizyki budowli.

Przeprowadzenie wiarygodnej analizy budynku pod kątem mechaniki konstrukcji oraz fizyki budowli z uwzględnieniem warunków ciepłno – wilgotnościowych powinno być potwierdzone badaniami eksperymentalnymi. Uzyskane w ten sposób dane mogą być podstawą do oceny funkcjonowania całej konstrukcji bądź jej fragmentu. W literaturze nie ma kompleksowych badań dla domów wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego [166]. Główną przyczyną takiego stanu rzeczy są wysokie koszty przeprowadzenia tego typu eksperymentu. Jednakże weryfikację założonych pomysłów projektowych można dokonać wykorzystując zaawansowane pakiety oprogramowań numerycznych. Poza możliwością oceny bryły budynku oraz konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych, pozwalają one na walidację z rezultatami badań doświadczalnych.

Proces obejmujący obliczenia konstrukcji wykonanej z lekkiego szkieletu stalowego z uwzględnieniem zawilgoconych przegród zewnętrznych w

następstwie podtopienia budynku, którym w niniejszej pracy jest jedno oraz dwukondygnacyjny wolnostojący dom jednorodzinny, jest zagadnieniem skomplikowanym i dotychczas niezrealizowanym. Trudnością są tu zaawansowane obliczenia numeryczne konstrukcji z lekkiego szkieletu stalowego oraz zjawiska ciepło – wilgotnościowe związane z transportem masy i energii (ciepła) w złożonych przekrojach przegród zewnętrznych budynku.

Rozpatrywanie zagadnień mechanicznych związanych ze statecznością bryły budynku w następstwie koniecznego do wykonania demontażu zawilgoconego w wyniku podtopienia budynku poszycia, determinuje numeryczne obliczenia samego cienkościennego szkieletu stalowego.

Wykazanie, że przegroda zewnętrzna zalana wodą popowodziową musi zostać zdemontowana jest z kolei podstawowym zagadnieniem z zakresu fizyki budowli, nierzadko złożonym ze względu na wykorzystanie różnych materiałów do jej budowy. Tak obszerny zakres można rozwiązać korzystając z zaawansowanych metod numerycznych, a niniejsza rozprawa doktorska obejmuje wskazany wyżej zakres merytoryczny.

2.UZASADNIENIE PODJĘTEGO TEMATU PRACY

Budownictwo oparte na lekkim szkielecie stalowym cieszy się coraz większą popularnością zarówno w Polsce, jak też innych krajach Unii Europejskiej. Powodem ekspansji technologii lekkiego szkieletu stalowego wywodzącego się z terenu Ameryki Północnej jest bardzo szybki proces realizacji inwestycji. Samo wznoszenie konstrukcji stalowej domu zajmuje od 4 do 7 dni, natomiast wybudowanie obiektu „pod klucz” trwa maksymalnie 4 miesiące. Do budowy domów w technologii lekkiego szkieletu stalowego w Polsce stosuje się zimnogięte profile spełniające warunki podane w normie PN-EN 1993-1-3 [136]. W celu ochrony korozyjnej na stalowe blachy nanoszona jest ogniowa powłoka cynkowa, dzięki której konstrukcja domu może w bardzo dobrym stanie być eksploatowana przez 50 lat [9, 131, 174]. Budowa domów w konstrukcji szkieletu stalowego wybierana jest przez inwestorów między innymi ze względu na dużo niższe koszty budowy w porównaniu do domów murowanych. Z chwilą wyposażenia ich w odpowiednią izolację termiczną, w okresie grzewczym uzyskuje się szybki wzrost temperatury, a mała grubość ścian umożliwia uzyskanie większej powierzchni wewnętrznej na tym samym obrysie zewnętrznym bryły budynku. Szkielet konstrukcji usztywniony jest płytami drewnopochodnymi, na które mocowana jest izolacja cieplna, umożliwiającą uzyskanie właściwych parametrów ciepło - wilgotnościowych przegród zewnętrznych. Przestrzeń wewnętrzna przegrody zewnętrznej o grubości ściany jest wypełniana wełną mineralną, która poza parametrami cieplnymi pełni rolę izolacji akustycznej [59, 112]. Ze względu na niższy w stosunku do technologii tradycyjnej koszt budowy, dom wznoszony w technologii lekkiego szkieletu

stalowego dobrze sprawdza się w obszarze działek budowlanych o mniejszych parametrach użytkowych lub gorszych walorach eksploatacyjnych [99].

Budynek po zalaniu w wyniku powodzi, w którym woda pozostawała przez dłuższy okres czasu wykazuje skutki nadmiernego zawilgocenia przegród. W szczególności dotyczy to przegród zewnętrznych, bezpośrednio narażonych na zawilgocenie wskutek podtopień i nagłych spiętrzeń intensywnie przybierającej wody opadowej [57]. Utrzymująca się przy budynku oraz w budynku przez długi czas woda popowodziowa prowadzi do znacznego pogorszenia właściwości cieplno – wilgotnościowych przegród zewnętrznych, jak też utarty przydatności niektórych materiałów do dalszej eksploatacji [1, 6, 23, 66, 128, 177, 178]. W przypadku długotrwałego oddziaływania wody na budynek wykonany w lekkiej szkieletowej konstrukcji stalowej, jedynie elementy konstrukcyjne nadal nadają się do dalszej eksploatacji. Zachodzi więc konieczność demontażu pokryć oraz wypełnień ścian i odsłonięcie samego szkieletu konstrukcji stalowej, który nie usztywniony płytami poszycia zewnętrznego może nie zachować należytej sztywności przestrzennej i stworzyć zagrożenie co do bezpieczeństwa pracy konstrukcji bryły budynku poprzez utratę jej stateczności [14, 89, 150].

Duże zagrożenie dla lekkich szkieletowych konstrukcji stalowych może wystąpić w przypadku gwałtownego napływu wody zalewowej, której nurt sam w sobie może mieć dużą energię kinetyczną, a ponadto może nieść obiekty, które z chwilą uderzenia w budynek z racji swojej masy i energii będą oddziaływać destrukcyjnie nie tylko na samo poszycie zewnątrz przegrody ale również na jej konstrukcję szkieletową [105, 146]. W wyniku mechanicznego uszkodzenia przegród zewnętrznych stalowe elementy konstrukcji mogą wykazywać trwałe odkształcenia plastyczne, które uniemożliwią potencjalnie ich dalszą pracę w strukturze szkieletu [60, 154]. Konieczne zatem staje się opracowanie ogólnej metody naprawczej, która nie tylko pozwoli na sprawną wymianę materiałów izolacyjnych i okładzinowych ale również elementów konstrukcyjnych, a przy tym nie będzie miała negatywnego wpływu na stateczność konstrukcji. Demontaż i wymiana całości poszycia przyziemia budynku będą również konieczne gdy podtopieniu budynku towarzyszyć będzie skażenie wody. Właściciele uszkodzonych domów szkieletowych wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego oraz firmy ubezpieczeniowe są zainteresowane przywróceniem koniecznych do właściwej eksploatacji budynku wszystkich jej parametrów konstrukcyjnych w sposób, który na etapie wykonywania prac będzie efektywny, bezpieczny i uzasadniony ekonomicznie oraz pozwoli na odtworzenie pierwotnej struktury nośnej budynku szybko i zgodnie z zasadami wiedzy technicznej.

3.ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE DOTYCZĄCE LEKKIEGO SZKIELETU STALOWEGO

Zastosowanie profili cienkościennych jako elementów nośnych w obiektach budowlanych pozwala na uzyskanie m. in. małej masy konstrukcji oraz krótszego czasu budowy w porównaniu do technologii tradycyjnych [45, 84]. Ze względu na skłonność do interakcji różnych form niestateczności (miejscowej, ogólnej i dystorsyjnej [52, 61, 136, 161] projektowanie tego typu konstrukcji może przysparzać wiele problemów. Wymiarowanie konstrukcji z elementów zimmogiętych opisane jest m. in. w pracach [16, 19, 20, 21, 27, 31, 34, 133, 187, 172, 184].

3.1 OGÓLNY OPIS TECHNOLOGII I SYSTEMU

Zalety technologii lekkiego szkieletu stalowego doprowadziły do szerokiego stosowania takich systemów w budynkach mieszkalnych m. in. na obszarach, na których realizowane są szkieletowe konstrukcje drewniane oraz w regionach o trudnych warunkach pogodowych i sejsmicznych [96, 162, 173].

Technologia lekkiego szkieletu stalowego w głównej mierze oparta jest na profilach C i ich pochodnych. Konstrukcja przegród zewnętrznych pokryta jest płytami drewnopochodnymi, a w przypadku przegród wewnętrznych preferowane są płyty gipsowo-kartonowe lub płyty z gipsu włóknistego. Elementy konstrukcyjne budynku wykonane z profili cienkościennych tworzą panele strukturalne ścian, podłóg i dachów. Łączone są ze sobą za pomocą wkrętów i mechanicznych kotew tworząc szkielet bryły budynku [51, 64].

Stalowa konstrukcja szkieletowa w zależności od warunków gruntowo – wodnych mocowana jest na betonowych ławach lub płycie betonowej, na której należy wykonać izolację przeciwwilgociową. Ściany nośne formowane są na bazie profili usztywnionych (typ C) i profili nieusztywnionych (typ U). Profile typu U stanowią prowadnice, w które wkładane są słupki (profil typu C) i tak uzyskuje się ramę ściany.

Lekkie konstrukcje stalowe oparte są na module 60 cm, co oznacza, że w takiej odległości są umieszczone względem siebie poszczególne elementy szkieletu. Grubość ściany uwarunkowana jest wielkością dobranego przekroju poprzecznego profilu oraz przyjętego rozwiązania technologicznego. Ze względów technologicznych i konstrukcyjnych w połowie wysokości słupków wprowadza się profile typu U. Utworzony szkielet konstrukcji ściany obudowany zostaje płytami drewnopochodnymi mocowanymi w kierunku wzdłużnym równoległym do słupków. W ten sposób otrzymuje się konstrukcję warstwową, w której prowadzone są instalacje. Wolna przestrzeń między profilami wypełniana jest materiałem izolacyjnym. Wykończenie powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej nie stwarza żadnych ograniczeń. Otwory okienne i drzwiowe umiejscawiane są w taki sposób w odległości od narożników konstrukcji aby

tworzyły wielokrotność modułu. Ściany działowe wykonywane są z zimnogiętych kształtowników stalowych ogólnie dostępnych na rynku.

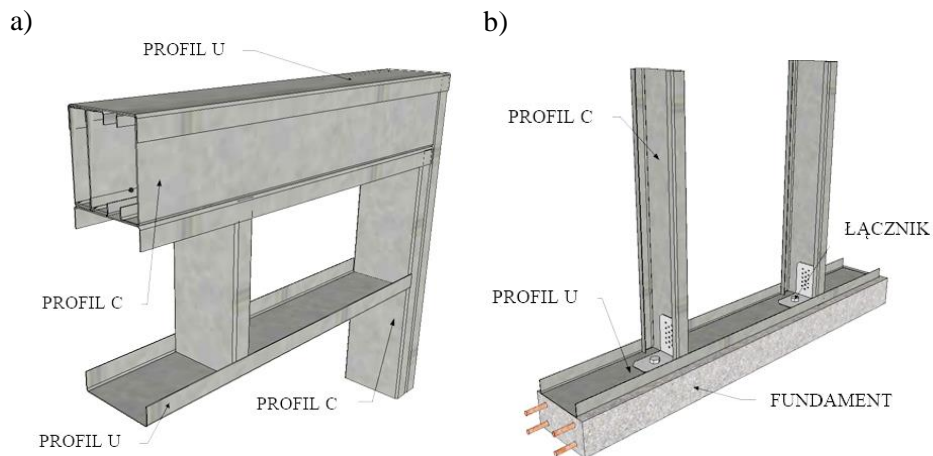
Konstrukcja stropów oparta jest na profilach typu C, a w przypadku dużych obciążeń stosuje się łączenie tych profili na styku środków. Połączone w ten sposób elementy tworzą przekrój dwuteowy. Profile układane są na słupkach paneli ściennych tak aby środek belki stropowej opierał się na środku słupka. W celu wzmocnienia elementu przed zwichrzeniem stosowane są żebra usztywniające typu U. W zależności od przyjętego systemu rozpiętości stropów wynoszą od 4 do 6 metrów. Obudowanie belek i wykonanie prac instalacyjnych wykonuje się na wzór paneli ściennych. Otwory w stropie pod klatki schodowe nie powinny przylegać do ścian zewnętrznych.

Konstrukcja lekkiego dachu stalowego nie różni się od tradycyjnych więźb drewnianych. Dachy o spadku do 35° można projektować przy zastosowaniu wiązarów kratownicowych. Natomiast w przypadku większych spadków zaleca się przyjęcie układu krokwiowo-jętkowego. Główne komponenty konstrukcji więźby dachu bazują na profilach typu C. Elementy dachowe opiera się na środkach słupków ściennych bądź belkach stropowych. Wykończenie dachu zależy od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego.

3.2 ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE POŁĄCZEŃ I ELEMENTÓW

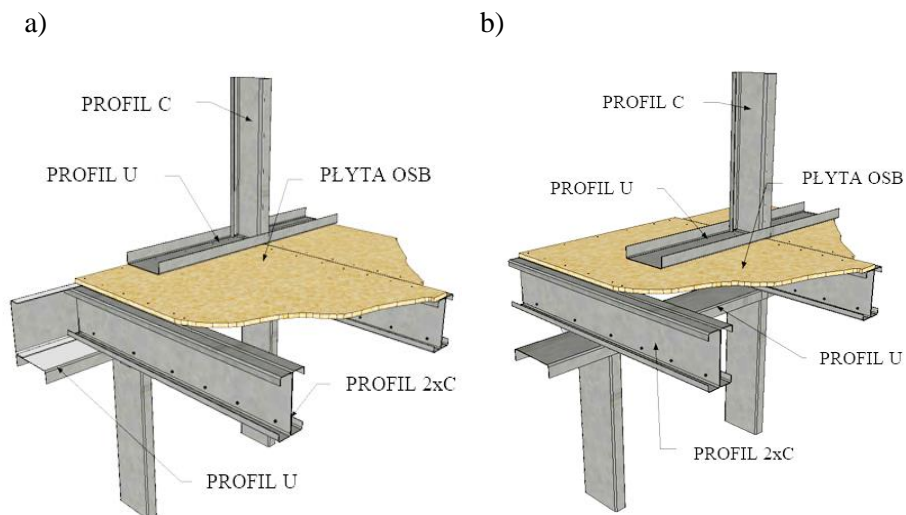
Konstrukcja nośna domów w technologii lekkiego szkieletu stalowego bazuje na czterech podstawowych kształtownikach – C90, C140, U90 i U140. Kształtowniki łączone są w panele przy użyciu wkrętów samowiercących [64, 56, 71, 176]. Większość prac wykonuje się w zakładzie prefabrykacji. Na placu budowy pozostaje skręcenie dostarczonych i odpowiednio oznakowanych elementów na przygotowanym wcześniej fundamencie. Konstrukcja lekkiego szkieletu montowana jest w module 60 cm. Obiekty opisanej technologii mogą mieć rozpiętość 12 m [68].

Ściany zewnętrzne wykonywane z kształtowników cienkościennych typu C90 lub C140 w rozstawie co 60 cm umieszczone są w prowadnicach U90 lub U140 stanowiących podstawę i zarazem tzw. zamknięcie ściany. Dla budynków mieszkalnych parterowych stosowane są profile C90. Natomiast dla budynków dwukondygnacyjnych profile C140. Maksymalna wysokość kondygnacji dla budynków parterowych wynosi 3,5 m, a dla budynków piętrowych 3,0 m. Rygle ścienne wykonywane są z odpowiednio przyciętych kształtowników typu U. Montowany fabrycznie panel ściany uwzględnia nadproża na otwory okienne i drzwiowe (rys. 3.1a). Panel ścienny w zależności od technologii montowany jest do płyty bądź ściany fundamentowej (rys. 3.1b). Układ warstw w ścianie zależy od przyjętych rozwiązań w zakresie stosowanej technologii. Ściany działowe stawia się z cienkościennych profili stalowych ogólnie dostępnych na rynku budowlanym. Ściany te należy wykonywać zgodnie z zaleceniami producenta zastosowanego systemu.



Rys. 3.1. Elementy konstrukcyjne lekkiego szkieletu stalowego: a) nadproże, b) połączenie przegrody zewnętrznej z fundamentem.

Stropy o rozpiętości do 4,5 m wykonywane są z profili usztywnionych C90 i C140 oraz profili nieusztywnionych (bieżników) typu U90 i U140 (rys. 3.2 a, b). Dla większych rozpiętości stropów w budynkach mieszkalnych stosuje się kształtowniki o większej wysokości bądź wykonuje dźwigary stropowe. Rozstaw belek nośnych wynosi 60 cm. Układ warstw stropowych realizowany jest według przyjętej technologii.



Rys. 3.2. Oparcie belek stropowych lekkiego szkieletu stalowego: a) na przegrodzie zewnętrznej, b) na przegrodzie wewnętrznej.

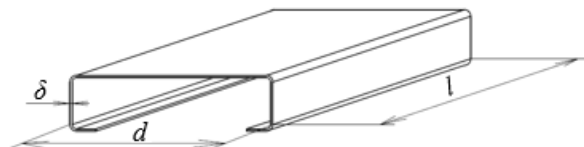
Więźby dachowe o spadku do 35° można wykonywać przy zastosowaniu wiązarów kratowych. W przypadku większych spadków zaleca się przyjęcie układu krokwiowo-jętkowego. Konstrukcja więźby dachowej wykonywana jest z kształtowników C90 i C140 w rozstawie co 60 cm. Ogólne rozwiązania więźb dachowych można stosować jak w przypadku więźb drewnianych. Maksymalna rozpiętość dachu nie powinna przekraczać 12 m.

Połączenia wszystkich elementów wykonywane są przy użyciu wkrętów samowiercących. Mocowanie lekkiej konstrukcji stalowej do fundamentów następuje, przy użyciu śrub kotwiących i gwoździ wstrzeliwanych [56, 71, 176].

4. PODSTAWY TEORII PROFILI CIENKOŚCIENNYCH

Pod pojęciem pręta cienkościennego należy rozumieć pręt, którego stosunki (rys. 4.1): grubości ścianki δ do dowolnego wymiaru przekroju poprzecznego d oraz dowolny wymiar gabarytowy do długości pręta l są mniejsze lub równe jednej dziesiątej [8, 16, 19, 27, 172, 184, 123]:

$$\frac{\delta}{d} \leq 1; \frac{l}{d} \leq 1 \quad (4.1)$$



Rys. 4.1. Oznaczenia grubości ścianek i wymiarów gabarytowych w przypadku prętów cienkościennych o przekroju C-owym.

Dla prętów cienkościennych, w ogólnym przypadku obciążenia nie można przyjąć „hipotezy płaskich przekrojów”. Drugą zasadą, która nie obowiązuje w teorii prętów cienkościennych jest zasada Saint Venanta [12, 25, 30, 41].

Podstawy założeń wymiarowania profili (prętów) cienkościennych o dowolnym przekroju poprzecznym oparte są na sposobie zaproponowanym przez Własowa [168] oraz teorii nośności nadkrytycznej Wintera [136, 156, 175]. Metoda Własowa umożliwia ocenę stanu naprężenia oraz sprawdzenie stateczności ogólnej pręta. Opiera się ona na dwóch hipotezach [168]:

- pierwsza obejmuje założenie tzw. „sztywnego konturu” i zakłada, że kontur pręta przed i po obciążeniu ma taki sam kształt,
- druga obejmuje założenie tzw. „zerowych odkształceń postaciowych powierzchni środkowej”. Jest ona spełniona tylko dla przypadku czystego skręcania (skręcania swobodnego).

Metoda Wintera stosowana jest do wymiarowania elementów cienkościennych złożonych ze ścianek płaskich, zabezpieczonych przed utratą stateczności ogólnej, które względem siebie są pod kątem prostym lub do niego

zbliżonym [12]. Utrata stateczności lokalnej ścianki elementu zgodnie z założeniami metody Wintera, nie powoduje utraty jej zdolności do dalszego przenoszenia obciążeń, w przypadku gdy choć jedna z krawędzi podłużnych jest nadal prosta. Wyczerpanie nośności elementu cienkościennego ma miejsce po załamaniu się tych krawędzi [92, 107, 164]. Na chwilę obecną nie ma ogólnej metody wymiarowania prętów cienkościennych, a obie metody wzajemnie się uzupełniają [129, 135, 136].

W ujęciu teorii I rzędu, ocenę wyężenia prętów cienkościennych o przekroju otwartym poddanych zginaniu i skręcaniu opiera się na zasadach superpozycji, a naprężenia normalne i styczne w przekroju pręta odpowiadające poszczególnym składowym obciążeniom oblicza się za pomocą wzorów (4.2) i (4.3):

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} - \frac{M_z}{I_z} + \frac{B\omega}{I_\omega} \quad (4.2)$$

$$\tau = \frac{-V_z S_y}{t I_y} - \frac{V_y S_z}{t I_z} - \frac{M_\omega S_\omega}{t I_\omega} \pm \frac{M_t}{I_t} t \quad (4.3)$$

gdzie:

- $M_y, M_z, B, M_\omega, M_t$ – siły wewnętrzne w przekroju pręta (momenty zginające, bimoment, moment giętno-skrętny i czystego ścinania),
- y, z, ω – współrzędne kartezjańskie i wycinkowa punktu na linii środkowej przekroju, w którym obliczamy naprężenia normalne,
- V_y, V_z – siły poprzeczne w przekroju pręta,
- S_y, S_z, S_ω – momenty statyczne względem osi y, z części przekroju powyżej punktu, w którym obliczamy naprężenia styczne oraz wycinkowy moment statyczny,
- t – grubość przekroju poprzecznego profilu.

Maksymalne naprężenia od obciążeń obliczeniowych w przekroju pręta zgodnie z równaniami (4.2) i (4.3) powinny być mniejsze bądź równe odpowiedniej wytrzymałości obliczeniowej f_d określonej w normie [128] zgodnie z warunkami:

$$\sigma_{\max} \leq f_d \quad (4.4a)$$

$$\tau_{\max} \leq f_{dv} = 0,58f_d \quad (4.4b)$$

natomiast naprężenia zastępcze σ_{zast} powinny spełniać warunek zgodnie z [129],

$$\sigma_{zast} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2} \leq 1,1f_d \quad (4.5)$$

Jest to warunek przybliżony, bowiem nie zawsze w tym samym punkcie przekroju występują maksymalne naprężenia normalne i styczne.

Ocena stanu granicznego nośności rozpatrywanych elementów, w przypadku obliczania sił wewnętrznych według teorii I rzędu, wymaga sprawdzenia przybliżonego warunku zgodnie z [128]. Uwzględnia się wówczas możliwość utraty stateczności ogólnej elementu, tj. jego zwichrzenia, ale pomija się efekt skręcania.

$$\frac{M_y}{\varphi_L M_{Ry}} + \frac{M_z}{M_{Rz}} \leq 1 \quad (4.6)$$

W warunku powyżej (4.6), φ_L to współczynnik zwichrzenia wyznaczony na podstawie smukłości względnej, zgodnie z [128] z równania:

$$\bar{\lambda}_L = 1,15 \sqrt{\frac{M_{Ry}}{M_{ycr}}} \quad (4.7)$$

We wzorze (4.7) M_{cr} to moment krytyczny zwichrzenia elementu wyznaczany na podstawie klasycznej teorii stateczności.

W przypadku stanu granicznego użytkowania postępuje się analogicznie, a warunek sprowadza się do oceny przemieszczeń od obciążeń charakterystycznych [128, 129]. Maksymalne przemieszczenia wypadkowe przekroju poprzecznego nie powinny przekraczać wartości granicznych [128].

$$f_{\max} \leq f_{gr} \quad (4.8)$$

Wymiarowanie skręcanych i zginanych prętów cienkościennych o przekroju otwartym metodą stanów granicznych i współczynników częściowych zgodnie z normami europejskimi [135, 136] wyznacza się w oparciu o ocenę wyężenia elementów skręcanych i dwukierunkowo zginanych. W ramach stanu granicznego nośności sprawdza się warunek:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rd}} \leq 1 \quad (4.9)$$

gdzie:

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$, B_{Ed} – obliczeniowe siły wewnętrzne w przekroju pręta (momenty zginające oraz bimoment),

$M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$ – nośności obliczeniowe przekroju przy zginaniu odpowiednio względem osi y i z, gdzie oś y jest osią o większej sztywności,

$B_{Rd} = W_{\omega} f_y$ – nośność obliczeniowa przekroju przy nieswobodnym skręcaniu, przy czym W_{ω} oblicza się ze wzoru:

$$W_{\omega} = \frac{I_{\omega}}{\omega_{\max}} \quad (4.10)$$

Ocena stanu granicznego nośności rozpatrywanych elementów, w przypadku obliczania sił wewnętrznych według teorii I rzędu, wymaga sprawdzenia ponadto przybliżonego warunku określonego w normie [129], w którym uwzględnia się możliwość utraty stateczności ogólnej elementu, tj. jego zwichrzenia [186], ale pomija się efekt skręcania. Analogicznie do warunku (4.6) zapiszemy, że:

$$\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (4.11)$$

gdzie χ_{LT} jest współczynnikiem zwichrzenia, wyznaczonym zgodnie z [135] na podstawie smukłości względnej:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rd}}{M_{y,cr}}} \quad (4.12)$$

We wzorze (4.12) $M_{y,cr}$, podobnie jak we wzorze (4.6), jest momentem krytycznym zwichrzenia elementu, który jest obliczany na podstawie klasycznej teorii stateczności.

Maksymalne naprężenia od obciążeń obliczeniowych w przekroju pręta zgodnie z warunkami (4.11) i (4.12) powinny być mniejsze bądź równe odpowiedniej wytrzymałości obliczeniowej [12, 135, 186]:

$$\max \sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.13a)$$

$$\max \tau_{Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (4.13b)$$

W warunkach (4.13a i 4.13b) γ_{M0} to częściowy współczynnik bezpieczeństwa, który wynosi 1,0.

W każdym punkcie przekroju łączne naprężenia normalne i styczne, powinny spełniać warunek zgodnie z [135], który określa wyrażenie:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y \gamma_{M0}} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1 \quad (4.14)$$

W analogiczny sposób postępujemy w przypadku sprawdzania stanu granicznego użyteczności zgodnie z [135] i [136], który sprowadza się do oceny przemieszczeń od obciążeń charakterystycznych. Maksymalne ugięcia wypadkowe rozpatrywanego pręta w przekroju poprzecznym, zgodnie z zależnością (4.8), nie powinny przekraczać wartości granicznych ujętych w normie PN-EN 1993-1-1:2006 [135].

W ujęciu teorii II rzędu wymiarowanie prętów cienkościennych sprowadza się (tak jak w teorii I rzędu) do sprawdzenia wskazanych powyżej warunków, a siły wewnętrzne oraz maksymalne przemieszczenia powinny zostać obliczone również w oparciu o analizę statyczną według teorii II rzędu. Otrzymane wówczas wartości sił wewnętrznych oraz przemieszczeń są zazwyczaj większe niż w następstwie ich obliczeń na podstawie teorii I rzędu, jednakże bez dokładnej analizy nie da się wskazać konkretnych zależności. Zalecane jest w przypadku wymiarowania prętów cienkościennych - w oparciu o teorię I rzędu zostawienie zapasu na poziomie ok. 10 do 15%, a wskazany margines bezpieczeństwa podyktowany jest potrzebą uniezależnienia potencjalnie możliwej katastrofy konstrukcji od wyczerpania rezerwy jej nośności [46, 47, 151].

5. PODSTAWY TEORETYCZNE TRANSPORTU MASY I ENERGII W PRZEGRODACH ZEWNĘTRZNYCH

Proces transportu masy i energii w zawilgoconych budowlanych przegrodach zewnętrznych jest niezwykle złożony i ma sprzężony charakter, który zależy od struktury wewnętrznej materiałów przegrody jak też stanu jej zawilgocenia [7, 15, 58, 72, 87]. Jednym z prekursorów stworzenia matematycznego modelu opisu sprzężonej wymiany masy i energii był de Vries [169]. Z kolei Glaser [42] stworzyła model oparty na teorii dyfuzji pary wodnej Ficka [78, 118], który wykorzystywany jest w normie PN-EN ISO 13788 - Ciepłota – wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku [139]. Pierwszej próbie kompleksowego opisanie transportu masy w literaturze krajowej w latach sześćdziesiątych podjął się Płoński [125]. Dla sprzężonego transportu masy i energii w ośrodkach kapilarnych zespół P. Klemma i Gawina stworzył model matematyczny uwzględniający wielofazowość ośrodka [35, 36, 37, 38]. Natomiast Kubik i Świrska prowadzili badania doświadczalne [79, 80]. Kompleksowe spojrzenie na przepływ ciepła i wilgoci w swoich pracach zawarli Wyrwał i Świrska [179, 180], którzy przedstawili model obejmujący niejednorodną budowę materiałów porowatych.

Poza modelami matematycznymi opisującymi dynamiką przenoszenia ciepła i wilgoci, istotne jest poznanie ośrodka, w którym te zmiany zachodzą. Prace w tym zakresie zostały opisane w publikacjach [81, 115, 144].

Powszechnie uznaje się, że ciepło w materiałach przemieszcza się na skutek przewodzenia, a wilgotność poprzez dyfuzję i podciąganie kapilarne. Procesy te,

uzupełnione o prawo zachowania energii i masy, zostały opisane przez Künzel [81]. Model ten został wykorzystany między innymi do analizy procesów transportowych masy i energii.

Sprężony transport ciepła i wilgoci można obliczyć za pomocą termodynamicznych stanów nierównowagi. Stan wilgotności czy temperatury materiału można opisać za pomocą odpowiednich wielkości fizycznych. Stan termiczny skończonej objętości opisany jest entalpią [76, 122]. Ponieważ zmiana entalpii podlega prawu zachowania energii to ilość energii w danej objętości można zmienić poprzez jej dopływ lub odpływ [81] co opisuje równanie:

$$\frac{\partial H}{\partial T} = -\text{grad}q + p_H \quad (5.1)$$

gdzie:

- H - całkowita entalpia, [J/m³],
- T - czas, [s],
- q - gęstość strumienia ciepła, [W/m²],
- p_H - tempo przyrostu ciepła, [W/m³].

Entalpia suchego materiału H_s [80] opisana jest następującym równaniem:

$$H_s = \rho \cdot c \cdot T \quad (5.2)$$

gdzie:

- ρ - gęstość materiału, [kg/m³],
- c - ciepło właściwe materiału, [J/(kg·K)],
- T - temperatura, [°C].

Z kolei określenie entalpii wody w materiale można wyznaczyć z równania (5.3):

$$H_w = \left[(w - w_e)c_w + w_e c_e - h_e \frac{\partial w_e}{\partial T} \right] T \quad (5.3)$$

gdzie:

- c_w - ciepło właściwe wody, [J/(kg·K)],
- w - całkowita zawartość wody, [kg/m³],
- w_e - zawartość zamrożonej wody, [kg/m³],
- h_e - entalpia topnienia, [J/kg],
- T - temperatura, [°C].

Całkowita entalpia warstwy elementu budowlanego jak wynika z prac [81, 82], składa się z entalpii suchego materiału budowlanego (5.2) oraz entalpii zawartej w nim wody (5.3), co obliczymy w oparciu o równanie:

$$H = H_s + H_w \quad (5.4)$$

gdzie:

H_s – entalpia suchego materiału, $[J/m^3]$,

H_w – entalpia wilgotnego materiału, $[J/m^3]$.

Niezależnie od stanu skupienia ilość wilgoci w materiale budowlanym wyraża się w absolutnej zawartości wilgoci, a jej zmiana podlega prawu zachowania masy. Równanie różniczkowe [80, 82] opisujące prawo zachowania masy, przyjmuje postać:

$$\frac{\partial w}{\partial T} = -\nabla(g_w + g_v) \quad (5.5)$$

gdzie:

w – zawartość wody w materiale, $[kg/m^3]$,

T – temperatura, $[^\circ C]$,

g_w – gęstość strumienia przepływu masy, $[kg/(m^2 \cdot s)]$,

g_v – gęstość strumienia dyfuzji pary wodnej, $[kg/(m^2 \cdot s)]$.

Gęstość strumienia ciepła jest proporcjonalna do przewodności cieplnej wilgotnego materiału budowlanego i gradientu temperatury (prawo Fouriera):

$$q = -\lambda(w)\nabla T \quad (5.6)$$

gdzie:

$\lambda(w)$ – przewodność cieplna wilgotnego materiału, $[W/(m \cdot K)]$,

T – temperatura, $[^\circ C]$.

Źródło ciepła występuje podczas przemiany fazowej, kiedy para wodna kondensuje się do postaci płynnej (źródło dodatnie) lub kiedy woda paruje (źródło ujemne) [81, 82]. Można to przedstawić za pomocą równania:

$$p = h_E \cdot \nabla w_{kp} \quad (5.7)$$

gdzie:

p – źródło ciepła, $[W/m^3]$,

h_E – entalpia zmiany fazowej pomiędzy parą a cieczą, $[J/kg]$,

w_{kp} – ilość odparowującej lub kondensującej wilgoci, $[kg/(m^2 \cdot s)]$.

Dyfuzja jest głównym mechanizmem transportu pary wodnej. Zjawisko to przeważnie odnosi się do dyfuzji pary wodnej w powietrzu z uwzględnieniem dodatkowych oporów przepływu w materiale [82]. Stąd równanie dyfuzji przyjmuje postać:

$$g_v = \frac{-\delta_a}{\mu(\varphi)} \nabla p \quad (5.8)$$

gdzie:

g_v – gęstość przepływu pary wodnej, $[kg/(m^2 \cdot s)]$,

δ_a – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, [kg/(m·s·Pa)],
 $\mu(\varphi)$ – współczynnik oporu dyfuzyjnego wilgotnego materiału, [%],
 ∇p – gradient ciśnienia cząstkowego pary wodnej, [Pa/m].

Ważnym aspektem przy analizie zjawisk cieplno - wilgotnościowych są właściwości fizyczne materiału. Przewodnictwo cieplne w wilgotnych materiałach budowlanych używane jest do opisu wpływu zlokalizowanej wody na transport ciepła. Informacje o zależności przewodności cieplnej od zawartości wody można znaleźć w pracach [13, 18, 49, 70, 108]. Według autorów prac [22, 32] następująca formuła (5.9) opisuje wystarczająco dobrze przewodność cieplną zależną od wilgotności:

$$\lambda(w) = \lambda_o \left(1 + b \cdot \frac{w}{\rho_s} \right) \quad (5.9)$$

gdzie:

$\lambda(w)$ – przewodność cieplna wilgotnego materiału, [W/(m·K)],
 λ_o - przewodność cieplna suchego materiału, [W/(m·K)],
 ρ_s – gęstość objętościowa suchego materiału, [kg/m³],
 b – współczynnik wilgotności, oddający procentowy wzrost współczynnika przewodzenia ciepła do wzrostu masy materiału, [%].

Akumulacja wilgoci w strukturze materiałów porowatych uwzględnia zawartość pary wodnej w powietrzu wypełniającym pory oraz wilgoci przylegającej do ścianek porów i kapilar. Uwzględniając akumulację, przewodzenie ciepła oraz zasadę zachowania energii i masy, zaproponowano model matematyczno – fizyczny opisujący sprzężony przepływ ciepła i wilgoci [39]. Lewa strona równań (5.10) i (5.11) zawiera człony akumulacyjne, a z kolei prawa strona opisuje transport:

– równanie transportu ciepła:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + h_v \cdot \nabla \cdot (\delta_p \cdot \nabla \cdot (\varphi p_{sat})) \quad (5.10)$$

– równanie transportu wilgoci:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D | \varphi \cdot \nabla \varphi + \delta_p \cdot \nabla \cdot (\varphi p_{sat})) \quad (5.11)$$

gdzie:

$\partial H/\partial T$ - zdolność magazynowania ciepła wilgotnego materiału budowlanego, [J/(m³·K)],
 T – temperatura, [°C],
 λ – przewodność cieplna materiału, [W/(m·K)],
 h_v – entalpia parowania wody, [J/kg],
 δ_p – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, [kg/(m·s·Pa)],

- φ – wilgotność względna, [%],
 p_{sat} – ciśnienie pary wodnej nasyconej, [Pa],
 $\partial w/\partial \varphi$ - zdolność magazynowania wilgoci materiału budowlanego, [kg/m³],
 D_{φ} - współczynnik lepkości cieczy, [kg/(m·s)].

6.CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

6.1 CEL PRACY

Celem rozprawy doktorskiej jest numeryczno-doświadczalna analiza przegród zewnętrznych wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego w następstwie działania wód popowodziowych wymuszających konieczność zdjęcia warstw poszycia oraz wpływu miejscowego zawilgocenia materiałów przegrody na jej właściwości ciepłno-wilgotnościowe.

Realizacja celu będzie możliwa po wypełnieniu celów składowych, które obejmują:

- analizę numeryczno - doświadczalną wstępnych przemieszczeń giętno – skrętnych na nośność cienkościennych profili stalowych oraz wpływ demontażu poszycia przegród zewnętrznych na stateczność elementów z lekkich konstrukcji stalowych;
- opracowanie sposobu efektywnej naprawy budynku na bazie autorskiego rozwiązania wkładki montażowej zwiększającej sztywność profilu w miejscu osadzania stężeń, niezbędnej do zapewnienia stateczności przestrzennej bryły budynku;
- analizę numeryczno - doświadczalną właściwości ciepłno - wilgotnościowych przegród zewnętrznych zawilgoconych na skutek oddziaływania wód popowodziowych.

6.2 ZAKRES PRACY

Przedmiotem badań numeryczno - doświadczalnych są:

- stateczność lekkiej konstrukcji stalowej dla przestrzennej bryły budynku w wyniku demontażu zawilgoconego poszycia przegród zewnętrznych,
- cienkościennie elementy ceowe zewnętrznych przegród budowlanych wykonane w technologii lekkiej konstrukcji stalowej, poddane obciążeniu giętno – skrętnemu wynikającemu z demontażu poszycia usztywniającego konstrukcję przegrody,
- parametry ciepłno – wilgotnościowe przegród zewnętrznych z uwzględnieniem zawilgocenia materiałów spowodowanego zaleganiem wód popowodziowych.

Cel pracy zostanie zrealizowany poprzez przeprowadzenie analiz numeryczno - doświadczalnych. Uzyskane rezultaty stanowiąc będą podstawę do oceny wpływu częściowego demontażu poszycia przegrody zewnętrznej

budynku w technologii lekkiego szkieletu stalowego na stateczność konstrukcji budynku oraz opisu zjawisk ciepłno – wilgotnościowych zewnętrznych przegród poddanych oddziaływaniu wód popowodziowych.

Praca obejmuje:

- przegląd literatury w zakresie analizy mechaniki prętów cienkościennych i fizyki budowli zewnętrznych przegród wykonanych w technologii lekkiej konstrukcji stalowej.
- wykonanie analizy numerycznej z wykorzystaniem MES-u w zakresie oceny stateczności konstrukcji szkieletowej domu jednorodzinnego zaprojektowanego w technologii lekkiego szkieletu stalowego w różnych stadiach realizacji wymiany poszycia zewnętrznych przegród ściennych w następstwie podtopienia budynku.
- badanie nieswobodnego skręcania cienkościennych profili stalowych o przekroju otwartym.
- opracowanie wkładki montażowej, do zastosowania przy montażu stężeń ściennych ścian w technologii lekkiego szkieletu stalowego.
- badania potwierdzające zasadność użycia wkładki montażowej przy montażu stężeń ściennych.
- wykonanie analizy numerycznej z wykorzystaniem MES-u w zakresie obejmującym pracę statyczną prętów cienkościennych dla przekrojów poprzecznych z zaprojektowaną wkładką montażową.
- wykonanie analizy numerycznej z wykorzystaniem MES-u w zakresie właściwości ciepłno – wilgotnościowych zewnętrznych przegród w technologii lekkiej konstrukcji stalowej, poddanych nadmiernemu zawilgoceniu w wyniku oddziaływania wód popowodziowych.
- przeprowadzenie analizy wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych i numerycznych oraz ich prezentacja.
- podsumowanie i wnioski końcowe.

6.3 TEZY PRACY

Tezy badawcze:

- analiza numeryczna pozwala określić przemieszczenia cienkościennych konstrukcji stalowych powstałe w następstwie usunięcia elementów pokrycia przegród pionowych i ocenę tych przemieszczeń pod kątem stateczności bryły budynku;
- zaprojektowana wkładka montażowa służy do miejscowego wzmocnienia profilu oraz sprawnego montażu stężeń ściennych a stateczność bryły budynku wzmocnionej stężeniami jest znacząco zwiększona w stosunku do konstrukcji nie stężonej;
- analiza numeryczna – doświadczalna pozwala określić przydatność materiałów przegrody zewnętrznej w chwili jej zawilgocenia spowodowanego oddziaływaniem wód popowodziowych.

II. CZĘŚĆ BADAWCZA W ZAKRESIE MECHANIKI KONSTRUKCJI

7. OGÓLNA OCENA STATECZNOŚCI PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH

Zdolnością zespołu konstrukcyjnego do przenoszenia obciążeń i powracania do warunków równowagi statycznej nazywamy statecznością konstrukcji. W przypadku gdy konstrukcja wychylona jest z położenia równowagi statycznej i nie wraca do pierwotnego położenia układu, mówimy o niestateczności [33, 85, 89].

W nawiązaniu do uzasadnienia tematu w zakresie podjętego celu pracy zachodzi potrzeba demontażu poszycia przegrody zewnętrznej, co wiąże się z koniecznością zastosowania stężeń bryły budynku oraz wskazaniem metody jej usztywnienia na czas wykonywanych prac naprawczych.

7.1 ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU DEMONTAŻU POSZYCIA ŚCIAN

Celem globalnej analizy oceny stateczności konstrukcji było określenie wpływu demontażu poszycia usztywniającego ściany parteru na stan użyteczności konstrukcji. Na podstawie dokonanej analizy pokazano również jak wyeliminować negatywny wpływ zdjęcia poszycia przez zastosowanie stężeń. Analizę numeryczną dotyczącą utraty stateczności bryły budynku mieszkalnego wykonano w programie Autodesk Robot Structural 2015.

Analizie poddano konstrukcje z lekkiego szkieletu stalowego budynku parterowego i dwukondygnacyjnego, które zaprojektowano na tym samym obrysie zewnętrznym. Modele weryfikowano pod kątem określenia stateczności bryły budynku w momencie zdjęcia poszycia usztywniającego ścian parterowych i zastąpienia jego wpływu stalowymi stężeniami ściennymi.

W tym celu przyjęto modele obliczeniowe oparte na technologii Sunday System firmy AmTech [68]. Do badań numerycznych przyjęto dwa budynki (jedno i dwukondygnacyjny) o tych samych wymiarach w rzucie poziomym 9,3 m na 12,3 m i wysokości pierwszej kondygnacji 2,8 m. W modelach zaprojektowano więźbę krokwiowo – jętkową o nachyleniu połaci dachu 35° dla konstrukcji parterowej i 43° dla konstrukcji piętrowej. Wysokość szkieletu parterowego budynku do kalenicy wynosi 5,67 m natomiast dla budynku dwukondygnacyjnego jest równa 8,62 m. Szkielety konstrukcji bazowały na kształtownikach zimnogiętych o grubości 1,5 mm i rozstawie co 60 cm. W przypadku konstrukcji parterowej przyjęto profile typu C90, a dla obiektu dwukondygnacyjnego C140, które umieszczono odpowiednio w prowadnicach typu U90 i U140. Belki stropu dla każdego modelu tworzyły scalone profile nadając im w ten sposób kształt dwuteowy.

Analizując pracę konstrukcji zestawiono możliwe do wystąpienia obciążenia [131, 132, 133, 134, 145]. Tabela 7.1 przedstawia obciążenia charakterystyczne uwzględnione w obliczeniach. Szczegółowe obliczenia obciążeń śniegiem i wiatrem zamieszczono w załączniku 1.

Obliczeń ciężaru własnego konstrukcji dokonano według normy PN - EN1991-1-1 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne - Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach [132]. Obciążenie użytkowe przyjęto według rozdziału 6 normy PN-EN 1991-1-1 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne - Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach [132]. Do ustalenia obciążenia śniegiem przyjęto normę PN-EN 1991-1-3 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – obciążenia śniegiem [133]. Obciążenia wiatrem przyjęto zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – oddziaływanie wiatru [134]. Natomiast kombinacje obliczonych obciążeń utworzono zgodnie z PN-EN 1990 Eurokod Podstawy projektowania konstrukcji [131].

Modele obliczeniowe zbudowano w programie Autodesk Robot Structural 2015. W celu uproszczenia modelu przyjęto wszystkie podpory w postaci utwierdzeń. Konstrukcja nośna składała się z elementów prętowych, którym nadano odpowiednie przekroje i zadeklarowano zwolnienia tworząc połączenia typu przegub-przegub. Poszycie konstrukcji budynku zamodelowano jako panele, nadając im odpowiednie parametry płyty OSB.

Panele zostały zdefiniowane parametrem sztywności sprężystej, która określa stosowanie elementów skończonych typu powłoka [2, 103, 104, 153]. W przypadku modelu panelu bez elementów skończonych generowany obiekt wykazywał bark cech usztywniających. Charakteryzowało się to zbyt dużymi przemieszczeniami analizowanej konstrukcji. Przekazywanie obciążeń z panelu na elementy dochodzące polegało na dystrybucji obciążeń za pomocą rozkładu kopertowego w dwóch kierunkach.

Tabela 7.1. Zestawienie obciążeń charakterystycznych analizowanych modeli budynków jednorodzinnych.

| Obciążenia charakterystyczne [kN/m ²] | | Model budynku | | |
|---|--------------------|---------------|----------|-------|
| | | Parterowy | Piętrowy | |
| Ciężar własny | Dach | 0,836 | 0,886 | |
| | Strop nad parterem | 0,496 | 1,895 | |
| | Strop nad piętrem | - | 0,574 | |
| | Ściana zewnętrzna | 0,932 | 1,002 | |
| | Ściana wewnętrzna | 0,478 | 0,548 | |
| Obciążenie śniegiem | | 0,600 | 0,384 | |
| Max. obciążenie wiatrem | Parcie | Dach | 0,508 | 0,548 |
| | | Ściany | 0,596 | 0,596 |
| | Ssanie | Dach | 0,799 | 0,877 |
| | | Ściany | 0,689 | 0,767 |
| Obciążenie eksploatacyjne stropu nad parterem | | - | 2 | |

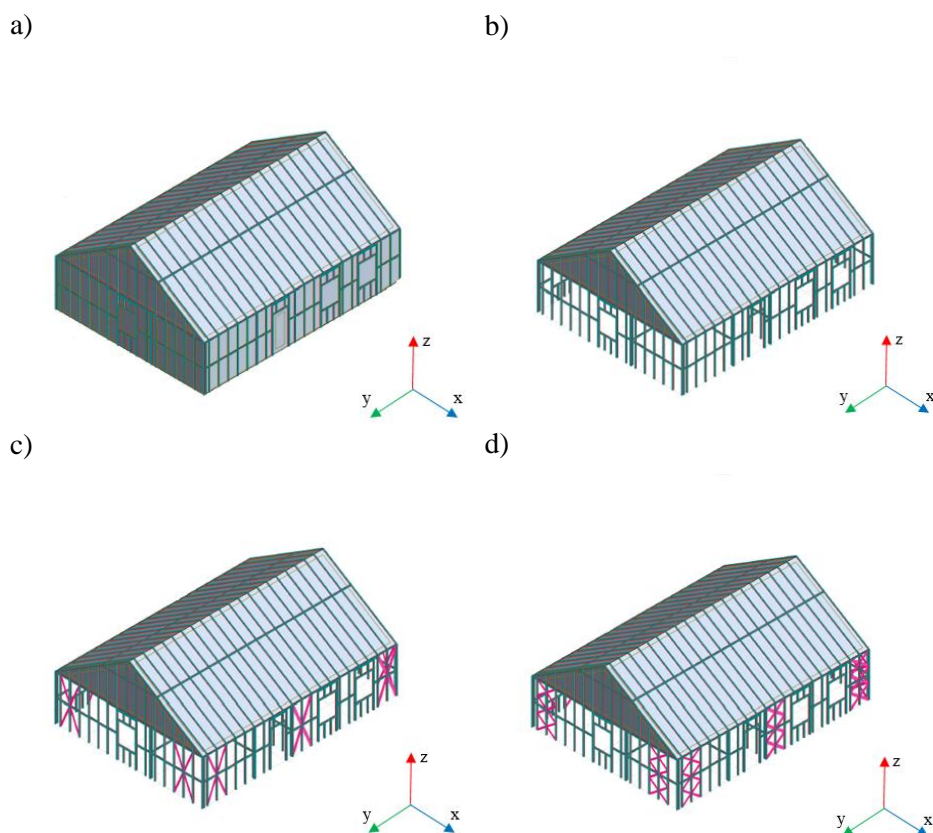
Tworzenie siatki elementów skończonych wykonano metodą prostą (Coonsa) typu czterowzłowego o rozmiarach elementu 0,1 m (rys. 7.1). Na ogół drobniejsza siatka daje lepsze wyniki, jednak wiąże się to z wydłużonym czasem obliczeń. Dlatego przeprowadzono dla modelu parterowego kilka analiz przy różnych rozmiarach elementu tak aby znaleźć równowagę pomiędzy rozrzutem wyników a czasem obliczeń podobnie jak sugerują autorzy prac [101, 111, 117, 147].



Rys. 7.1. Model obliczeniowy konstrukcji budynku: a) siatka MES dla modelu obliczeniowego budynku piętrowego wykonanego z profili C140, b) metoda siatkowania Coonsa.

W przeprowadzonym studium założono po cztery przypadki obliczeniowe. Dla konstrukcji parterowej zastosowano opis:

- budynek C90_I - konstrukcja budynku z całkowitym poszyciem ścian (rys. 7.2 a),
- budynek C90_II - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej (rys. 7.2 b),
- budynek C90_III - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej ze stężeniami pionowymi w postaci pojedynczego skrzyżowania (rys. 7.2 c),
- budynek C90_IV - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej ze stężeniami pionowymi w postaci potrójnego skrzyżowania (rys. 7.2 d).



Rys. 7.2. Modele obliczeniowe parterowego budynku jednorodzinnego wykonanego w technologii lekkiego szkieletu stalowego: a) budynek z poszyciem – budynek C90_I, b) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej – budynek C90_II, c) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej i stężeniem w postaci pojedynczego skrzyżowania – budynek C90_III, d) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej i stężeniem w postaci potrójnego skrzyżowania – budynek C90_IV.

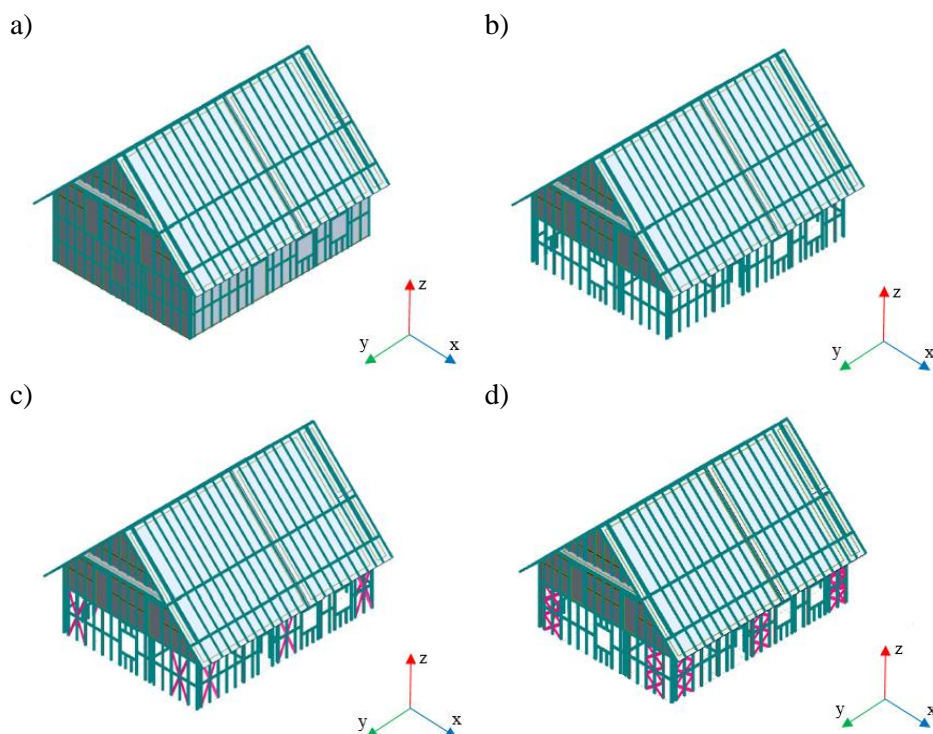
Rezultaty przeprowadzonej symulacji dla budynku parterowego zestawiono w tabeli 7.2. Wyniki analizy konstrukcji parterowej jednoznacznie pokazują, że demontaż poszycia z części parterowej (budynek C90_II) wpłynął na stateczność bryły budynku i przekroczył graniczne wartości przemieszczeń poziomych określonych według [131, 135] w stosunku do konstrukcji z pełnym poszyciem (budynek C90_I). Natomiast zastosowane stężenia w postaci stężeń pionowych (budynek C90_III i budynek C90_IV) ograniczyły przemieszczenia poziome w porównaniu do modelu obliczeniowego – budynek C90_II. Również dla przemieszczeń kątowych zauważalna jest różnica w rozpatrywanych przypadkach obliczeniowych na niekorzyść obiektu bez usztywnień.

Tabela 7.2. Wartości przemieszczeń liniowych i kątowych dla konstrukcji parterowej opartej na kształtownikach C90.

| Przemieszczenia | | budynek C90_I | budynek C90_II | budynek C90_III | budynek C90_IV |
|-----------------|----------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| MAX. | UX [mm] | 0,245 | 0 | 0,075 | 0,430 |
| | UY [mm] | 3,540 | 32,276 | 7,342 | 7,326 |
| | UZ [mm] | 2,011 | 3,313 | 2,142 | 6,746 |
| | RX [deg] | 0,685 | 0,789 | 0,749 | 0,879 |
| | RY [deg] | 0,682 | 0,404 | 0,692 | 0,305 |
| | RZ [deg] | 0,302 | 0,382 | 0,257 | 0,257 |
| MIN. | UX [mm] | -0,585 | -152,617 | -2,716 | -6,986 |
| | UY [mm] | -6,738 | -27,311 | -7,033 | -6,322 |
| | UZ [mm] | -19,582 | -4,333 | -20,439 | -8,930 |
| | RX [deg] | -0,477 | -0,935 | -0,631 | -0,918 |
| | RY [deg] | -0,675 | -4,456 | -0,735 | -0,235 |
| | RZ [deg] | -0,259 | 0 | -4,683 | -0,229 |

Modele obliczeniowe szkieletu konstrukcji budynku piętrowego opisano jako:

- budynek C140_I - konstrukcja budynku z całkowitym poszyciem ścian (rys. 7.3 a),
- budynek C140_II - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej (rys. 7.3 b),
- budynek C140_III - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej ze stężeniami pionowymi w postaci pojedynczego skrzyżowania (rys. 7.3 c),
- budynek C140_IV - konstrukcja budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej ze stężeniami pionowymi w postaci potrójnego skrzyżowania (rys. 7.3 d).



Rys. 7.3. Modele obliczeniowe piętrowego budynku jednorodzinnego wykonanego w technologii lekkiego szkieletu stalowego: a) budynek z poszyciem – budynek C140_I, b) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej – budynek C140_II, c) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej i stężeniem w postaci pojedynczego skrzyżowania – budynek C140_III, d) budynek z usuniętym poszyciem z części parterowej i stężeniem w postaci potrójnego skrzyżowania – budynek C140_IV.

Analiza konstrukcji piętrowej (tabela 7.3), w oparciu o rezultaty uzyskanych przemieszczeń liniowych i kątowych wykazała, że demontaż poszycia z części parterowej (budynek C140_II) wpływa na stateczność bryły budynku. Graniczne wartości przemieszczeń poziomych są o 97% większe od przemieszczeń dla konstrukcji z pełnym poszyciem (budynek C140_I). Podobnie jak w budynku parterowym zastosowane stężenia (budynek C140_III i budynek C140_IV) uniemożliwiły przemieszczenia poziome w porównaniu do modelu obliczeniowego – budynek C140_II. Maksymalne przemieszczenia występują również w modelu niestężonym.

Tabela 7.3. Wartości przemieszczeń liniowych i kątowych dla konstrukcji piętrowej opartej na kształtownikach C140.

| Przemieszczenia | | budynek C140_I | budynek C140_II | budynek C140_III | budynek C140_IV |
|-----------------|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| MAX. | UX [mm] | 0,430 | 0 | 0,733 | 1,603 |
| | UY [mm] | 7,326 | 59,340 | 3,747 | 1,029 |
| | UZ [mm] | 6,746 | 1,965 | 3,736 | 4,171 |
| | RX [deg] | 0,879 | 0,527 | 1,228 | 1,234 |
| | RY [deg] | 0,305 | 1,124 | 2,406 | 2,548 |
| | RZ [deg] | 0,257 | 0,883 | 0,271 | 0,273 |
| MIN. | UX [mm] | -6,986 | -272,840 | -9,166 | -8,446 |
| | UY [mm] | -6,322 | -46,975 | -4,523 | -4,323 |
| | UZ [mm] | -8,930 | -20,253 | -46,589 | -47,061 |
| | RX [deg] | -0,918 | -0,629 | -1,262 | -1,271 |
| | RY [deg] | -0,235 | -5,434 | -2,400 | -2,586 |
| | RZ [deg] | -0,229 | 0 | -0,314 | -0,324 |

7.2 AUTORSKIE ROZWIĄZANIE ZAPEWNIENIA STATECZNOŚCI BRYŁY BUDYNKU

W rozdziale 7.1 wykazano, że z chwilą zdjęcia poszycia uzasadnione jest zastosowanie stężeń w celu zachowania stateczności bryły budynku. W związku z tym nasuwa się konieczność opracowania metody naprawczej mającej na uwadze zwiększenie sztywności giętno – skrętnej w miejscu osadzenia stężeń.

W praktyce znanych jest wiele sposobów usztywnienia profili cienkościennych przewiązkami, przeponami bądź skratowaniem [47, 73, 88, 92, 151, 156]. Realizacja takich usztywnień może być w istniejących budynkach technicznie trudna do wykonania. W związku z tym stworzono alternatywne rozwiązanie tego typu usztywnień umożliwiające sprawny montaż w warunkach polowych. Zaproponowany sposób usztywnienia pozwala zwiększyć sztywność giętno - skrętną profili typu C w miejscu mocowania stężeń [75].

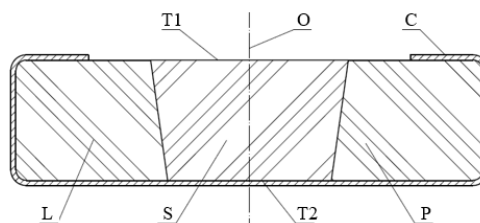
7.2.1 Opracowanie wkładki montażowej zwiększającej sztywność profilu w miejscu osadzania stężeń

Metoda naprawcza opiera się na wynalazku wykonanym w technologii druku 3D. Wynalazek został zgłoszony do Urzędu Patentowego w Polsce pod numerem P.423102 [75] i uzyskał ochronę patentową w dniu 11.02.2020 opublikowaną w dniu 30.04.2020.

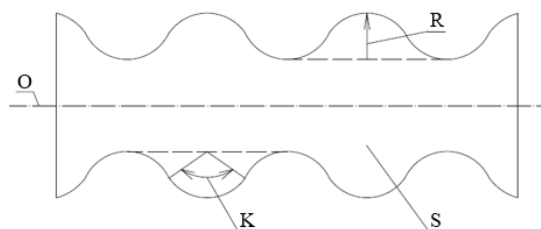
Przedmiotem opracowania była wkładka usztywniająca cienkościennie profile typu C wykorzystywane w budownictwie w lekkich konstrukcjach stalowych. Wkładka złożona jest z trzech elementów o odpowiednio dobranym kształcie, który umożliwia łatwy i pewny jej montaż w profilu (rys. 7.4). Wkładka ma szerokość i wysokość dopasowaną do zamkniętej przestrzeni wewnętrznej cienkościennego profilu C. Środkowy element S wkładki ma dwa boki usytuowane symetrycznie względem wzdłużnej osi symetrii O. Każdy z boków środkowego elementu S ma kształt fali złożonej z jednakowych łuków o kącie K równym 120° i promieniu R równym $1/4$ maksymalnej szerokości środkowego elementu S. Każdy kolejny łuk obu boków środkowego elementu S jest przedłużeniem poprzedniego. Każdy, poprowadzony w płaszczyźnie pionowej przekrój poprzeczny środkowego elementu S przedstawia równoramienny trapez o długości zewnętrznej podstawy T1 większej od długości jego wewnętrznej podstawy T2. Kształt boków PL lewego elementu L i prawego elementu P, przylegających po złożeniu do boków środkowego elementu S, jest lustrzanym odbiciem odpowiednich boków środkowego elementu S. Przeciwległe, tj. stykające się z cienkościennym profilem C, boki lewego elementu L i prawego elementu P mają kształt odpowiadający wewnętrznemu kształtowi cienkościennego profilu. Zewnętrzna podstawa T1 stanowiąca przekrój trapezu jest dłuższa od jego wewnętrznej podstawy T2 o wartość dobraną tak, że po montażu w cienkościennym profilu C wszystkie elementy L, S i P klinują się

tworząc jedną całość wypełniającą wewnętrzną przestrzeń cienkościennego profilu na całej długości wkładki.

a)



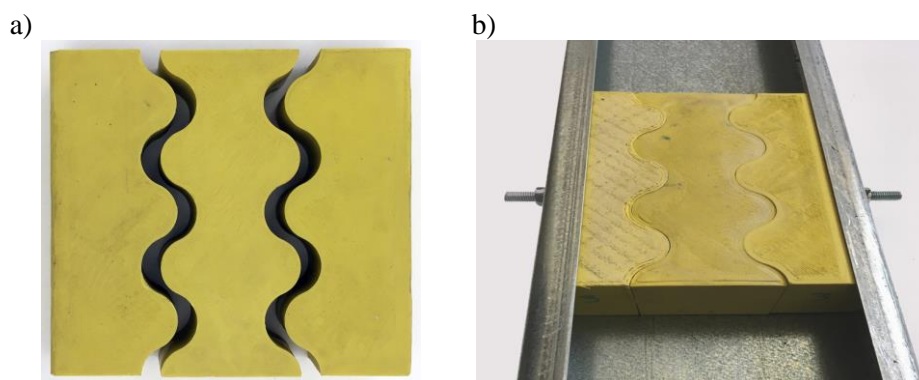
b)



Rys. 7.4. Wkładka usztywniająca cienkościennie profile typu C: a) przekrój w płaszczyźnie pionowej, b) widok z góry środkowego elementu wkładki.

Montażu wkładki w żądanym miejscu cienkościennego profilu C dokonuje się wkładając do wewnętrznej przestrzeni profilu C i dociskając do ścianek profilu C najpierw boczne elementy L i P wkładki, a następnie w przestrzeń pomiędzy nimi wciska się środkowy element S, do momentu jego zaklinowania i wypełnienia wewnętrznej przestrzeni profilu C na całej długości wkładki. Przez szerokość wkładki we wszystkich trzech częściach wykonany jest otwór pozwalający na poprowadzenie pręta gwintowanego M7 służącego do zamocowania stężeń. Średnica otworu jest o 0,5 mm mniejsza od średnicy pręta w celu lepszego scalenia łączonych elementów (rys. 7.5).

Elementy wkładki montażowej wykonane zostały na drukarce 3D (rys. 7.5). Materiałem wykorzystanym do drukowania był filament ABS. W odróżnieniu od innych filamentów (PLA, PETG) filament ABS dobrze poddaje się obróbce i można w nim bez większych problemów wiercić otwory [106, 114].



Rys. 7.5. Autorskie rozwiązanie usztywnienia ceowych stalowych profili cienkościennych: a) widok trzech elementów tworzących usztywnienie, b) widok usztywnienia w profilu cienkościennym.

ABS (akrylonitrylo-butadieno-styrenowy), jest tworzywem otrzymywanym w procesie polimeryzacji 1,3-butadienu oraz kopolimeryzacji akrylonitrylu ze styrenem wraz z jednoczesnym szczepieniem powstałego kopolimeru na polibutadienie [97, 106]. ABS charakteryzuje się dużą udarnością, twardością oraz odpornością na zarysowania. Wykazuje również zadawalającą odporność na działanie ługów, rozcieńczonych kwasów, węglowodorów alifatycznych, olejów i tłuszczów. Jest mało odporny na działanie kwasów, estrów oraz ketonów. W tabeli 7.4 przedstawiono podstawowe parametry techniczne użytego filamentu ABS.

Tabela 7.4. Parametry techniczne użytego w badaniach filamentu ABS.

| Właściwości fizyczne | Gęstość [kg/m ³] | Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] | Moduł Younga [MPa] | Współczynnik Poisson |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|
| Wartość | 1050 | 44 | 2000 | 0.38 |

7.2.2 Stężenia przegród zewnętrznych budynków

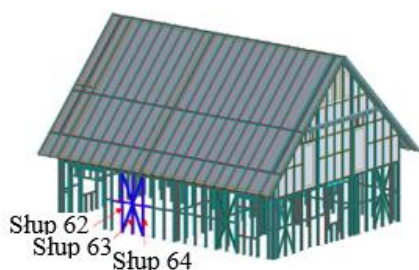
Stężenia są jednym z elementów konstrukcyjnych budynku, które w połączeniu z innymi prętowymi elementami konstrukcyjnymi zapewniają stateczność oraz sztywność przestrzenną konstrukcji [26, 67, 160, 182]. Uzyskany w ten sposób układ geometrycznie niezmienny pozwala przejąć wielokierunkowe obciążenia działające na budynek.

Konstrukcje wykonane z kształtowników walcowanych na gorąco składają się zazwyczaj w przekroju poprzecznym z podwójnie symetrycznych elementów. Przy projektowaniu konstrukcji cienkościennych najczęściej mamy do czynienia z przekrojami pojedynczo symetrycznymi. W większości przypadków efektywne

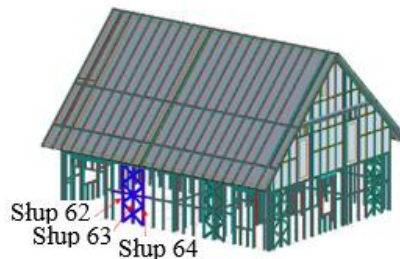
obciążenie tych przekrojów, ze względu na położenie środka ciężkości – w przypadku słupów, lub środka ścinania – w przypadku belek, jest prawie niemożliwe. W związku z tym dochodzi do nieuniknionego wtórnego skręcenia i zginania, któremu należy zapobiec stosując między innymi stężenia. Ponadto stany graniczne stateczności przy wyoboczeniu giętno - skrętnym, które są rzadkie w kształtownikach walcowanych na gorąco, są powszechnymi stanami granicznymi dla formowanych na zimno słupów stalowych konstrukcji cienkościennych. Wyoboczenie długofalowe słupów (giętno - skrętne) oraz belek (poprzecznie skrętnych) można skutecznie ograniczyć dzięki tężnikom.

Stateczność układu konstrukcyjnego musi być zapewniona w warunkach realizacji, eksploatacji oraz potencjalnych prac remontowych. W przypadku prac budowlanych wynikających z podtopienia (zalania) obiektu wodami opadowymi lub powodziowymi koniecznym może się okazać demontaż poszycia usztywniającego zewnętrzne przegrody pionowe budynku. Bazując na wynikach uzyskanych w rozdziale 7.1, w niniejszym punkcie pracy dokonano obliczeń oraz szczegółowej analizy numerycznej fragmentu przegrody zewnętrznej bez poszycia usztywniającego, zastępując jego wpływ stalowymi stężeniami ściennymi. Dodatkowo wyodrębnioną ścianę bez stężeń porównano z modelami przegrody stężonymi w postaci pojedynczego i potrójnego skrzyżowania (rys. 7.6).

a)



b)

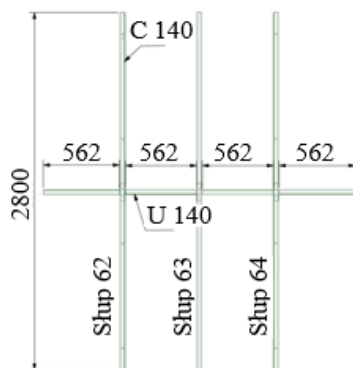


Rys. 7.6. Modele obliczeniowe konstrukcji budynku jednorodzinnego z wybranymi do analizy przemieszczeń kątowych elementami: a) budynek ze stężeniami w postaci pojedynczego skrzyżowania, b) budynek ze stężeniami w postaci potrójnego skrzyżowania.

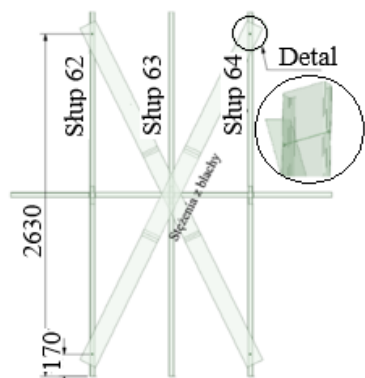
Celem analizy numerycznej było przedstawienie charakteru przemieszczeń kątowych środka profilu. Do analizy przyjęto fragment ściany wybrany na podstawie maksymalnych przemieszczeń uzyskanych z analizy stateczności bryły budynku (rozdział 7.1). Wartości odczytanych przemieszczeń węzłowych w wyselekcjonowanym fragmencie konstrukcji posłużyły jako warunki

brzegowe w dalszej analizie przeprowadzonej w programie Ansys Academic Research 2020.

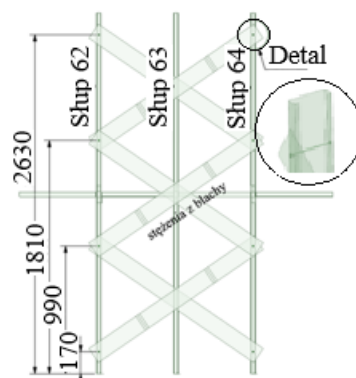
a)



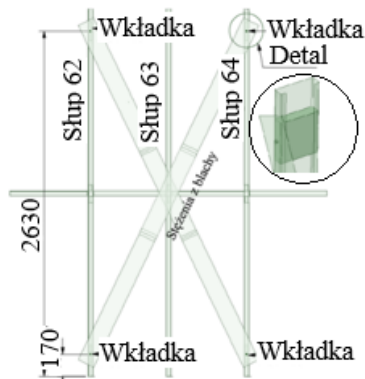
b)



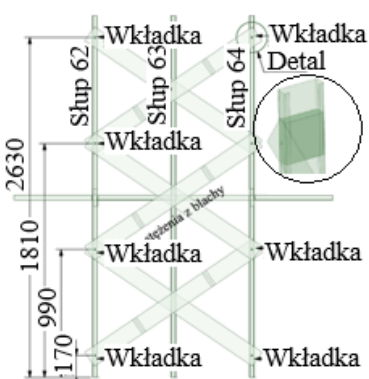
c)



d)



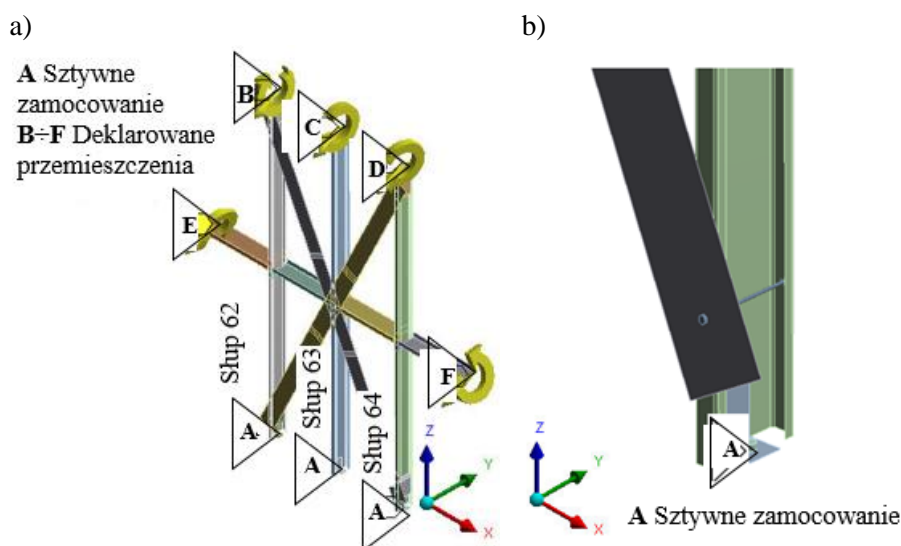
e)



Rys. 7.7. Schemat analizowanego fragmentu ściany: a) model 0 - bez stężeń, b) model 1 - ze stężeniem pojedynczym bez wkładki montażowej, c) model 2 - ze stężeniem potrójnym bez wkładki montażowej, d) model 3 - ze stężeniem pojedynczym i wkładką montażową, e) model 4 - ze stężeniem potrójnym i wkładką montażową.

Rysunek 7.7 przedstawia modele wyodrębnionej części przegrody z zastosowanym stężeniem i wkładkami montażowymi w miejscu ich połączenia. Analiza obejmowała pięć modeli opisanych odpowiednio jako: model 0 ÷ model 4. Pokazany na rysunku 7.7a schemat model 0 bez stężeń traktowany jest jako model wyjściowy (rys. 7.7a). Kolejne schematy obliczeniowe powstawały przez uzupełnienie modelu wyjściowego stężeniami i usztywnienie go opracowaną wkładką montażową w miejscu osadzania stężeń (rys. 7.7b, c, d, e).

Odwzorowanie warunków brzegowych w programie Ansys Academic Research 2020 było możliwe dzięki zadeklarowaniu odczytanych z programu Robot Structural przemieszczeń (por. [102]), w środku ciężkości przekroju poprzecznego każdego z profili (rys. 7.8a). W miejscach połączenia przegrody z fundamentem przyjęto warunki brzegowe w postaci utwierdzenia (rys. 7.8b).



Rys. 7.8. Warunki brzegowe analizowanego fragmentu ściany: a) przemieszczenia przyłożone w środku ciężkości przekroju poprzecznego profili, b) sztywne zamocowanie.

W przyjętym modelu wygenerowane zostały elementy powłokowe typu Shell181 dla elementów cienkościennych i bryłowe Solid187 dla śrub i wkładki montażowej. W obiektach powierzchniowych użyte zostały elementy powłokowe 4 węzłowe, z 6-cioma stopniami swobody w każdym elemencie. Elementy bryłowe mają natomiast po 3 stopnie swobody [5, 55, 102]. Do modelowania połączeń pomiędzy elementami konstrukcji przyjęto dwa rodzaje kontaktu. Kontakt typu Bonded oznacza, że para kontaktów nie może się rozdzielać i przesuwać, natomiast kontakt typu Frictional umożliwia rozdzielenie się kontaktów i ich wzajemny przesuw [5, 55, 77]. Przypisanie kontaktów dla poszczególnych elementów zestawiono w tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Rodzaje kontaktów dla wszystkich modeli przyjętych w analizie giętno-skrętnej fragmentu ściany.

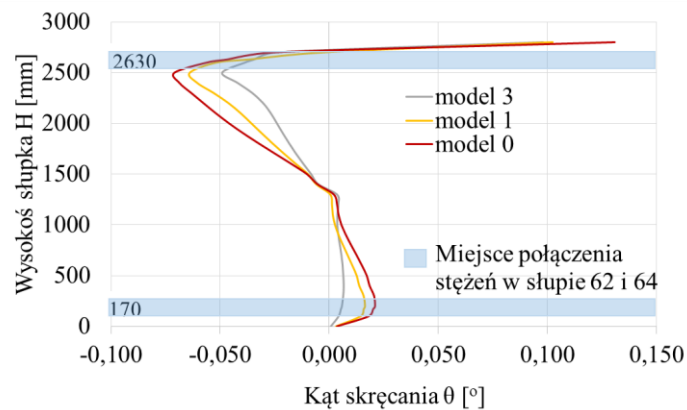
| Połączone przedmioty | Typ kontaktu |
|----------------------------|--------------|
| Profil – stężenie | Frictional |
| Profil – profil | Bonded |
| Profil – śruba | Bonded |
| | Frictional |
| Profil – wkładka montażowa | Frictional |
| Śruba – wkładka montażowa | Bonded |

Siatkę elementów skończonych generowano w trybie Multizone, opartą na elementach sześciennych. Przy tego rodzaju siatce uzyskujemy większą dokładność wyników w porównaniu z siatkami czterościnnymi [4, 17, 29, 62]. W zależności od rozpatrywanego modelu wygenerowana siatka elementów skończonych różniła się liczbą węzłów oraz elementów (tabela 7.6).

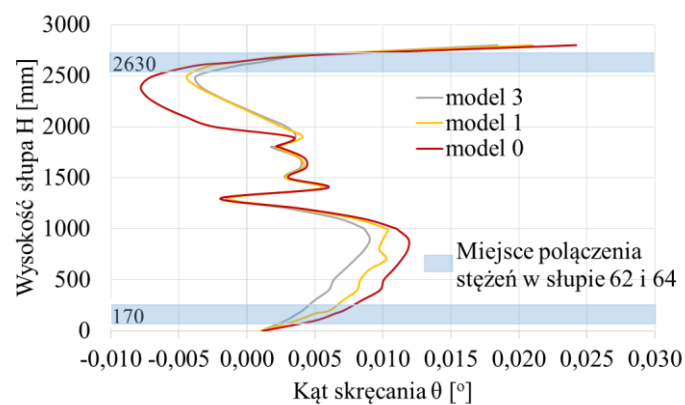
Tabela 7.6. Statystyka elementów skończonych dla analizowanych modeli.

| Model | Liczba węzłów | Liczba elementów |
|---------|---------------|------------------|
| Model 0 | 168 355 | 164 379 |
| Model 1 | 232 535 | 221 360 |
| Model 2 | 257 282 | 245 957 |
| Model 3 | 521 576 | 418 642 |
| Model 4 | 836 089 | 641 450 |

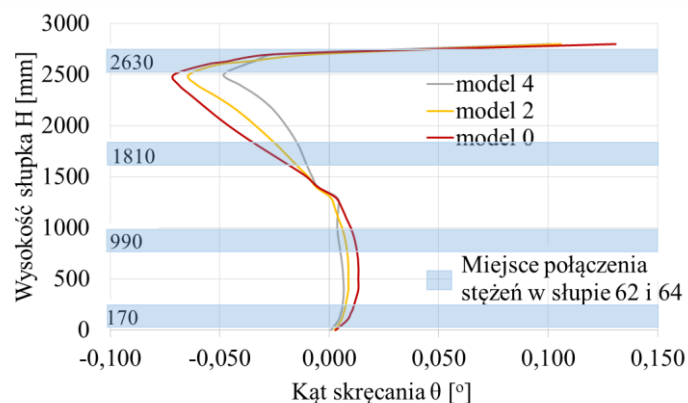
W rozpatrywanych modelach odczytano kąt skręcania na długości średnika słupków profilu o numerach 62 i 64. Do analizowanych elementów mocowane były stężenia i wkładki montażowe. Na rysunku 7.10 pokazano zmianę kąta skręcania przegrody z pojedynczym stężeniem (model 0, model 1 i model 3). Rysunek 7.9 obrazuje przebieg zmiany kąta skręcania na wysokości średnika słupka 62. Zmianę przemieszczeń kątowych dla słupka 64 przedstawia rysunek 7.10. Kolejne rysunki (7.11 i 7.12) pokazują otrzymane wyniki dla przemieszczeń kątowych w przypadku zastąpienia pojedynczego stężenia, stężeniem potrójnym (model 2 i model 4). Niebieskie pasy na rysunkach 7.9 ÷ 7.12 i tabelach 7.7 ÷ 7.10 wyznaczają miejsca mocowania stężeń i umiejscowienia wkładek montażowych.



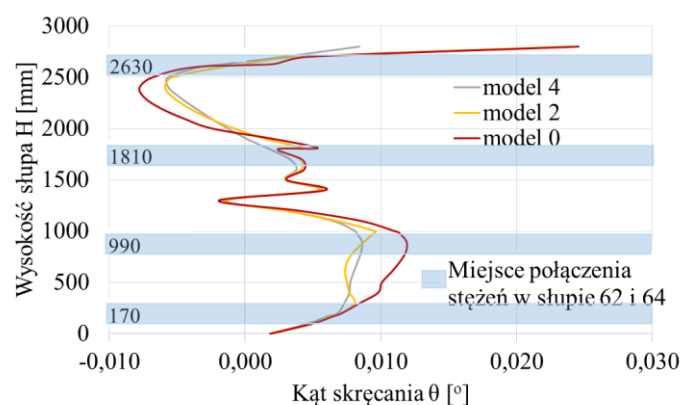
Rys. 7.9. Przebieg zmienności kąta skręcania na długości średnika słupka ściennego przegrody z pojedynczym stężeniem - słupek 62.



Rys. 7.10. Przebieg zmienności kąta skręcania na długości średnika słupka ściennego przegrody z pojedynczym stężeniem - słupek 64.



Rys. 7.11. Przebieg zmienności kąta skręcania na długości średnika słupka ściennego przegrody z potrójnym stężeniem - słupek 62.



Rys. 7.12. Przebieg zmienności kąta skręcania na długości średnika słupka ściennego przegrody z potrójnym stężeniem - słupek 64.

Wyniki przeprowadzonej analizy pokazują wpływ stężeń i wkładek montażowych na przebieg zmienności kąta skręcania. W obu przypadkach zastosowanych schematów stężeń widoczny jest efekt zmniejszenia przemieszczeń kątowych w stosunku do przemieszczeń dla schematu wyjściowego. Dodatkowe wzmocnienie w miejscu łączenia stężeń z profilami powoduje zwiększenie sztywności skrętnej. Zaobserwować to można na rys. 7.9 i 7.10. W tabelach 7.7 ÷ 7.10 przedstawiono porównanie procentowe kątów skręcania model 1 ÷ model 4 z wynikami wyjściowego modelu 0. Poza wzmocnieniem ściany stężeniem i wkładkami dodatkową skuteczność na zmniejszenie przemieszczeń kątowych uzyskano dla modeli z potrójnym stężeniem, tj. model 2 i model 4.

Tabela 7.7. Wartości kąta skręcania θ [°] odczytane na wysokości średnika słupa 62 dla modelu 0 oraz ich procentowe porównanie Δ [%] z wynikami dla modelu 1 i modelu 3.

| Wysokość [mm] | model 0 θ [°] | model 1 Δ [%] | model 3 Δ [%] |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 0,000717 | 11,228978 | 79,388817 |
| 170 | 0,005349 | 21,493992 | 73,430909 |
| 300 | 0,006395 | 23,302471 | 68,891068 |
| 900 | 0,004160 | 43,808951 | 45,549319 |
| 1000 | 0,003671 | 52,973529 | 34,228469 |
| 1200 | 0,004193 | 64,579210 | -17,040190 |
| 1400 | -0,004992 | -10,700451 | 6,589068 |
| 1900 | -0,039234 | 21,458569 | 45,996834 |
| 2100 | -0,051974 | 21,953284 | 48,474237 |
| 2300 | -0,063264 | 16,232682 | 44,193893 |
| 2500 | -0,070933 | 9,908362 | 30,807624 |
| 2630 | -0,046749 | 21,182539 | 26,452435 |
| 2800 | 0,130860 | 21,725508 | 25,128381 |

Tabela 7.8. Wartości kąta skręcania θ [°] odczytane na wysokości średnika słupa 64 dla modelu 0 oraz ich procentowe porównanie Δ [%] z wynikami dla modelu 1 i modelu 3.

| Wysokość [mm] | model 0 θ [°] | model 1 Δ [%] | model 3 Δ [%] |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 0,001159 | 13,672360 | 12,948585 |
| 170 | 0,006476 | 22,809040 | 42,539470 |
| 300 | 0,008457 | 16,431152 | 41,110225 |
| 900 | 0,011877 | 15,620920 | 23,838473 |
| 1000 | 0,011030 | 6,549525 | 21,540900 |
| 1200 | 0,003963 | 5,517872 | 23,335774 |
| 1400 | 0,005902 | 7,759818 | 2,854868 |
| 1900 | 0,003378 | -20,963858 | -6,083181 |
| 2100 | -0,004548 | 121,203052 | 126,495294 |
| 2300 | -0,007404 | 69,296193 | 70,835519 |
| 2500 | -0,006834 | 35,768460 | 46,111177 |
| 2630 | -0,001238 | 30,417938 | 169,764367 |
| 2800 | 0,024223 | 13,247740 | 24,011477 |

Tabela 7.9. Wartości kąta skręcania θ [°] odczytane na wysokości średnicy słupa 62 dla modelu 0 oraz ich procentowe porównanie Δ [%] z wynikami dla modelu 2 i modelu 4.

| Wysokość słupa [mm] | model 0 θ [°] | model 2 Δ [%] | model 4 Δ [%] |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 0,002848 | 16,047606 | 74,829378 |
| 170 | 0,009969 | 33,585479 | 46,346711 |
| 300 | 0,012095 | 33,928113 | 47,122411 |
| 900 | 0,011462 | 37,379910 | 63,704239 |
| 990 | 0,010113 | 40,041336 | 63,219043 |
| 1000 | 0,009963 | 40,381550 | 63,157020 |
| 1800 | -0,032105 | 27,380295 | 57,018658 |
| 1810 | -0,032818 | 27,430051 | 57,118831 |
| 1900 | -0,039234 | 27,796485 | 57,856574 |
| 2500 | -0,070933 | 9,648989 | 32,001302 |
| 2630 | -0,046749 | 20,334677 | 26,839265 |
| 2800 | 0,130860 | 19,119670 | 22,711295 |

Tabela 7.10. Wartości kąta skręcania θ [°] odczytane na wysokości średnicy słupa 64 dla modelu 0 oraz ich procentowe porównanie Δ [%] z wynikami dla modelu 2 i modelu 4.

| Wysokość słupa [mm] | model 0 θ [°] | model 2 Δ [%] | model 4 Δ [%] |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 0,000816 | -9,013613 | -3,820653 |
| 170 | 0,006476 | 3,722521 | 6,399180 |
| 300 | 0,008457 | 4,473609 | 13,616091 |
| 900 | 0,011877 | 25,982468 | 27,611339 |
| 990 | 0,011284 | 15,353377 | 27,625138 |
| 1000 | 0,011030 | 12,637333 | 26,391835 |
| 1800 | 0,002408 | 1,687551 | 24,792691 |
| 1810 | 0,000737 | 20,656840 | 69,421734 |
| 1900 | 0,000021 | 27,714262 | 94,182502 |
| 2500 | -0,006834 | 21,030947 | 16,827516 |
| 2630 | 0,002100 | 100,193250 | 171,823374 |
| 2800 | 0,008407 | 2,573290 | 65,770765 |

8. ANALIZA NUMERYCZNO - DOŚWIADCZALNA WSTĘPNYCH PRZEMIESZCZEŃ GIĘTNO –SKRĘTNYCH NA NOŚNOŚĆ CIENKOŚCIENNYCH PROFILI STALOWYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań doświadczalno – numerycznych cienkościennych profili typu C poddanych nieswobodnemu skręcaniu. Badaniom poddano pręty nieusztywnione i usztywnione podłużnie [47, 151] za pomocą autorskiego rozwiązania wkładki montażowej. Autorskie rozwiązanie technologii wzmocnienia podłużnego profili cienkościennych opisano w rozdziale 7.2.1.

W oparciu o badania eksperymentalne utworzono model numeryczny w programie Ansys 20 Academic Researcher [4, 148], który umożliwia przeprowadzenie poprawnej analizy numerycznej, opartej na metodzie elementów skończonych. Opracowując model numeryczny zwrócono szczególną uwagę na podział współpracujących ze sobą elementów w obszarze ich kontaktu. Porównanie wyników eksperymentalnych i analizy numerycznej polegało na zestawieniu przemieszczeń pionowych i kątowych w wybranych przekrojach analizowanego profilu. Zarówno badania eksperymentalne jak również obliczenia numeryczne przeprowadzone na potrzeby patentu [101, 117] wykazały skuteczność zastosowanego autorskiego usztywnienia zimmogiętego profilu ceowego.

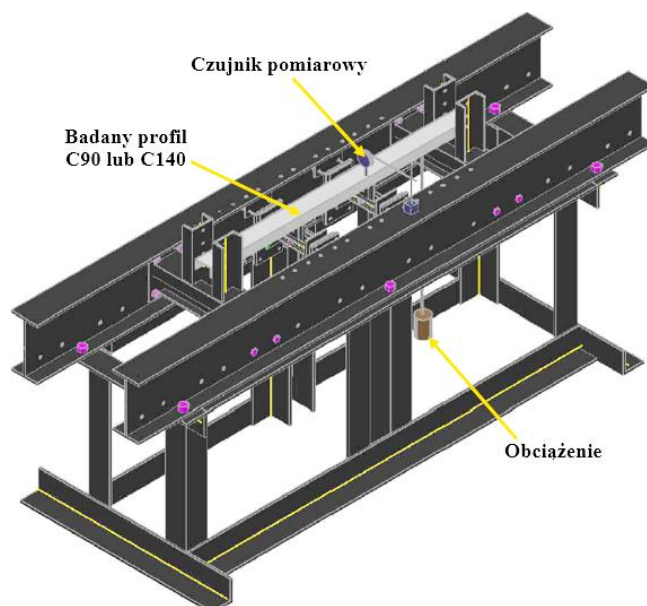
8.1 ANALIZA DOŚWIADCZALNA

Badania eksperymentalne profili cienkościennych obejmowały pomiar przemieszczeń pionowych według następującego programu badań:

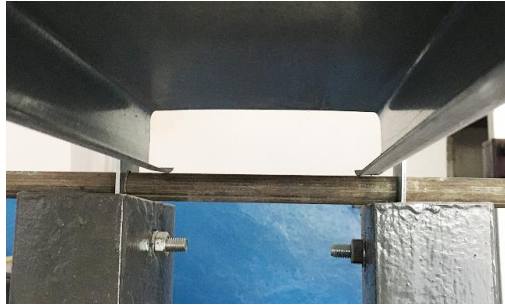
- obciążenie dwoma siłami skupionymi profilu bez usztywnień zgodnie z rys. 8.6,
- obciążenie dwoma siłami skupionymi profilu z dwoma usztywnieniami, zgodnie z rys. 8.7,
- obciążenie jedną siłą skupioną, profil bez usztywnień, zgodnie z rys. 8.8,
- obciążenie jedną siłą skupioną, profil z dwoma usztywnieniami, zgodnie z rys. 8.9,
- obciążenie dwoma siłami skupionymi, profil bez usztywnień i z płytą OSB, zgodnie z rys. 8.10,
- obciążenie dwoma siłami skupionymi, profil z dwoma usztywnieniami i z płytą OSB, zgodnie z rys. 8.11,
- obciążenie jedną siłą skupioną, profil bez usztywnień i z płytą OSB, zgodnie z rys. 8.12,
- obciążenie jedną siłą skupioną, profil z dwoma usztywnieniami i z płytą OSB, zgodnie z rys. 8.13.

8.1.1 Opis stanowiska badawczego

Badania doświadczalne wykonywane były w Laboratorium Katedry Konstrukcji Metalowych i Materiałów Budowlanych Wydziału Budownictwa Politechniki Częstochowskiej. Realizacja założonego programu badań, wymagała przygotowania stanowiska badawczego, do budowy którego użyto profili walcowanych na gorąco ze stali S235, które skręcono śrubami M14 (rys. 8.1). Przygotowane stanowisko badawcze umożliwiło pomiar przemieszczeń pionowych profili cienkościennych z chwilą ich obciążenia. Wymiary gabarytowe konstrukcji stanowiska to: 75 cm x 300 cm x 120 cm. Całość przytwierdzono do posadzki betonowej za pomocą kotew wklejanych. Badane modele z ceowych profili cienkościennych C90 i C140 oparto widełkowo na stalowych prętach o średnicy 20 mm. Pręty przepuszczono przez blachę stalową zamocowaną śrubami do ceowników stanowiących część stanowiska badawczego (rys. 8.2).



Rys. 8.1. Model stanowiska do badań przemieszczeń giętno – skrętnych cienkościennych, stalowych profili ceowych.



Rys. 8.2. Sposób podparcia belki cienkościennej typu C140.

Do badań doświadczalnych przyjęto profile cienkościenne C90 i C140 wykonane z blachy stalowej ocynkowanej o granicy plastyczności $f_{yb} = 235$ MPa i wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 360$ MPa. Wymiary nominalne i rzeczywiste dla analizowanych profili zestawiono w tabeli 8.1 i tabeli 8.2.

Tabela 8.1. Wymiary nominalne i rzeczywiste dla analizowanych profili C90.

| | Wymiary przekroju profilu C90 | Wymiary nominalne | Wymiary rzeczywiste |
|---|-------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | [mm] | |
| a | | 90 | 88 |
| b | | 38 | 39 / 41,7 |
| s | | 19 | 16,6 / 17,2 |
| t | | 1.5 | 1.5 |
| r | | 3 | 3 |

Tabela 8.2. Wymiary nominalne i rzeczywiste dla analizowanych profili C140.

| | Wymiary przekroju profilu C140 | Wymiary nominalne | Wymiary rzeczywiste |
|---|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | [mm] | |
| a | | 140 | 140 |
| b | | 38 | 37,9 |
| s | | 18 | 17,5 |
| t | | 1.5 | 1,5 |
| r | | 3 | 3 |

Profile obciążano przy pomocy odważników 5, 10 i 20 kg mocowanych do profili. W celu podwieszenia odważników do półek badanych profili użyto łańcucha stalowego o wadze 0,6 kg. W przekrojach poprzecznych na półkach badanych profili zostały wywiercone otwory w celu poprowadzenia pręta gwintowanego o średnicy 7 mm (rys. 8.4), który umożliwiał zawieszenie obciążenia oraz stanowił element mocujący wkładkę montażową. Sposób obciążenia prętów przedstawiono na rys. 8.3a, na którym widać element do podwieszania obciążenia (haczyk). Opracowane stanowisko badawcze nie ograniczało możliwości oceny wpływu stężeń pracujących w płaszczyźnie pionowej przegrody zewnętrznej.

W przypadku każdego schematu badawczego (rys. 8.8 ÷ 8.13) wykonano jeden cykl pomiarowy, obejmujący obciążenie siłami: 54,94, 103,99 i 202,09 N. Każdy z przyjętych modeli badawczych badany był trzykrotnie, a wyniki uśrednione. Do pomiaru ugięć belki użyto zegarowych czujników przemieszczeń zamocowanych na podstawkach magnetycznych (rys. 8.3). Użyto czujników firmy Predom-Termet, których zakres pomiarowy wynosi 0÷10 mm z dokładnością 0,01 mm.

a)

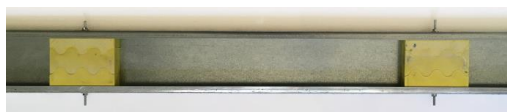


b)



Rys. 8.3. Widok ogólny stanowiska badawczego: a) profil C140 z widocznym haczykiem do podwieszania obciążenia b) ułożenie zegarowych czujników pomiarowych na badanym profilu cienkościennym C140.

Badania obejmowały pomiar przemieszczeń pionowych kształtowników niestężonych podłużnie oraz stężonych podłużnie wkładkami montażowymi (rys. 8.4). Dodatkowo wykonano badania z uwzględnieniem poszycia z płyty OSB na jednej z półek ceownika (rys. 8.5). Długość całkowita badanych profil wynosi $L_c = 2500$ mm, a odległość między podporami $L_o = 2350$ mm.

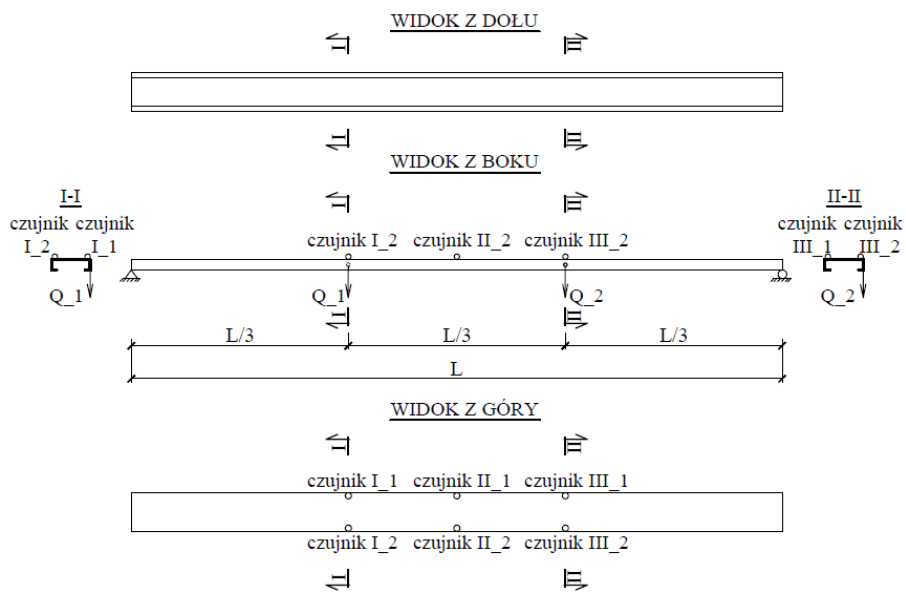


Rys. 8.4. Profil cienkościenny C140 z dwoma usztywnieniami podłużnymi autorską wkładką montażową.

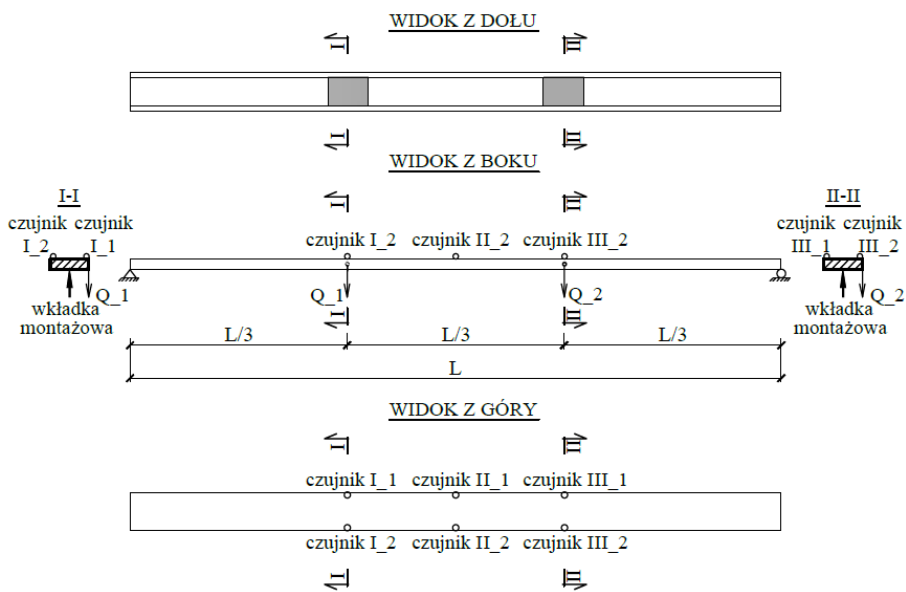


Rys. 8.5. Widok ogólny stanowiska badawczego dla oceny przemieszczeń pionowych profilu C140 z uwzględnieniem poszycia płytą OSB oraz widocznym ułożeniem czujników pomiarowych.

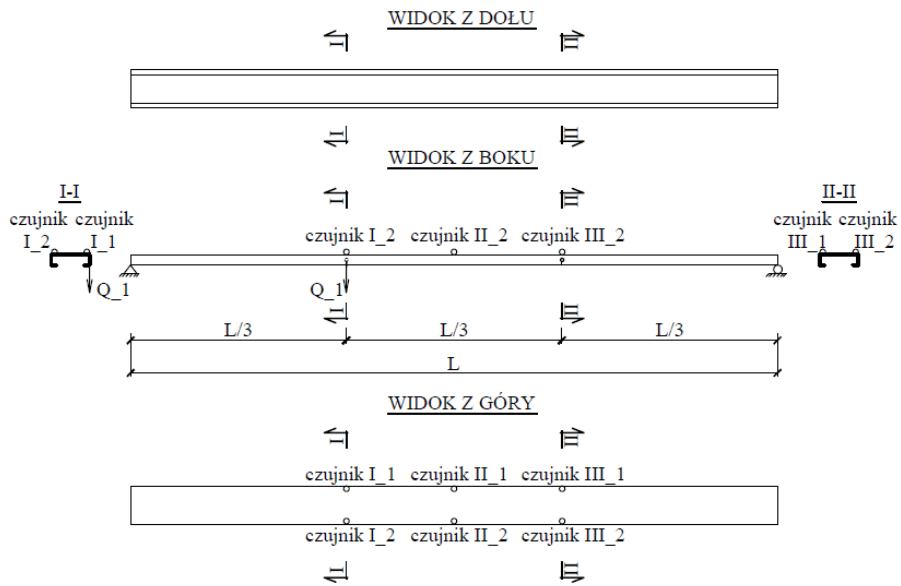
Badana obejmowały modele: model C90_I ÷ model C90_VIII oraz model C140_I ÷ model C140_VIII. Modele I÷IV były modelami bez usztywnienia płytą OSB. Modele I i III wykonano bez wkładek usztywniających, natomiast modele II i IV powstały przez dodanie autorskich wkładek usztywniających. Model II usztywniony został dwoma wkładkami a model III jedną. Oprócz usztywnień dodatkowo modele I i II różniły się od modeli III i IV sposobem obciążenia. W modelach I i II obciążenie przyłożone było na dwóch przeciwległych półkach ceownika (rys. 8.6 i rys. 8.7). Natomiast modele III i IV obciążano na jednej półce (rys. 8.8 i rys. 8.9).



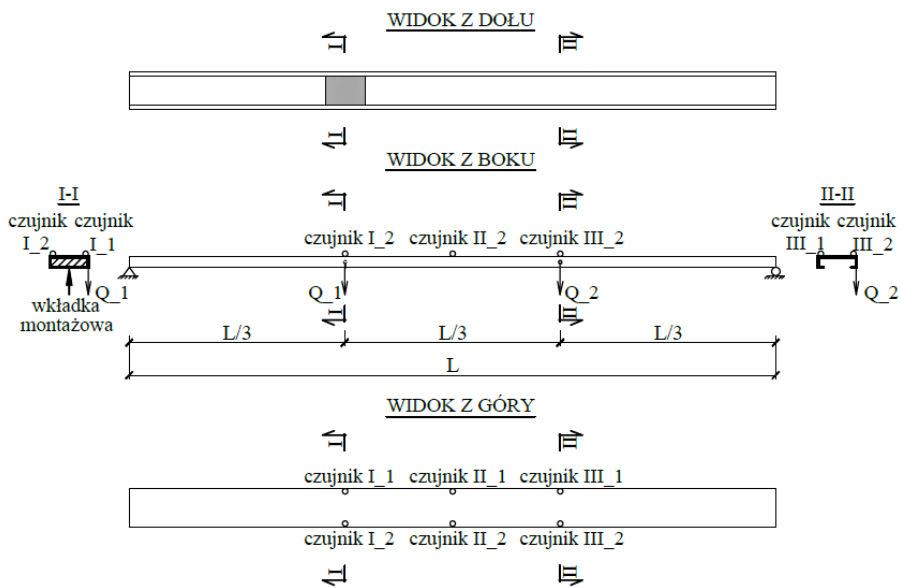
Rys. 8.6. Schematy badanych profili z rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z dwoma obciążeniami bez usztywnień. Modele opisane jako model C90_I i model C140_I.



Rys. 8.7. Schemat badanych profili z rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z dwoma obciążeniami i usztywnieniami zamontowanymi w miejscu przyłożenia sił. Modele opisane jako model C90_II i model C140_II.

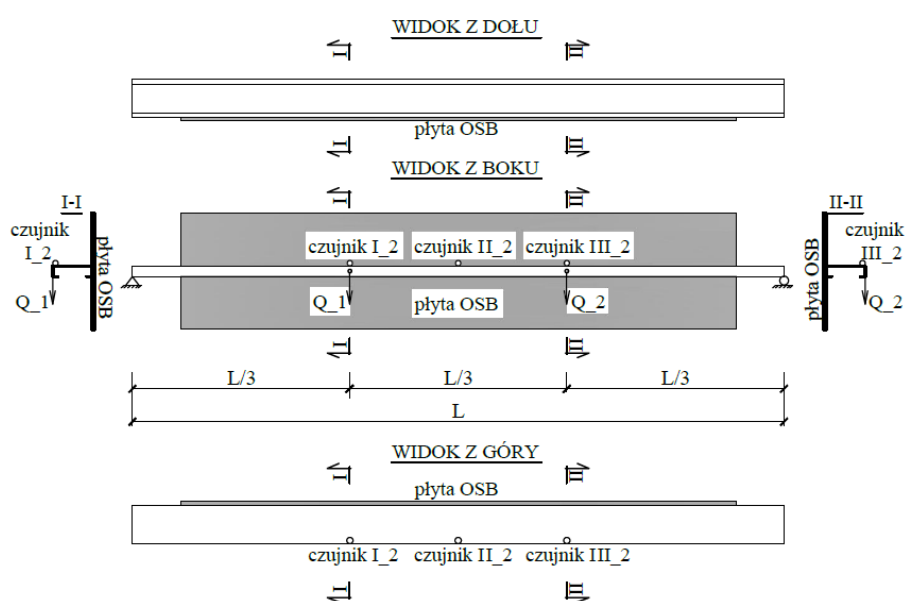


Rys. 8.8. Schemat badanych profili z rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z jednym obciążeniem i bez usztywnienia. Modele opisane jako model C90_III i model C140_III.

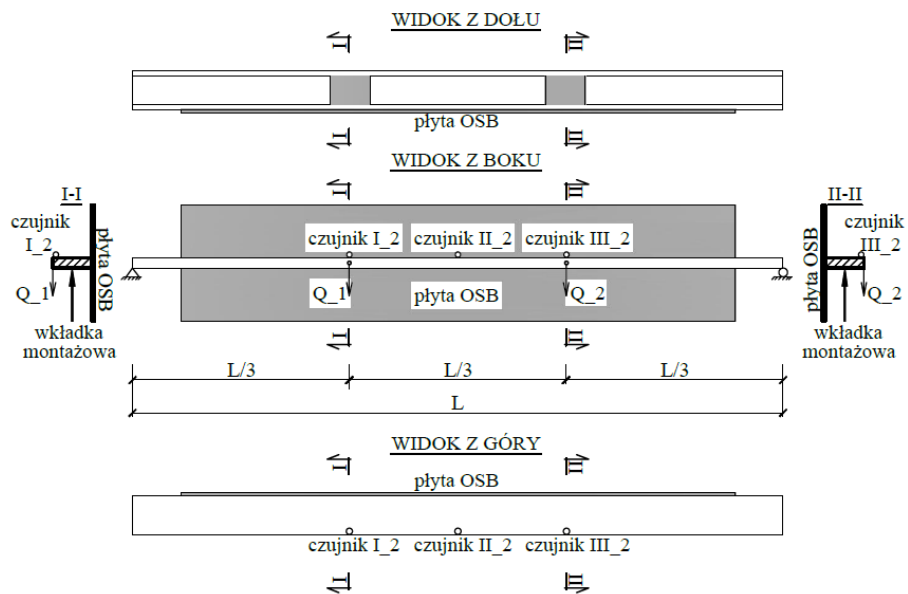


Rys. 8.9. Schemat badanych profili z rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z jednym obciążeniem i usztywnieniem zamontowanym w miejscu przyłożenia siły. Modele opisane jako model C90_IV i model C140_IV.

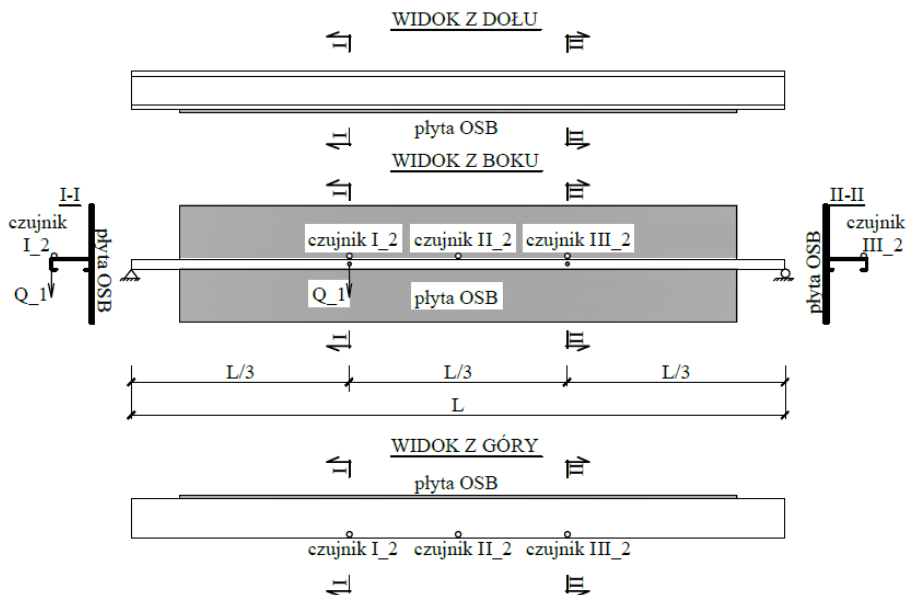
Do kolejnych modeli, tj. V i VIII zamocowano płytę OSB o wymiarach 600 mm na 2200 mm i grubości 12 mm (rys. 8.5). Płytę umiejscowiono symetrycznie na jednej z półek profilu i przymocowano wkrętami samowierzącymi w rozstawie co 30 cm z zachowaniem 1,5 cm odstępu od krawędzi płyty. Modele V i VII są modelami bez usztywnień, natomiast modele VI i VII wzmocniono autorskimi wkładkami montażowymi. Dodatkowo w modelu V i VI profile obciążono dwoma siłami na jednej półce (rys. 8.10 i rys. 8.11). Według schematów przedstawionych na rys. 8.12 i 8.13 modele VII i VIII obciążono jedną siłą.



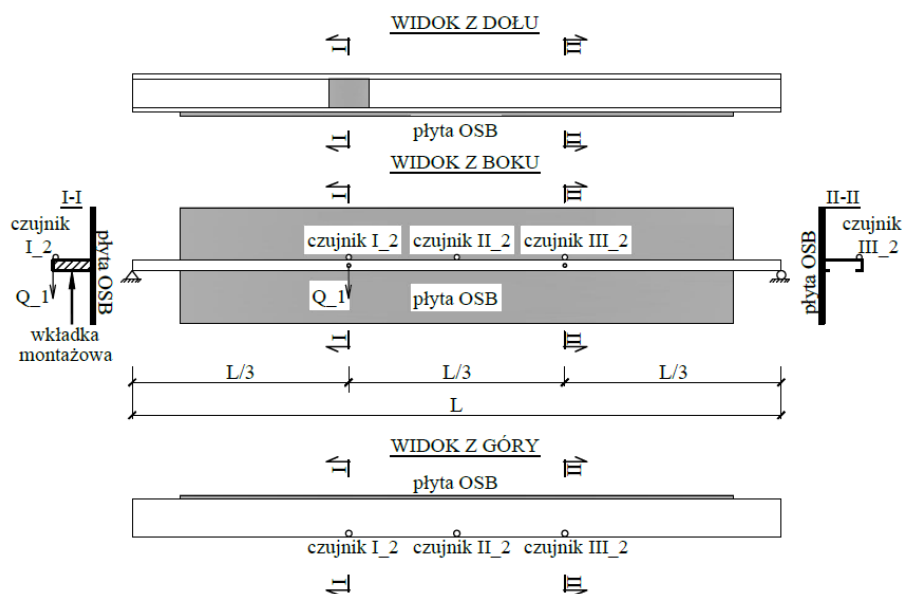
Rys. 8.10. Schemat badanych profili z płytą OSB i rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z dwoma obciążeniami bez usztywnień. Modele opisane jako model C90_V i model C140_V.



Rys. 8.11. Schemat badanych profili z płytą OSB i rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z dwoma obciążeniami i usztywnieniami zamontowanymi w miejscach przyłożenia sił. Modele opisane jako model C90_VI i model C140_VI.



Rys. 8.12. Schemat badanych profili z płytą OSB i rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z jednym obciążeniem i bez usztywnień. Modele opisane jako model C90_VII i model C140_VII.



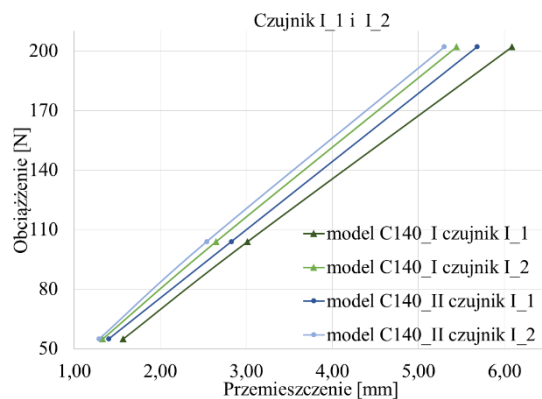
Rys. 8.13. Schemat badanych profili z płytą OSB i rozmieszczeniem czujników zegarowych. Profil z jednym obciążeniem i usztywnieniem zamontowanym w miejscu przyłożenia siły. Modele opisane jako model C90_VIII i model C140_VIII.

8.1.2 Przebieg wykonywanych badań

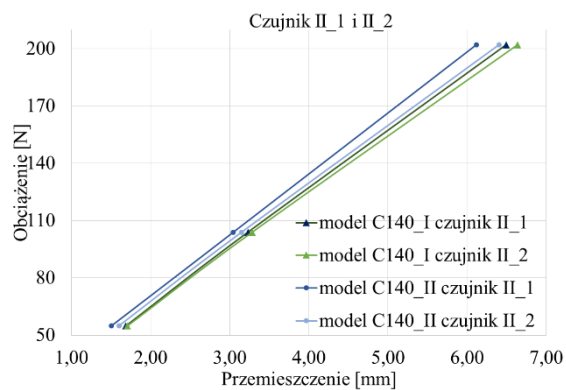
Dla każdego schematu (rys. 8.6 ÷ 8.13) zaplanowano wykonanie jednego cyklu pomiarowego, obejmującego obciążenie siłami skupionymi wynoszącymi odpowiednio: 54,94, 103,99 i 202,09 N. Każdy cykl pomiarowy składał się z pięciu serii, w trakcie których dokonywano odczytu wartości przemieszczeń pionowych, co umożliwiło sporządzenie zależności obciążenie – przemieszczenie. Zależności te dla profili C140 przedstawiono na rysunkach 8.14÷8.17. Rysunek 8.14 przedstawia wyniki dla przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C140_I) i profili z usztywnieniem (model C140_II). Wyniki badań dla profili obciążonych jedną siłą (model C140_III) i profili z wkładką montażową (model C140_IV) pokazano na rysunku 8.15. Model C140_V i model C140_VI zostały usztywnione płytą OSB i obciążone dwoma siłami oraz wzmocnione wkładką usztywniającą w miejscu przyłożenia siły - rysunek 8.16. Na rysunku 8.17 przedstawiono natomiast wyniki przemieszczeń pionowych dla modeli C140_VII i C140_VIII.

Wykresy zależności obciążenie – przemieszczenie dla profilu C90 zamieszczono w załączniku 2.

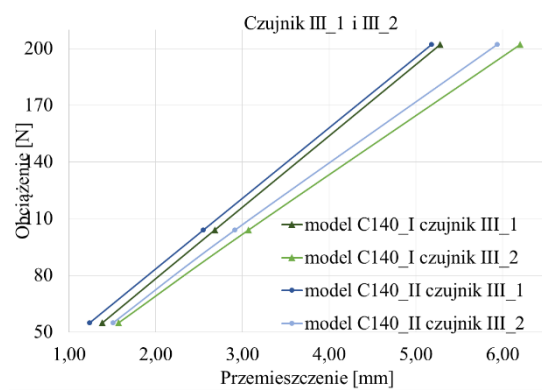
a)



b)

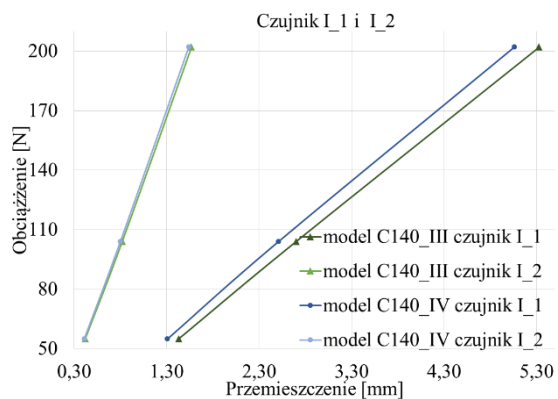


c)

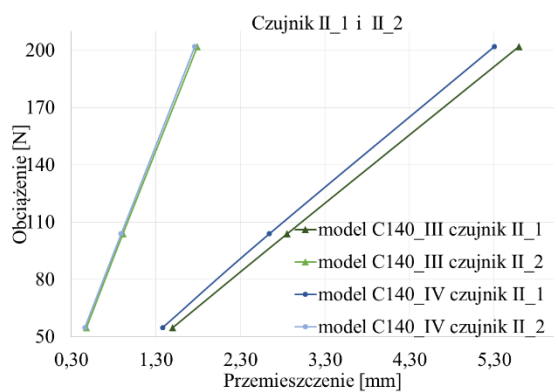


Rys. 8.14. Zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez wprowadzonych usztywnień (model C140_I) i profili z usztywnieniem (model C140_II), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

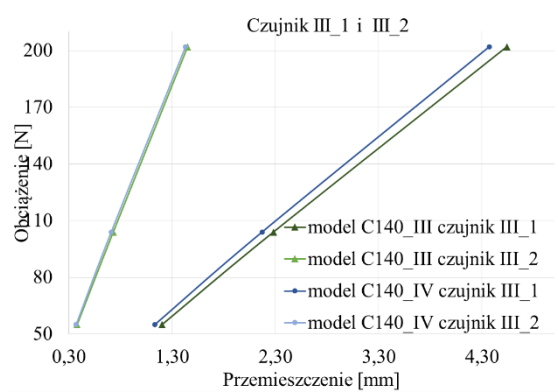
a)



b)

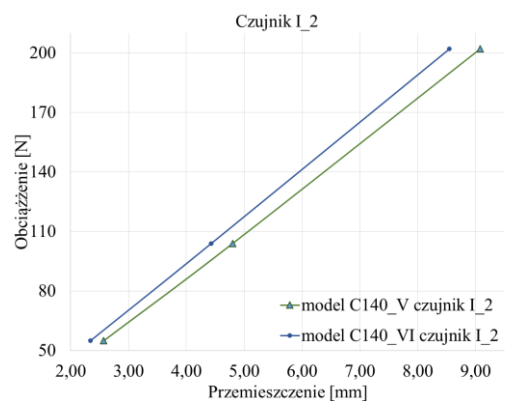


c)

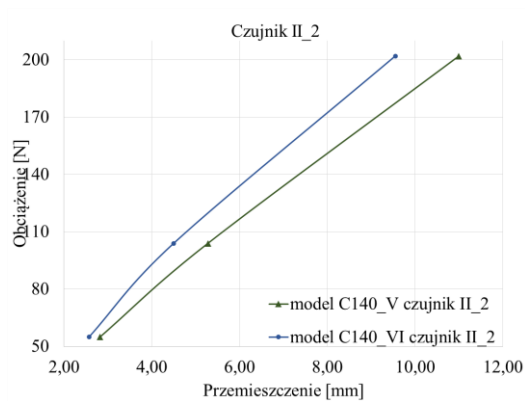


Rys. 8.15. Zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez wprowadzonych usztywnień (model C140_III) i profili z usztywnieniem (model C140_IV), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

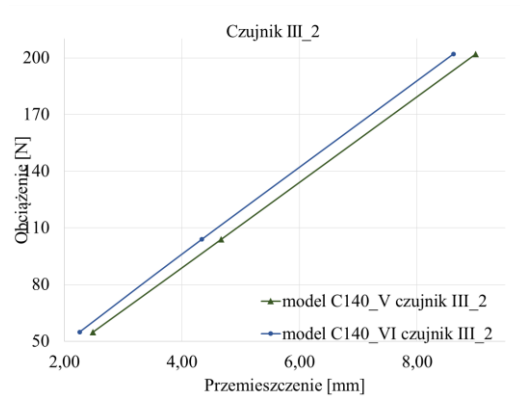
a)



b)

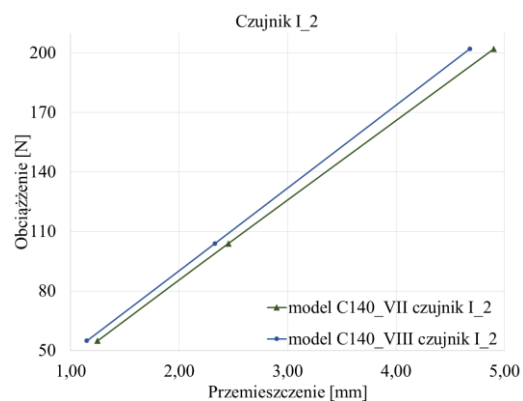


c)

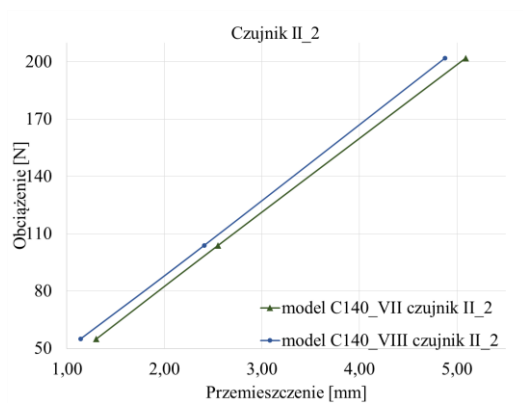


Rys. 8.16. Zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez wprowadzonych usztywnień (model C140_V) i profili z usztywnieniem (model C140_VI), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

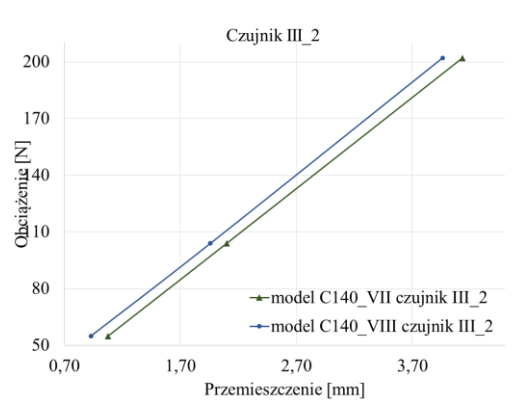
a)



b)



c)



Rys. 8.17. Zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez wprowadzonych usztywnień (model C140_VII) i profili z usztywnieniem (model C140_VIII), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

8.1.3 Analiza otrzymanych wyników

Wyniki badań modeli nieusztywnionych porównano z wynikami badań modeli wzmocnionych wkładką usztywniającą autorskiego opracowania. Przeprowadzone badania umożliwiły ocenę wpływu usztywnień podłużnych na przemieszczenia pionowe i kąt skręcania. Opracowany sposób usztywnienia podłużnego w przeprowadzonych badaniach wykazał zwiększoną sztywność giętno – skrętną dla wszystkich badanych modeli.

Poniżej przedstawiono analizę dla badanych modeli wykonanych na profilach C140. Rezultaty przeprowadzonych badań na profilach C90 zamieszczono w załączniku 2.

W tabelach 8.3 i 8.4 zestawiono wyniki badań dla modeli bez płyty OSB (model C140_I ÷ model C140_IV). Wyniki przedstawiają procentowe różnice w rezultatach przemieszczeń pionowych uzyskanych pomiędzy profilem bez usztywnienia a profilem z usztywnieniem. Porównując modele C140_I z C140_II i C140_III z C140_IV zauważono istotny wpływ podłużnego usztywnienia wkładką montażową, we wszystkich punktach pomiarowych. W przypadku modeli C140_I i C140_II otrzymano różnice sięgające 10,83% dla obciążenia równego 54,94 N, 6,30% w przypadku siły 103,99 N i 6,70% dla obciążenia 202,09 N (tabela 8.3). Wpływ zastosowanego usztywnienia w pozostałych modelach obliczeniowych C140_III i C140_IV również wykazał zwiększenie sztywności giętnej (tabela 8.4).

Analizując modele obliczeniowe (model C140_I i model C140_II) w wybranych przekrojach pomiarowych zaobserwowano brak jednoznacznej zgodności w rozkładzie przemieszczeń pionowych (tabela 8.3). Spowodowane było to między innymi odchyłkami w wykonaniu badanych kształtowników C90 i C140.

Podczas badań we wszystkich modelach zaobserwowano powrót profili do stanu pierwotnego z chwilą ich odciążenia, co świadczyło o sprężystym zachowaniu się badanych elementów przy zadawanych wartościach obciążenia.

Tabela 8.3. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_I) i modelu z usztywnieniem (model C140_II), dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_I | model C140_II | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,57 | 1,40 | 10,83 |
| | I_2 | 1,33 | 1,29 | 3,15 |
| | II_1 | 1,69 | 1,51 | 10,77 |
| | II_2 | 1,71 | 1,60 | 6,43 |
| | III_1 | 1,39 | 1,24 | 10,53 |
| | III_2 | 1,57 | 1,51 | 4,07 |
| 103,99 | I_1 | 3,02 | 2,83 | 6,30 |
| | I_2 | 2,65 | 2,54 | 4,15 |
| | II_1 | 3,23 | 3,05 | 5,69 |
| | II_2 | 3,29 | 3,15 | 4,08 |
| | III_1 | 2,68 | 2,55 | 4,85 |
| | III_2 | 3,07 | 2,91 | 5,08 |
| 202,09 | I_1 | 6,09 | 5,68 | 6,70 |
| | I_2 | 5,44 | 5,30 | 2,65 |
| | II_1 | 6,49 | 6,12 | 5,79 |
| | II_2 | 6,64 | 6,40 | 3,53 |
| | III_1 | 5,28 | 5,18 | 1,89 |
| | III_2 | 6,20 | 5,94 | 4,29 |

Tabela 8.4. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_III) i modelu z usztywnieniem (model C140_IV), dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_III | model C140_IV | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,43 | 1,31 | 8,39 |
| | I_2 | 0,42 | 0,41 | 2,38 |
| | II_1 | 1,50 | 1,38 | 8,00 |
| | II_2 | 0,48 | 0,46 | 4,17 |
| | III_1 | 1,20 | 1,13 | 5,83 |
| | III_2 | 0,38 | 0,37 | 2,63 |
| 103,99 | I_1 | 2,70 | 2,51 | 7,04 |
| | I_2 | 0,82 | 0,8 | 2,44 |
| | II_1 | 2,85 | 2,64 | 7,37 |
| | II_2 | 0,91 | 0,89 | 2,20 |
| | III_1 | 2,28 | 2,17 | 4,82 |
| | III_2 | 0,73 | 0,71 | 2,74 |
| 202,09 | I_1 | 5,33 | 5,06 | 5,07 |
| | I_2 | 1,57 | 1,54 | 1,91 |
| | II_1 | 5,59 | 5,3 | 5,19 |
| | II_2 | 1,79 | 1,76 | 1,68 |
| | III_1 | 4,54 | 4,37 | 3,74 |
| | III_2 | 1,45 | 1,43 | 1,38 |

Rezultaty połączenia płyty OSB z profilem C 140 zestawiono w tabelach 8.5 i 8.6 (wyniki dla profili C90 zestawiono w załączniku 2). Kolejne analizowane modele obliczeniowe (model V ÷ model VIII) uzyskane przez dodanie płyty OSB (zgodnie z 8.1.1 – rys. 8.5), wykazały się zwiększoną sztywnością giętno-skrętną. Z chwilą ich usztywnienia wkładką montażową zaobserwowano dalszą poprawę sztywności nieswobodnego skręcania.

Podobnie jak w modelach bez płyty OSB (model I i model II) w przypadku równomiernego rozłożenia obciążenia (model V i model VI) zaburzenia w wynikach otrzymanych przemieszczeń pionowych wynikają z imperfekcji geometrycznej przekroju (rys. 8.16 b).

Tabela 8.5. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_V) i modelu z usztywnieniem (model C140_VI) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| | | model C140_V | model C140_VI | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 2,57 | 2,34 | 8,9 |
| | II_2 | 2,82 | 2,57 | 8,9 |
| | III_2 | 2,49 | 2,26 | 9,2 |
| 103,99 | I_2 | 4,80 | 4,43 | 7,7 |
| | II_2 | 5,28 | 4,50 | 14,8 |
| | III_2 | 4,67 | 4,34 | 7,1 |
| 202,09 | I_2 | 9,08 | 8,55 | 5,8 |
| | II_2 | 11,00 | 9,55 | 13,2 |
| | III_2 | 9,00 | 8,62 | 4,2 |

Tabela 8.6. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_VII) i modelu z usztywnieniem (model C140_VIII) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | model C140_VII | model C140_VIII | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 1,08 | 0,93 | 7,85 |
| | II_2 | 1,30 | 1,14 | 12,44 |
| | III_2 | 1,25 | 1,15 | 13,73 |
| 103,99 | I_2 | 2,45 | 2,33 | 5,05 |
| | II_2 | 2,55 | 2,41 | 5,56 |
| | III_2 | 2,10 | 1,96 | 6,67 |
| 202,09 | I_2 | 4,90 | 4,68 | 4,53 |
| | II_2 | 5,09 | 4,88 | 4,16 |
| | III_2 | 4,13 | 3,96 | 4,16 |

W tabelach 8.7 i 8.8 przedstawiono procentowe porównanie przemieszczeń kątowych modeli bez wkładek usztywniających z modelami usztywnionymi. Kąt skręcania wyznaczono dokonując przekształceń znanych przemieszczeń pionowych odczytanych w przekroju czujników pomiarowych korzystając z funkcji trygonometrycznej tangens. Ze względu na sposób wyznaczania kąta

skręcania wyniki dotyczą tylko modeli bez płyty OSB. Zestawiając wyniki przemieszczeń kątowych modeli C140_I i C140_II oraz C140_III i C140_IV zauważono dużo większy wzrost sztywności skrętnej w przekroju I-I. Wpływ na taki stan można wytłumaczyć imperfekcją geometryczną badanych profili. Największą sztywność na skręcanie zaobserwowano w przekroju I-I. Różnice te można zaobserwować w tabelach 8.7 i 8.8. Podobne korelacje uzyskano dla profili C90 (załącznik 2).

Tabela 8.7. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_I) i modelu z usztywnieniem (model C140_II) dla profili C140. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

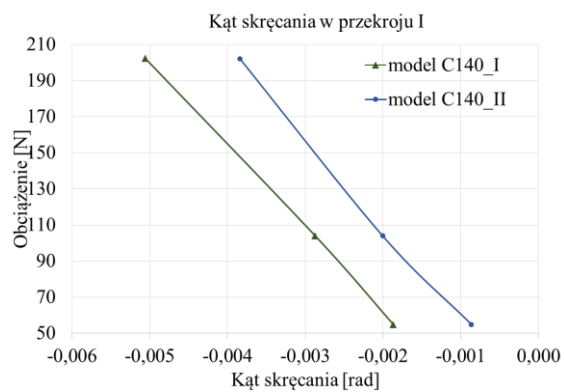
| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_I | model C140_II | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,001867 | -0,000863 | 53,78 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,001475 | 0,001298 | |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,002871 | -0,002004 | 30,21 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,003060 | 0,002760 | |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,005052 | -0,003840 | 24,00 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,006270 | 0,005760 | |
| | III_2 | | | |

Tabela 8.8. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C140_III) i modelu z usztywnieniem (model C140_IV) dla profili C140. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

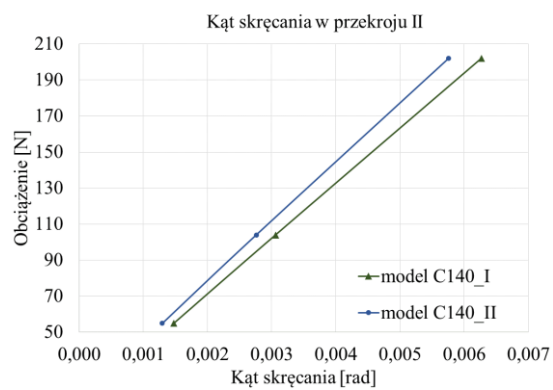
| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_III | model C140_IV | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,014970 | -0,013340 | 10,89 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,012155 | -0,011265 | 7,32 |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,027861 | -0,025343 | 9,04 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,022972 | -0,021639 | 5,80 |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,055678 | -0,052131 | 6,37 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,045772 | -0,043553 | 4,85 |
| | III_2 | | | |

Na rysunkach 8.18 i 8.19 pokazano zależność kąta skręcania od obciążenia dla modeli C140_I z C140_II oraz modeli C140_C_III i C140_IV. Podobnie jak w przypadku przemieszczeń pionowych na przedstawionych rysunkach widoczny jest wpływ zastosowanej wkładki montażowej (rys. 8.18 i 8.19). Odnosi się to również do badań przeprowadzonych na profilach C90, których wyniki zamieszczono w załączniku 2.

a)

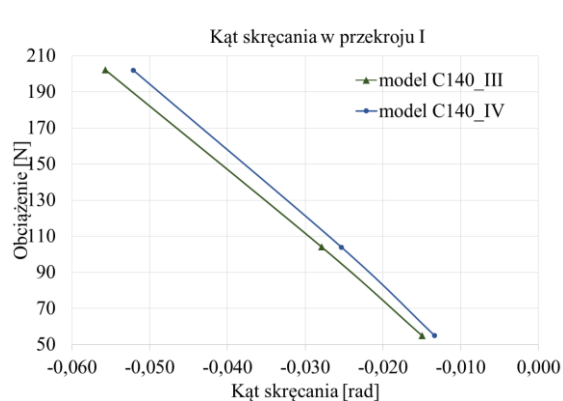


b)

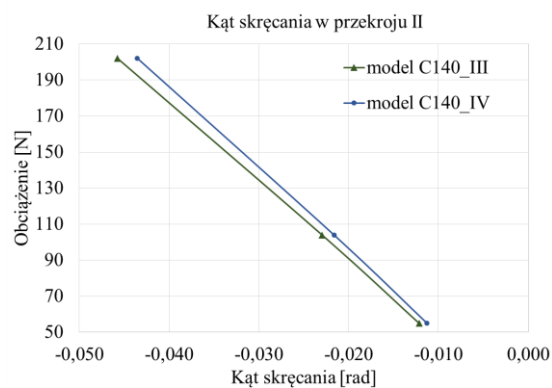


Rys. 8.18. Wykresy kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C140_I) oraz dla modelu usztywnionego (model C140_II): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

a)



b)



Rys. 8.19. Wykresy kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C140_III) oraz dla modelu usztywnionego (model C140_IV): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

8.2 ANALIZA NUMERYCZNA

Kolejnym etapem, po badaniach eksperymentalnych było przeprowadzenie numerycznej analizy giętno – skrętnej w programie Ansys Academic Research 2020, bazujący na metodzie elementów skończonych [4, 109, 170, 181].

8.2.1 Ogólne zasady modelowania MES dla profili cienkościennych

Metoda elementów skończonych pozwala zasymulować układ fizyczny uwzględniając jego właściwości materiałowe, sposób podparcia i obciążenia z uwzględnieniem modelu matematycznego [11, 91, 93]. Fizyczny układ z pewną ilością niewiadomych można za pomocą równań różniczkowych i dyskretyzacji układu na elementy skończone sprowadzić do uproszczonego układu odzwierciedlającego analizowany problem techniczny. Otrzymanie żądanej

dokładności determinowane jest m. in. przez właściwe przyjęcie warunków brzegowych i odpowiedni podział kształtu na elementy skończone [98, 155, 158]. Wyniki z przyjętej metody analizy numerycznej powinny być zbieżne z rezultatami uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych.

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele programów bazujących na metodzie elementów skończonych. Używając MES należy zwrócić szczególną uwagę na wybór modeli elementów skończonych (modele powłokowe lub objętościowe) oraz rozmiar siatki, która w znacznej mierze decyduje o dokładności wyników. Warunki brzegowe oraz deklaracja przyłożenia obciążenia powinny być tak dobrane, aby otrzymane wyniki odpowiadały badaniom eksperymentalnym bądź wynikom uzyskanym z obliczeń analitycznych [24, 40, 43, 86, 93].

Z każdym krokiem udoskonalania modelu warto prowadzić kontrolę wrażliwości na dokonane zmiany. Model MES powinien obejmować zarówno imperfekcje geometryczne, jak i strukturalne [53, 54, 95].

W zależności od wymagań obliczeniowych do analizy można wykorzystywać uproszczone modele materiałów (materiał: idealnie sprężysty, idealnie sprężysto – plastyczny, idealnie sztywno plastyczny bądź materiał ze wzmocnieniem) [95].

Cienkościenne pręty ze stali zimnogiętej charakteryzują się formami niestateczności miejscowej, dystorsyjnej i ogólnej, które można odpowiednio identyfikować przy właściwie dobranej geometrii pręta. Projekt konstrukcyjny dla cienkościennych prętów stalowych formowanych na zimno jest bezpośrednio zależny od analizy stateczności. W związku z powyższym należy uzyskać możliwie najefektywniejsze zachowanie stabilności sprężystej projektowanej konstrukcji, aby otrzymać wiarygodne wyniki [110, 113, 152]. W załączniku C do normy PN-EN 1993-1-5 [127] zawarte są wytyczne dotyczące stosowania MES do projektowania m. in. w stanie granicznym nośności i stanie granicznym użyteczności. Modelowanie MES konstrukcji cienkościennych można przeprowadzić uwzględniając poszczególne jej części lub obliczenia przeprowadzić dla całego ustroju prętowego w zależności od stopnia złożoności analizowanej konstrukcji [65, 69, 183].

8.2.2 Budowa modelu numerycznego

Modele numeryczne opracowywane były na podstawie schematów badań z rozdziału 8.1.1. Pierwszym etapem przeprowadzonej analizy numerycznej było geometryczne odwzorowanie rzeczywistego obiektu. Model matematyczny odzwierciedlający budowę badanych profili bazował na elementach powierzchniowych i bryłowych [24, 152]. W przyjętych modelach numerycznych pominięto gwint na pręcie łączącym usztywnienie i wkrętach mocujących płytę OSB. Detale te nie mają znaczenia dla analizowanych zjawisk a ich rolę zastąpiono przez odpowiedni dobór kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcji (tabela 8.9). Przyjęcie uproszczeń w znacznym stopniu ogranicza liczbę elementów skończonych, a tym samym czas obliczeń. Profile cienkościenne zamodelowano przy użyciu modelu

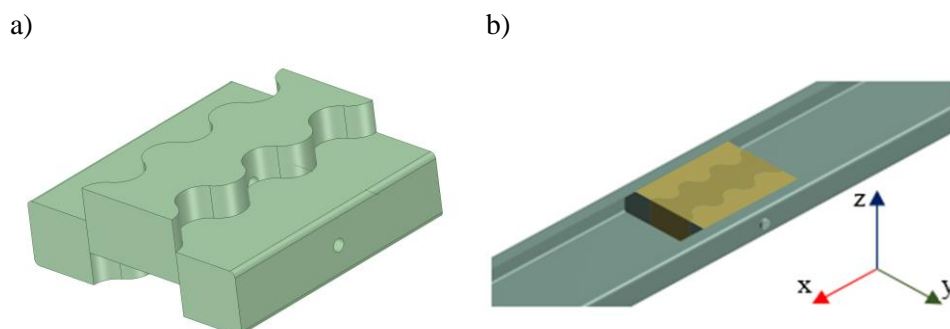
powłokowego typu Shell181. Natomiast elementy usztywniające i śruby za pomocą modelu bryłowego Solid187. Widok modelu wkładki montażowej pokazano na rys. 8.20a, natomiast model geometryczny belki z usztywnieniem na rys. 8.21. Potrzebne charakterystyki geometryczne ceowników do badań numerycznych przyjęto zgodnie z wymiarami rzeczywistymi podanymi w tabelach 8.1 i 8.2 w rozdziale 8.1.1.

Utworzonemu modelowi zadeklarowano odpowiednie dane materiałowe. Obliczenia zostały przeprowadzone przy założeniu liniowych właściwości materiału w stanie sprężystym.

Kolejny etap badań dotyczył zagadnień kontaktowych, czyli modelowania obszaru styku obiektów tworzących model. W programie Ansys kontakt generowany może być automatycznie lub ręcznie. W większości kontaktów definiowanych automatycznie program przypisuje kontakt spajający elementy w całość tzw. Bonded. Ansys dysponuje pięcioma rodzajami kontaktów. Kontakty typu bonded i no separation nazywane są kontaktami liniowymi, ponieważ zakładają niewielkie odkształcenia i nie obejmują nieliniowości. Inne typy kontaktów (frictionless, rough i frictional) uwzględniają nieliniowości kontaktu [94]. W przeprowadzonej analizie zdefiniowano dwa rodzaje kontaktu (tabela 8.9). Kontakt typu Bonded, oznacza, że stykające się elementy nie mogą się rozdzielać i wzajemnie przesuwają, natomiast kontakt typu Frictional umożliwia rozdzielenie się elementów i ich wzajemny przesuw [4, 63]. W kontakcie Frictional przyjęto współczynnik tarcia równy 0,2, który odpowiada współczynnikowi tarcia ślizgowego pomiędzy polietylenem i stalą oraz drewnem i stalą [50, 159].

Tabela 8.9. Rodzaje kontaktów przyjętych w przeprowadzonej analizie.

| Elementy | Typ kontaktu deklarowany w programie Ansys |
|--|--|
| Profil cienkościenny – wkładka montażowa | Frictional |
| Profil cienkościenny – śruba | Bonded |
| | Frictional |
| Śruba – wkładka montażowa | Bonded |
| Profil cienkościenny – płyta OSB | Frictional |



Rys. 8.20. Widok modelu numerycznego: a) opracowana wkładka usztywniająca, b) połączenie wkładki i profilu ceowego.

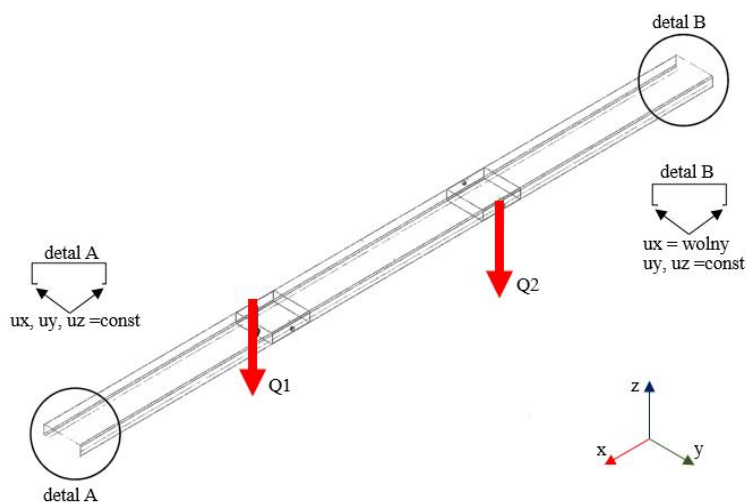
Prawidłowe przeprowadzenie analizy MES wymaga odpowiedniego ustawienia siatki elementów skończonych, dzięki czemu możliwa jest do uzyskania zbieżność metody numerycznej z badaniami doświadczalnymi. Na początku budowy siatki zdefiniowano wielkość poszczególnych elementów, która w analizowanych modelach wynosiła 3 mm. W zależności od rozpatrywanego modelu wygenerowana siatka elementów skończonych różniła się liczbą węzłów oraz elementów (tabela 8.10). Elementy skończone generowano w trybie Multizone, opartym na elementach sześciennych, który gwarantuje powstanie mniejszej liczby węzłów i elementów oraz większą dokładność wyników w porównaniu z siatkami czterościenneymi [4, 98].

Tabela. 8.10. Liczba węzłów i elementów w analizowanych modelach.

| Analizowane modele | Profil C90 | | Profil C140 | |
|--------------------|------------|-----------|-------------|-----------|
| | Węzły | Elementy | Węzły | Elementy |
| model I i III | 662 636 | 328 963 | 804 374 | 399 704 |
| model II | 763 298 | 393 601 | 1 026 037 | 543 917 |
| model IV | 712 448 | 360 897 | 917 012 | 473 174 |
| model V i VII | 2 696 310 | 1 598 124 | 2 762 070 | 1 630 858 |
| model VI | 2 802 374 | 1 621 944 | 3 031 967 | 1 692 616 |
| model VIII | 2 742 947 | 1 608 564 | 2 896 995 | 1 661 784 |

Po utworzeniu siatki elementów skończonych zadeklarowano warunki brzegowe, które w przypadku błędnej deklaracji lub jej niejednoznaczności, mogą doprowadzić do powstania osobliwości numerycznej, która objawia się błędem wykonania obliczeń [98, 185]. Właściwe odebranie analizowanemu obiektowi stopnie swobody determinują jego zachowanie pod deklarowanym obciążeniem. Powinno to odpowiadać rzeczywistym warunkom pracy tego obiektu.

Podczas przeprowadzanych obliczeń numerycznych zauważono, że niewielka zmiana warunków brzegowych prowadzi do różnych rozwiązań, a otrzymane wyniki różnią się znacznie między sobą. Modele belek podparto przez odebranie stopni swobody na krawędziach usztywnień profili ceowych (rys. 8.21). Warunki brzegowe zamodelowano w ten sposób aby spełniały założenia oparcia przegubowego. Obciążenie belek przyłożono na obwodzie pręta mocującego wkładki usztywniające.



Rys. 8.21. Model geometryczny belki z usztywnieniem - warunki brzegowe i obciążenia.

8.2.3 Analiza wyników numerycznych

W przypadku analizy numerycznej tak jak dla rezultatów badań eksperymentalnych sporządzono wykresy zależności obciążenie – przemieszczenie pionowe pomiędzy modelami bez usztywnień i modelami z usztywnieniami. Prezentowane wyniki odnoszą się do profili C140. Natomiast rezultaty dla profili C90 zostały zamieszczone w załączniku 3.

W tabelach 8.11 i 8.12 pokazano rezultaty badań dla modeli bez płyty OSB (model C140_I ÷ model C140_IV). Wyniki przedstawiają procentowe różnice w wartościach przemieszczeń pionowych uzyskanych pomiędzy profilem bez usztywnienia a profilem z usztywnieniem. Obliczone przemieszczenia pionowe w każdym z przekrojów pomiarowych wykazują zwiększenie sztywności giętej w wyniku zastosowania wkładki montażowej. W przypadku modeli C140_I i C140_II otrzymano różnice sięgające ok. 7 % dla obciążenia 54,94 N, 4,63% w przypadku siły 103,99 N i 5.42% dla profilu obciążonego siłą 202,09 N (tabela 8.11). Różnice dla wszystkich uwzględnianych obciążeń w modelach C140_III i C140_IV sięgają ok. 20% (tabela 8.12).

Tabela 8.11. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C140_I) i modelu z usztywnieniem (model C140_II) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_I | model C140_II | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,55 | 1,44 | 7,10 |
| | I_2 | 1,385 | 1,334 | 3,68 |
| | II_1 | 1,65 | 1,56 | 5,45 |
| | II_2 | 1,65 | 1,56 | 5,45 |
| | III_1 | 1,34 | 1,29 | 3,73 |
| | III_2 | 1,51 | 1,4 | 7,28 |
| 103,99 | I_1 | 3,06 | 2,92 | 4,58 |
| | I_2 | 2,7 | 2,585 | 4,26 |
| | II_1 | 3,19 | 3,10 | 2,82 |
| | II_2 | 3,19 | 3,10 | 2,82 |
| | III_1 | 2,61 | 2,50 | 4,21 |
| | III_2 | 2,98 | 2,84 | 4,63 |
| 202,09 | I_1 | 6,15 | 5,93 | 3,58 |
| | I_2 | 5,53 | 5,23 | 5,42 |
| | II_1 | 6,33 | 6,20 | 2,05 |
| | II_2 | 6,33 | 6,20 | 2,05 |
| | III_1 | 5,35 | 5,06 | 5,42 |
| | III_2 | 5,98 | 5,77 | 3,51 |

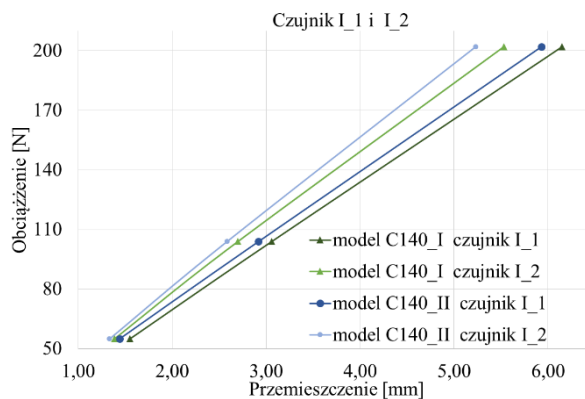
Tabela 8.12. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C140_III) i modelu z usztywnieniem (model C140_IV) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------------------|
| | | model C140_III | model C140_IV | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,53 | 1,19 | 22,22 |
| | I_2 | 0,35 | 0,35 | 1,43 |
| | II_1 | 1,59 | 1,21 | 23,90 |
| | II_2 | 0,39 | 0,38 | 2,82 |
| | III_1 | 1,32 | 1,01 | 23,48 |
| | III_2 | 0,35 | 0,35 | 1,14 |
| 103,99 | I_1 | 2,83 | 2,25 | 20,49 |
| | I_2 | 0,71 | 0,71 | 0,70 |
| | II_1 | 2,92 | 2,30 | 21,23 |
| | II_2 | 0,85 | 0,85 | 0,47 |
| | III_1 | 2,41 | 1,90 | 21,16 |
| | III_2 | 0,65 | 0,65 | 0,77 |
| 202,09 | I_1 | 5,22 | 4,10 | 21,46 |
| | I_2 | 1,49 | 1,48 | 0,67 |
| | II_1 | 5,41 | 4,29 | 20,70 |
| | II_2 | 1,6 | 1,60 | 0,31 |
| | III_1 | 4,37 | 3,51 | 19,68 |
| | III_2 | 1,31 | 1,31 | 0,38 |

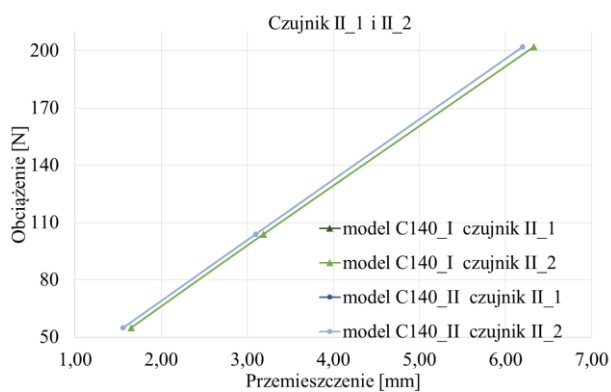
Z obliczonych przemieszczeń pionowych dla modeli C140_I ÷ C140_IV sporządzono wykresy zależności obciążenie – przemieszczenie (rys. 8.22 i 8.23). Rysunek 8.22 prezentuje przemieszczenia pionowe uzyskane w wyniku analizy numerycznej dla modeli C140_I i C140_II. Zależności przemieszczeń pionowych od siły dla modeli z jednym obciążeniem i zastosowanym usztywnieniem w postaci wkładki montażowej, przedstawia rysunek 8.23.

Uzyskane rezultaty przemieszczeń kątowych w przeprowadzonej analizie numerycznej zestawiono w tabelach 8.13 i 8.14. Zestawiając wyniki badań eksperymentalnych (tabela 8.7) z wynikami analizy numerycznej (tabela 8.13) zauważono małe różnice w wartościach kąta skręcania w przekrojach ich odczytu.

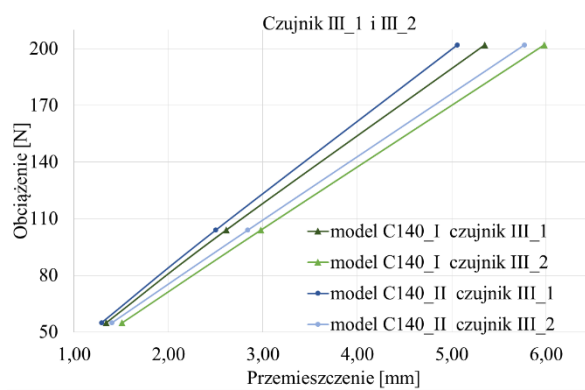
a)



b)

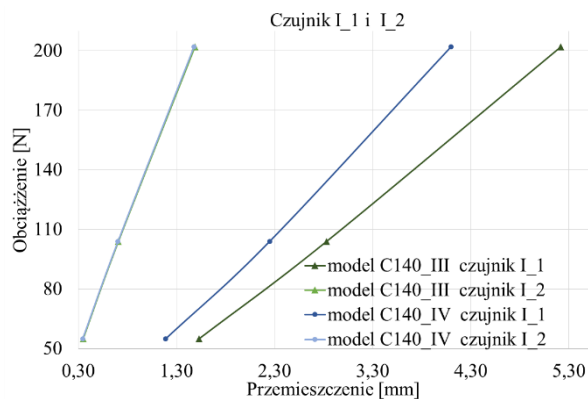


c)

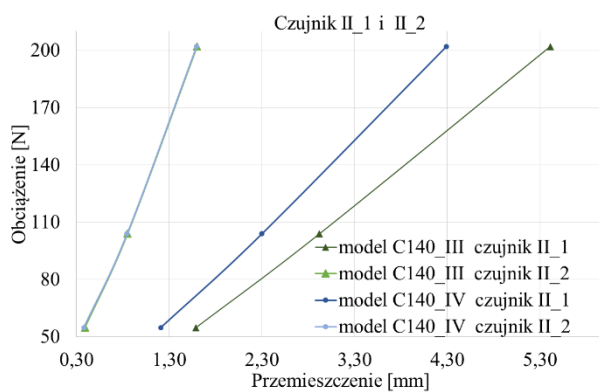


Rys. 8.22. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez usztywnień (model C140_I) i profili z usztywnieniem (model C140_II), wyniki przemieszczeń uzyskanych z analizy numerycznej: a) czujnik I_1 i I_2, b) czujnik II_1 i II_2, c) czujnik III_1 i III_2.

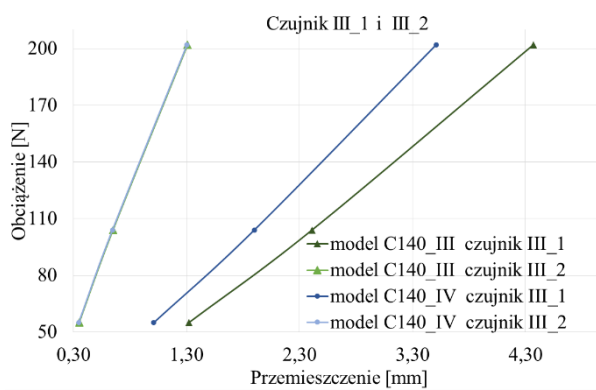
a)



b)



c)



Rys. 8.23. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez usztywnień (model C140_III) i profili z usztywnieniem (model C140_IV), wyniki przemieszczeń uzyskanych z analizy numerycznej: a) czujnik I_1 i I_2, b) czujnik II_1 i II_2, c) czujnik III_1 i III_2.

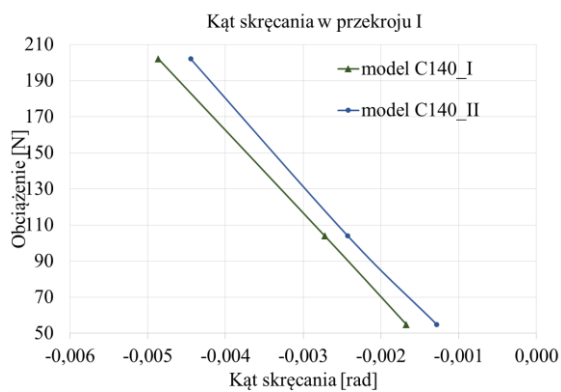
Tabela 8.13. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C140_I) i modelu z usztywnieniem (model C140_II) dla profili C140. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| | | model C140_I | model C140_II | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,001674 | -0,001283 | 23,36 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,001334 | 0,000983 | 26,30 |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,002724 | -0,002428 | 10,87 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,002887 | 0,002460 | 14,79 |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,004864 | -0,004449 | 8,53 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,005900 | 0,005570 | 5,59 |
| | III_2 | | | |

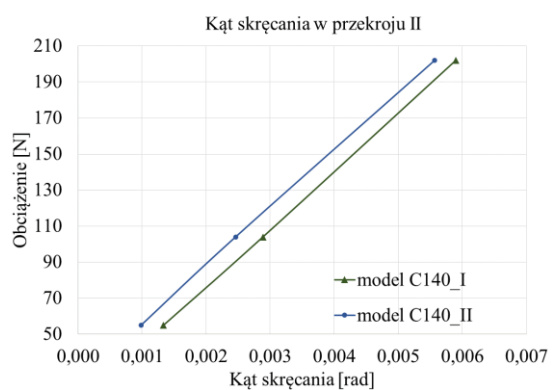
Tabela 8.14. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z analizy numerycznej modelu bez usztywnień (model C140_III) i modelu z usztywnieniem (model C140_IV) dla profili C140. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| | | model C140_III | model C140_IV | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,017490 | -0,012525 | 28,39 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,014378 | -0,009842 | 31,54 |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,030400 | -0,021270 | 30,03 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,025100 | -0,018020 | 28,21 |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,055235 | -0,038818 | 29,72 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,045328 | -0,032674 | 27,92 |
| | III_2 | | | |

a)

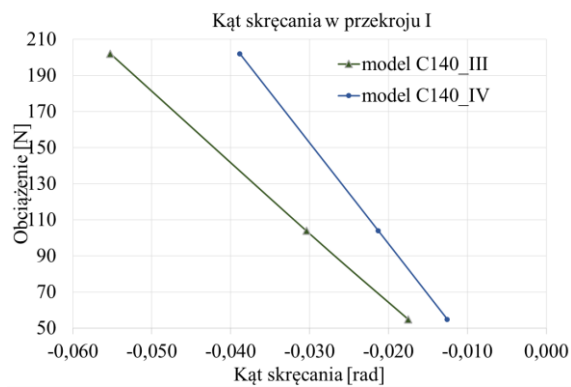


b)

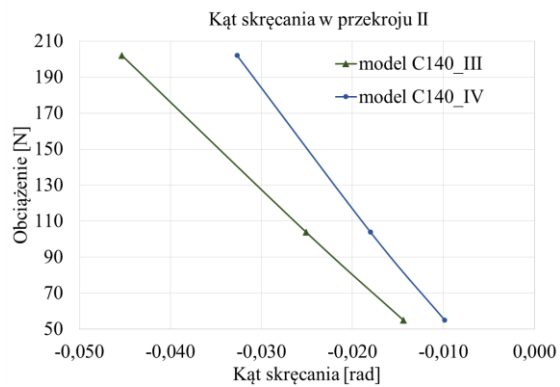


Rys. 8.24. Wykresy zależności kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C140_I) oraz modelu usztywnionego (model C140_II), wyniki uzyskane z analizy numerycznej: a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

a)



b)



Rys. 8.25. Wykresy zależności kąta skręcania profilu dla modelu bez uszywnień (model C140_III) oraz dla modelu uszywnionego (model C140_IV), wyniki uzyskane z analizy numerycznej: a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

W tabelach 8.15 i 8.16 przedstawiono procentowe zestawienie wyników przemieszczeń pionowych uzyskanych w następstwie symulacji numerycznej dla profili z płytą poszycia (model C140_V ÷ model C140_VIII). Natomiast na rysunkach 8.26 i 8.27 przedstawiono wykresy zależności przemieszczenie – obciążenie dla przyjętych schematów obliczeniowych (rys. 8.10 ÷ 8.13).

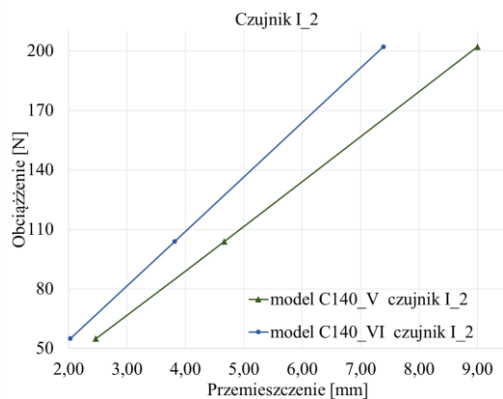
Tabela 8.15. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C140_V) i modelu z usztywnieniem (model C140_VI) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| | | model C140_V | model C140_VI | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 2,47 | 2,03 | 17,8 |
| | II_2 | 2,77 | 2,27 | 18,1 |
| | III_2 | 2,42 | 2,03 | 16,1 |
| 103,99 | I_2 | 4,67 | 3,82 | 18,2 |
| | II_2 | 5,31 | 4,29 | 19,2 |
| | III_2 | 4,61 | 3,83 | 16,9 |
| 202,09 | I_2 | 9,00 | 7,39 | 17,9 |
| | II_2 | 10,22 | 8,23 | 19,5 |
| | III_2 | 8,96 | 7,39 | 17,5 |

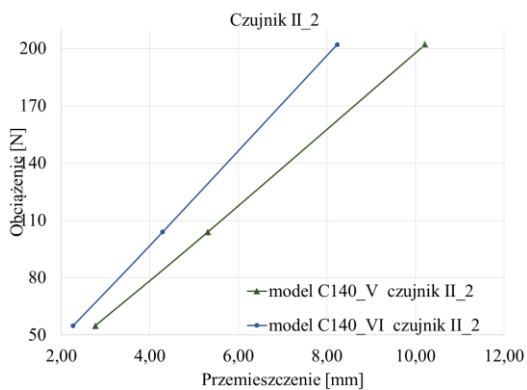
Tabela 8.16. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C140_VII) i modelu z usztywnieniem (model C140_VIII) dla profili C140.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | model C140_VII | model C140_VIII | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 1,3 | 1,21 | 6,92 |
| | II_2 | 1,34 | 1,25 | 6,72 |
| | III_2 | 1,11 | 0,98 | 11,71 |
| 103,99 | I_2 | 2,48 | 2,3 | 7,26 |
| | II_2 | 2,59 | 2,37 | 8,49 |
| | III_2 | 2,12 | 1,90 | 10,38 |
| 202,09 | I_2 | 4,93 | 4,41 | 10,55 |
| | II_2 | 5,15 | 4,53 | 12,04 |
| | III_2 | 4,17 | 3,64 | 12,71 |

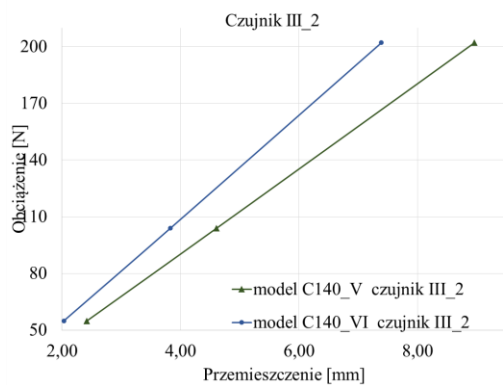
a)



b)

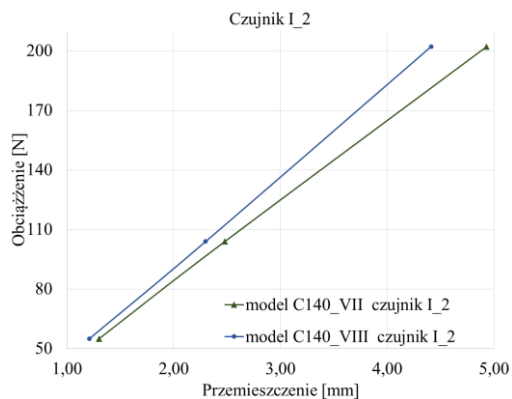


c)

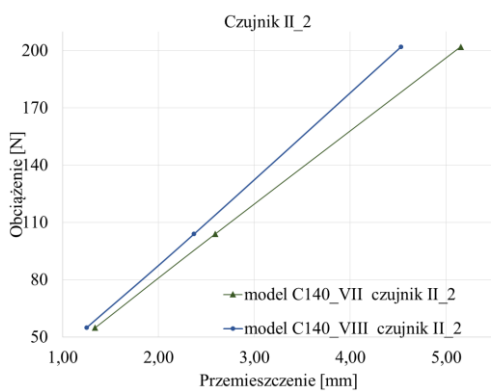


Rys. 8.26. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez usztwnień (model C140_V) i profili z usztwnieniem (model C140_VI), wyniki przemieszczeń uzyskanych z analizy numerycznej: a) czujnik I_2, b) czujnik II_2, c) czujnik III_2.

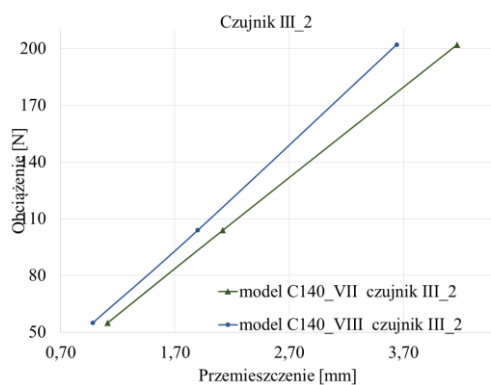
a)



b)



c)



Rys. 8.27. Wykres zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez usztywnień (model C140_VII) i profili z usztywnieniem (model C140_VIII), wyniki przemieszczeń uzyskanych z analizy numerycznej: a) czujnik I_2, b) czujnik II_2, c) czujnik III_2.

8.3 WALIDACJA ANALIZY NUMERYCZNEJ

Uzyskane z analizy numerycznej wyniki przyrównano z rezultatami otrzymanymi w badaniach eksperymentalnych. Założeniem badań numeryczno – doświadczalnych był pomiar przemieszczeń pionowych dla wyżej przyjętych modeli (model I ÷ model VIII) w wyznaczonych punktach pomiarowych według schematów z rozdziału 8.1.1. Wyniki badań numeryczno – doświadczalnych dla modeli I ÷ VIII obejmuje profile C90 i C140 przedstawiono w tabelach 8.11÷8.14. Przeprowadzone analizy numeryczne odzwierciedlają charakter badań doświadczalnych.

Tabela 8.11. Porównanie Δ [%] wyników przemieszczeń pionowych otrzymanych z badań eksperymentalnych i analizy numerycznej dla model C90_I i model C90_II oraz model C90_III i model C90_IV.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | model C90_I | model C90_II | model C90_III | model C90_IV |
|----------------|-------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 54,94 | I_1 | 2,27 | 1,19 | -6,99 | 9,16 |
| | I_2 | -10,27 | -9,66 | 16,67 | 15,85 |
| | II_1 | 5,73 | 6,08 | -6,00 | 12,32 |
| | II_2 | -10,00 | -3,45 | 18,75 | 17,61 |
| | III_1 | 6,37 | 4,00 | -10,00 | 10,62 |
| | III_2 | -13,58 | -15,23 | 7,89 | 6,49 |
| 103,99 | I_1 | 4,13 | 0,63 | -4,81 | 10,36 |
| | I_2 | -7,02 | -9,06 | 13,41 | 11,88 |
| | II_1 | 6,54 | 7,39 | -2,46 | 12,88 |
| | II_2 | -10,32 | -5,79 | 6,59 | 4,94 |
| | III_1 | 6,71 | 7,43 | -5,70 | 12,44 |
| | III_2 | -11,86 | -9,30 | 10,96 | 9,15 |
| 202,09 | I_1 | 6,66 | 5,41 | 2,06 | 18,97 |
| | I_2 | 0,84 | -1,22 | 5,10 | 3,90 |
| | II_1 | 8,39 | 6,01 | 3,22 | 19,06 |
| | II_2 | -2,25 | -0,87 | 10,61 | 9,38 |
| | III_1 | 12,18 | 12,02 | 3,74 | 19,68 |
| | III_2 | -3,20 | -1,11 | 9,66 | 8,74 |

Tabela 8.12. Porównanie Δ [%] wyników przemieszczeń pionowych otrzymanych z badań eksperymentalnych i analizy numerycznej dla model C140_I ÷ model C140_II oraz model C140_III ÷ model C140_IV.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | model C140_I | model C140_II | model C140_III | model C140_IV |
|----------------|-------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 54,94 | I_1 | 1,27 | -2,86 | -6,99 | 9,16 |
| | I_2 | -3,98 | -3,41 | 16,67 | 15,85 |
| | II_1 | 2,37 | -3,45 | -6,00 | 12,32 |
| | II_2 | 3,51 | 2,50 | 18,75 | 17,61 |
| | III_1 | 3,32 | -4,03 | -10,00 | 10,62 |
| | III_2 | 4,07 | 7,28 | 7,89 | 6,49 |
| 103,99 | I_1 | -1,46 | -3,33 | -4,81 | 10,36 |
| | I_2 | -1,89 | -1,77 | 13,41 | 11,88 |
| | II_1 | 1,30 | -1,71 | -2,46 | 12,88 |
| | II_2 | 2,92 | 1,65 | 6,59 | 4,94 |
| | III_1 | 2,61 | 1,96 | -5,70 | 12,44 |
| | III_2 | 3,00 | 2,54 | 10,96 | 9,15 |
| 202,09 | I_1 | -1,02 | -4,40 | 2,06 | 18,97 |
| | I_2 | -1,58 | 1,32 | 5,10 | 3,90 |
| | II_1 | 2,53 | -1,34 | 3,22 | 19,06 |
| | II_2 | 4,64 | 3,19 | 10,61 | 9,38 |
| | III_1 | -1,33 | 2,32 | 3,74 | 19,68 |
| | III_2 | 3,58 | 2,80 | 9,66 | 8,74 |

Tabela 8.13. Porównanie Δ [%] wyników przemieszczeń pionowych otrzymanych z badań eksperymentalnych i analizy numerycznej dla model C90_V i model C90_VI oraz model C90_VII i model C90_VIII.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | model C90_V | model C90_VI | model C90_VII | model C90_VIII |
|----------------|-------------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| 54,94 | I_2 | -16,88 | -12,08 | -17,65 | -16,88 |
| | II_2 | -17,47 | -9,70 | -16,30 | -14,81 |
| | III_2 | -16,23 | -11,56 | -18,06 | -19,05 |
| 103,99 | I_2 | -14,56 | -10,78 | -15,15 | -9,68 |
| | II_2 | -19,23 | -14,63 | -14,71 | -16,67 |
| | III_2 | -14,94 | -11,59 | -18,38 | -12,90 |
| 202,09 | I_2 | -8,13 | -9,53 | -17,03 | -4,14 |
| | II_2 | -13,56 | -11,41 | -18,46 | -6,71 |
| | III_2 | -8,78 | -9,18 | -20,00 | -8,87 |

Tabela 8.14. Porównanie Δ [%] wyników przemieszczeń pionowych otrzymanych z badań eksperymentalnych i analizy numerycznej dla model C140_V i model C140_VI oraz model C140_VII i model C140_VIII.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | model C140_V | model C140_VI | model C140_VII | model C140_VIII |
|----------------|-------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|
| 54,94 | I_2 | 3,89 | 13,25 | -4,17 | -5,22 |
| | II_2 | 1,77 | 11,67 | -2,92 | -9,65 |
| | III_2 | 2,81 | 10,18 | -2,97 | -5,38 |
| 103,99 | I_2 | 2,71 | 13,77 | -1,06 | 1,29 |
| | II_2 | -0,57 | 4,67 | -1,49 | 1,66 |
| | III_2 | 1,28 | 11,75 | -0,95 | 3,06 |
| 202,09 | I_2 | 0,88 | 13,57 | -0,57 | 5,77 |
| | II_2 | 7,09 | 13,82 | -1,14 | 7,17 |
| | III_2 | 0,44 | 14,27 | -0,92 | 8,08 |

8.4 PODSUMOWANIE WYNIKÓW ANALIZY NUMERYCZNO - DOSWIADCZALNEJ

W wykonanej analizie numeryczno - doświadczalnej dokonano oceny wpływu miejscowego usztywnienia w postaci wkładek montażowych na przemieszczenia giętno - skrętne. Jednym ze sposobów zwiększenia sztywności elementów cienkościennych o przekrojach otwartych przy częściowym bądź całkowitym demontażu poszycia zewnętrznego z budynku jest stosowanie stężeń [46]. W tym celu opracowana została wkładka montażowa w technologii druku 3D ułatwiająca montaż stężeń ściennych przy jednoczesnym zwiększeniu sztywności profilu w miejscu osadzania stężeń, niezbędnych do zapewnienia stateczności przestrzennej bryły budynku.

Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań wykazano zasadność stosowania wkładek montażowych we wszystkich rozpatrywanych modelach. Wpływ wkładki montażowej w przypadku analizowanych schematów (rys. 8.6 ÷ 8.13) dla profili C90 i C140 na przemieszczenia giętno – skrętne jest pozytywny. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły poprawność modelu numerycznego, jaki i dobrą skuteczność tego typu usztywnień.

III. CZĘŚĆ BADAWCZA W ZAKRESIE FIZYKI BUDOWLI

9. ANALIZA NUMERYCZNO - DOŚWIADCZALNA ZAWILGOCONYCH PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH

Odnosząc się do genezy pracy, analiza numeryczno – doświadczalna pozwala określić przydatność materiałów przegrody zewnętrznej z chwilą ich zawilgocenia w następstwie oddziaływania wód popowodziowych.

Coraz częstsze podtopienia wynikają z postępujących zmian klimatycznych i występują zarówno w obszarach dawnych rozlewisk rzek, jak również na terenach miejskich o uregulowanej linii brzegowej. Podtopienia mają miejsca nie tylko w następstwie wysokich poziomów rzek i przechodzącej fali powodziowej, ale występują również lokalnie w wyniku gwałtownych opadów deszczu.

Istotny staje się więc problem coraz częściej występującego zwilgocenia przegród zewnętrznych budynków w następstwie tego typu oddziaływań.

9.1 BADANIA DOŚWIADCZALNE

Głównym celem badań doświadczalnych było określenie izotermi sorpcji materiałów tworzących przegrodę zewnętrzną wykonaną w technologii lekkiego szkieletu stalowego. Maksymalne zawilgocenie sorpcyjne materiał osiąga przy 100% wilgotności względnej. Jest ono mniejsze od wilgotności osiągananej przez zanurzenie materiału w wodzie [28, 48, 90, 163]. Z tego względu w celu określenia wpływu zanurzenia materiałów w wodzie popowodziowej po

przeprowadzonych badaniach sorpcyjnych wyznaczono ich nasiąkliwość. Wyniki te wykorzystano w dalszym etapie pracy do przeprowadzenia analizy numerycznej.

Dokonano również matematycznego opisu uzyskanych izoterm sorpcji z wykorzystaniem jednego z wielu równań opisanych w literaturze [20, 21, 34, 157].

9.1.1 Opis stanowiska badawczego

Aparatura stanowiąca podstawę do określenia sorpcyjności materiałów tworzących warstwę przegrody zewnętrznej, wykonanej w technologii lekkiego szkieletu stalowego, obejmowała: suszarkę i wagę laboratoryjną oraz komorę klimatyczną.

Waga laboratoryjna o nośności 6000 g umożliwiała ważenie próbki z dokładnością $\pm 0,01$ g (rys. 9.1).



Rys. 9.1. Waga laboratoryjna Radwag 6000 $\pm 0,01$ g.

Próbki przed badaniem w komorze klimatycznej suszone były do stałej masy według normy PN-EN ISO 12570 [137] w suszarce firmy Binder (rys. 9.2). Jej komora posiada jednorodną regulację temperatury z konwekcją naturalną działającą w zakresie od 5°C do 300°C.

a)



b)



Rys. 9.2. Komora temperaturowa Binder: a) widok od zewnątrz, b) widok wnętrza komory z umieszczonymi próbkami.

W komorze klimatycznej ToRoPol K008 (rys. 9.3) określono ilość wilgoci, którą pochłania materiał w określonych warunkach otoczenia. Komora pracuje w zakresie temperatury od $+15^{\circ}\text{C}$ do $+25^{\circ}\text{C}$. Natomiast zakres jej wilgotności wynosi od 65 do 97% RH. Wahania temperatury to $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, a wilgotności $\pm 2\%$ RH.

a)




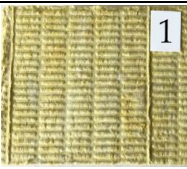



b)



Rys. 9.3. Komora klimatyczna ToRoPol Binder: a) widok od zewnątrz, b) widok wnętrza komory z umieszczonymi próbkami.

Próbki do badań sorpcyjności powinny mieć masę co najmniej 10 g i pole powierzchni nie mniejsze niż 100 mm x 100 mm [138]. Dla każdego materiału sorpcję określono na trzech próbkach, po czym z uzyskanych wyników obliczono wartości średnie. Podstawowe dane materiałowe badanych materiałów zestawiono w tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Widok i opis próbek poddanych badaniu sorpcyjności i nasiąkliwości.

| | |
|--|---|
| <p>Tynk cienkowarstwowy</p>  | <p>Mineralny tynk cienkowarstwowy. Wymiary: 10 cm x 10 cm x 0,05 cm Gęstość objętościowa: 1660 [kg/m³] Współczynnik przewodzenia ciepła: 0,8 [W/(m·K)]</p> |
| <p>Wełna mineralna twarda</p>  | <p>Płyta z wełny mineralnej do izolacji przegród zewnętrznych. Wymiary: 20 cm x 20 cm x 14 cm Gęstość objętościowa 94 [kg/m³] Współczynnik przewodzenia ciepła: 0,035 [W/(m·K)]</p> |
| <p>Wełna mineralna miękka</p>  | <p>Wełna miękka stosowana do wypełnienia konstrukcji szkieletowych. Wymiary: 20 cm x 20 cm x 5 cm Gęstość objętościowa 31 [kg/m³] Współczynnik przewodzenia ciepła: 0,035 [W/(m·K)]</p> |
| <p>Płyta OSB</p>  | <p>Płyta OSB stosowana w środowisku o umiarkowanej wilgotności na zewnątrz i wewnątrz pomieszczeń. Wymiary: 20 cm x 20 cm x 1,2 cm Gęstość objętościowa 585 [kg/m³] Współczynnik przewodzenia ciepła: 0,13 [W/(m·K)]</p> |
| <p>Płyta gipsowo - kartonowa</p>  | <p>Płyta gipsowo - kartonowa stosowana na okładziny wewnętrzne przegród. Wymiary: 20 cm x 20 cm x 1,25 cm Gęstość objętościowa 642 kg/m³. Współczynnik przewodzenia ciepła: 0,25 [W/(m·K)]</p> |

Drugi wydzielony blok eksperymentalny dotyczył określenia nasiąkliwości przy pełnym zanurzeniu próbek [126]. Do tego celu posłużyły próbki z badania sorpcyjności, które zanurzono w wodzie. Odsączanie próbek odbywało się na stalowym stelażu nachylonym pod kątem 45 stopni do płaszczyzny pionowej (rys. 9.4).



Rys. 9.4. Odsączanie próbek poddanych badaniu nasiąkliwości.

9.1.2 Przebieg badań

Badanie wykonano za pomocą komory klimatycznej zgodnie z normą PN - EN ISO 12571:2002 „Ciepłno – wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości sorpcyjnych” [138]. Badania przeprowadzono w temperaturze 20°C przy pięciu poziomach wilgotności względnej powietrza (RH = 65, 70, 80, 90 i 97%). Użyta komora klimatyczna pozwalała przeprowadzić badania od początkowej wilgotności 65%. Przed badaniem sorpcyjności próbki wysuszono w temperaturze 100°C do stałej masy (tabela 9.2). Wysuszone próbki umieszczono w komorze klimatycznej o stałej temperaturze (rys. 9.3).

Pomiary polegały na okresowym ważeniu próbek do momentu osiągnięcia stanu równowagi wilgotnościowej we wszystkich próbkach przechowywanych w określonych warunkach ciepłno - wilgotnościowych. W każdym z pięciu klimatów ustabilizowana wilgotność sorpcyjna wyznaczana była jako średnia arytmetyczna z trzech próbek. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono sorpcję badanych materiałów (tabela 2). Zawartość wilgoci w_s po osiągnięciu stanu równowagi dla każdego z pięciu poziomów wilgotności określono w odniesieniu do objętości suchego materiału wg. wzoru:

$$w_s = u \cdot \rho_o \quad (9.1)$$

gdzie:

u – wilgotność masowa obliczona za pomocą równania,

ρ_o – gęstość próbki w stanie suchym, [kg/m³].

Wilgotność masowa u określona została z równania:

$$u = \frac{m - m_o}{m_o} \quad (9.2)$$

gdzie:

m – masa próbki w stanie równowagi sorpcyjnej, [kg],

m_o – masa próbki wysuszonej, [kg].

Gęstość próbki ρ_o w stanie suchym określono za pomocą wzoru:

$$\rho_o = \frac{m_o}{V} \quad (9.3)$$

gdzie:

m_o – masa próbki wysuszonej, [kg],

V – objętość wysuszonej próbki, [m³].

Tabela 9.2. Dane materiałowe uzyskane z obliczeń i pomiarów w komorze klimatycznej.

| Materiał | Masa suchej próbki m_o [kg] | Objętość suchej próbki V [m ³] | Gęstość w stanie suchym ρ_o [kg/m ³] | Masa próbki w stanie równowagi sorpcyjnej | |
|---------------------------|-------------------------------|--|---|---|---------|
| | | | | RH [%] | m [kg] |
| Tynk cienkowarstwowy | 0,08309 | 0,00005 | 1661,80 | 65 | 0,08339 |
| | | | | 70 | 0,08347 |
| | | | | 80 | 0,08366 |
| | | | | 90 | 0,08447 |
| | | | | 97 | 0,08803 |
| Wełna twarda | 0,52575 | 0,0056 | 93,88 | 65 | 0,53023 |
| | | | | 70 | 0,53085 |
| | | | | 80 | 0,53152 |
| | | | | 90 | 0,53281 |
| | | | | 97 | 2,13302 |
| Płyta OSB | 0,28082 | 0,00048 | 585,04 | 65 | 0,32642 |
| | | | | 70 | 0,32978 |
| | | | | 80 | 0,33410 |
| | | | | 90 | 0,34034 |
| | | | | 97 | 0,36386 |
| Wełna miękka | 0,06109 | 0,002 | 30,55 | 65 | 0,06279 |
| | | | | 70 | 0,06291 |
| | | | | 80 | 0,06311 |
| | | | | 90 | 0,06369 |
| | | | | 97 | 0,06575 |
| Płyta gipsowo - kartonowa | 0,32121 | 0,0005 | 642,42 | 65 | 0,32443 |
| | | | | 70 | 0,32476 |
| | | | | 80 | 0,32533 |
| | | | | 90 | 0,32991 |
| | | | | 97 | 0,36221 |

Nasiąkliwość badanych próbek określona została przez pomiar zmiany masy próbek całkowicie zanurzonych w wodzie przez okres 28 dni [126]. Po okresie badania próbki wyjęto z wody, ustawiono na stole i pozostawiono do

odsączenia na 10 minut. Nasiąkliwość wodą w_n przy całkowitym długotrwałym zanurzeniu obliczono według wzoru:

$$w_n = \frac{m_{28} - m_o}{V} \quad (9.4)$$

gdzie:

w_n – nasiąkliwość [kg/m^3],

m_{28} – masa badanej próbki po całkowitym zanurzeniu przez 28 dni [kg],

m_o – masa suchej próbki [kg],

V – początkowa objętość próbki [m^3].

W tabeli 9.4 przedstawione są odczyty pomiaru masy próbek poddanych 28 dniowemu zanurzeniu w wodzie.

Tabela 9.4. Waga materiałów suchych i po wykonaniu badania nasiąkliwości.

| Materiał | Masa suchych próbek [kg] | Masa próbek mokrych [kg] | Procentowy przyrost masy próbki [%] |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Tynk cienkowarstwowy | 0,08309 | 0,09133 | 9,92 |
| Wełna twarda | 0,52575 | 4,51312 | 758,41 |
| Płyta OSB | 0,28082 | 0,72818 | 159,31 |
| Wełna miękka | 0,06109 | 1,30289 | 2032,73 |
| Płyta G-K ₂ | 0,32121 | 0,60321 | 87,79 |

9.1.3 Analiza wyników doświadczalnych

Uzyskane wyniki z badań sorpcji i nasiąkliwości posłużyły jako dane do przeprowadzenia analizy numerycznej. W tabeli 9.5 zestawiono wyniki badań określonych dla sorpcyjności i nasiąkliwości. Wartość 100% odpowiada wilgotności osiągniętej przez próbki w badaniu nasiąkliwości.

Tabela 9.5. Dane uzyskane w wyniku badań sorpcyjności i nasiąkliwości.

| Materiał | Zawartość wilgoci w materiale [kg/m ³] dla sześciu poziomów wilgotności. | | | | | |
|--------------|--|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| | RH 65% | RH 70% | RH 80% | RH 90% | RH 97% | RH 100% ¹⁾ |
| Tynk | 6 | 7,5 | 11,3 | 27,6 | 98,7 | 164,7 |
| Wełna twarda | 0,8 | 0,91 | 1,03 | 1,26 | 287 | 712 |
| Płyta OSB | 95 | 102 | 111 | 124 | 173 | 932 |
| Wełna miękka | 0,85 | 0,91 | 1,01 | 1,3 | 2,33 | 621 |
| Płyta G-K | 6,43 | 7,1 | 8,23 | 17,4 | 82 | 564 |

¹⁾Wilgotność osiągnięta przez próbki w badaniu nasiąkliwości.

Uzyskane wyniki badań sorpcyjności posłużyły do matematycznego opisu izoterm. Analizując modele przedstawione w pracach [18, 20, 21, 34, 157, 171] oraz biorąc pod uwagę ich korelację z wynikami badań eksperymentalnych, najlepszą korelację opisuje model Chena Y. i Chena Z. Opisane przez autorów równanie izoterm sorpcji przyjmuje postać:

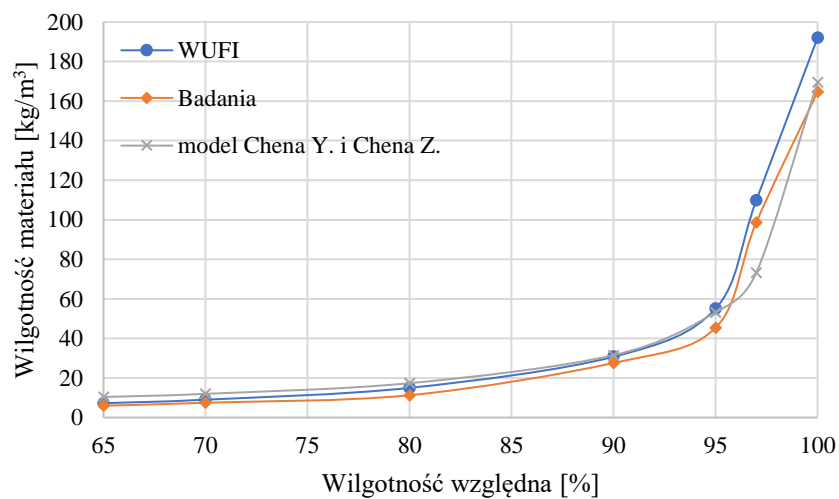
$$S = \frac{a \cdot \varphi}{(1 + b \cdot \varphi) \cdot (1 - c \cdot \varphi)} \quad (9.4)$$

gdzie:

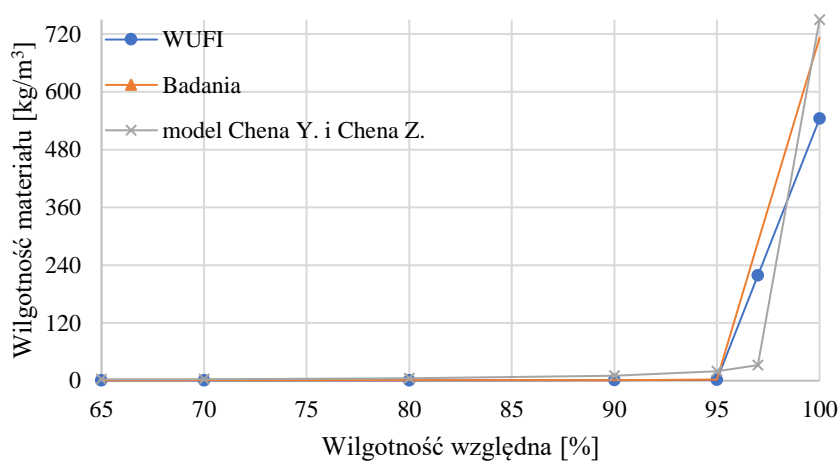
- φ – wilgotność względna powietrza, [%],
- a, b, c – współczynniki.

Wartości uzyskanej wilgotności sorpcyjnej (RH = 65, 70, 80, 90 i 97%) w temperaturze 20°C pozwoliły na wykreślenie izoterm sorpcji badanych materiałów. Wyniki eksperymentalne jak również uzyskane na podstawie przyjętego modelu Chena Y. i Chena Z., zestawiono z wynikami izoterm sorpcji dostępnych w bazie danych programu WUFI (rys. 9.5 ÷ 9.9). Wartości uzyskanych na podstawie badań i modelu matematycznego izoterm wykazały korelację z izotermami dostępnymi w bazie programu WUFI. Jakościowej oceny dopasowania równań do rezultatów badań i danych uzyskanych z programu dokonano za pomocą współczynnika korelacji. Najlepszą korelacją R = 0,99 charakteryzują się wełna miękka i płyta gipsowo – kartonowa. Z kolei tynk cienkowlasowy i płyta OSB przyjmują współczynnik korelacji równy 0,97.

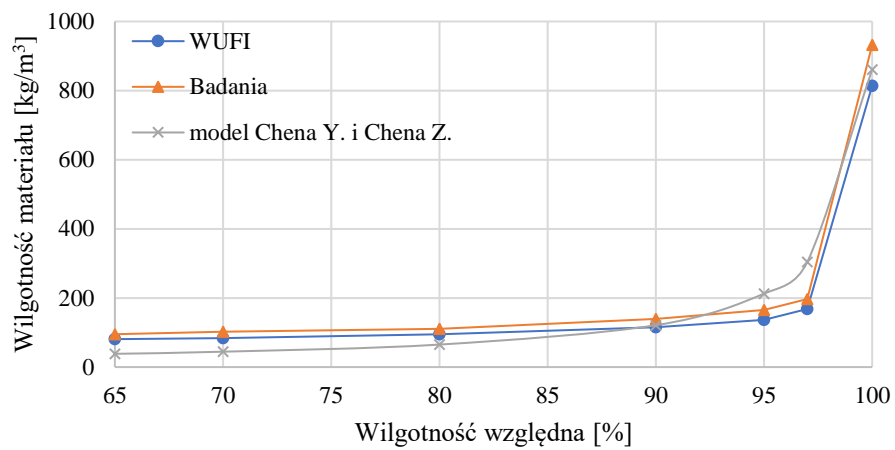
Najmniejszą współzależność korelacyjną uzyskano dla twardej wełny mineralnej ($R = 0,94$).



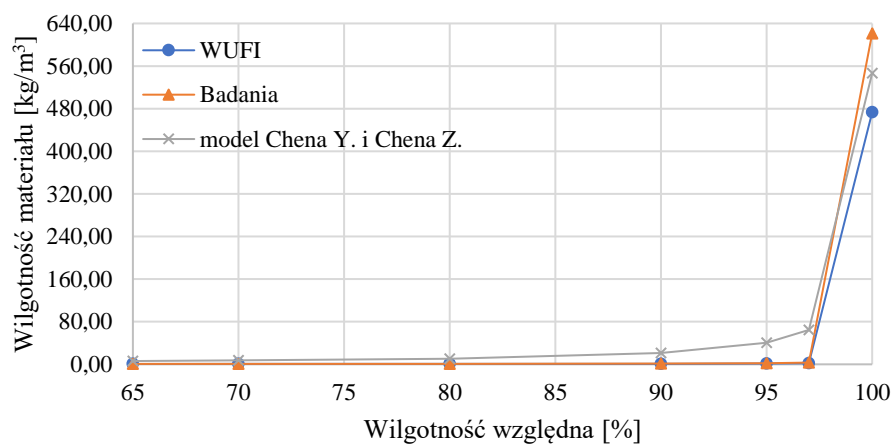
Rys. 9.5 Krzywa sorpcji tynku cienkowarstwowego.



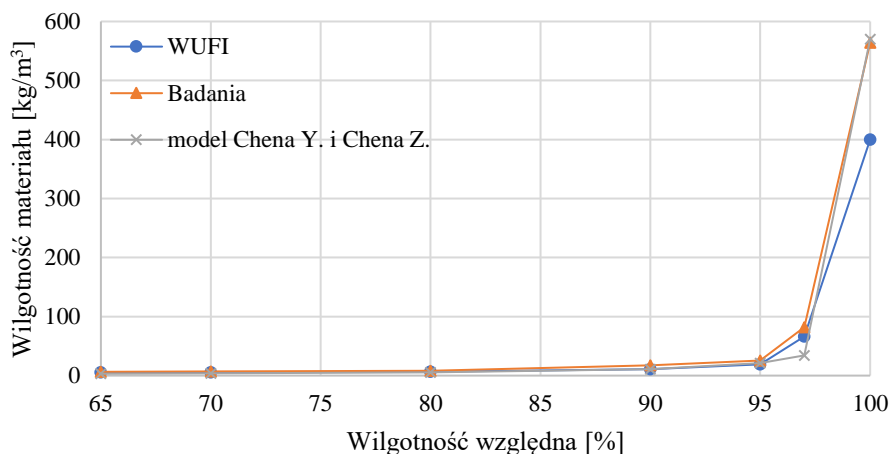
Rys. 9.6. Krzywa sorpcji wełny mineralnej twardej.



Rys. 9.7. Krzywa sorpcji płyty OSB.



Rys. 9.8. Krzywa sorpcji wełny mineralnej miękkiej.



Rys. 9.9. Krzywa sorpcji płyty gipsowo – kartonowej.

9.2 ANALIZA NUMERYCZNA

Modelowanie procesów ciepłno – wilgotnościowych ze względu na złożoność zjawisk jest zadaniem skomplikowanym. Istnieje kilka modeli numerycznych pozwalających wykonać procesy sprzężonej wymiany ciepła i wilgoci [3, 10, 124, 167]. W celu wykonania analizy numerycznej w zakresie fizyki budowli w niniejszej dysertacji skorzystano z dwóch programów – WUFI Pro i Ansys Academic Researcher 2020.

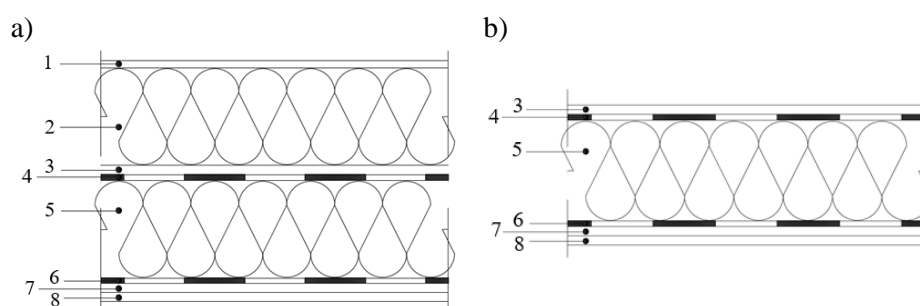
Program WUFI Pro jest narzędziem do sprzężonej symulacji ciepłno – wilgotnościowej i opiera się na modelu Kunzela, który uwzględnia wpływ klimatu dla środowiska wewnętrznego i zewnętrznego na zachodzące procesy w przegrodach zewnętrznych [83, 141, 142]. Program ten posłużył do symulacji osuszania przegrody zewnętrznej wykonanej w konstrukcji lekkiego szkieletu stalowego. Celem symulacji było wykazanie zasadności zdjęcia poszycia bryły budynku zalanego wodami popowodziowymi. Natomiast w programie Ansys Academic Researcher 2020 skorzystano z modułu Steady State, za pomocą którego określono parametry mostka cieplnego narożnika przegrody zewnętrznej, analizowanej jako złącze 1, 2 i 3. Symulacji dokonano przy założeniu, że w materiałach przegrody znajdowała się wilgoć będąca pozostałością po wodach popowodziowych.

Niniejsza analiza ciepłno – wilgotnościowa została celowo zawężona do badań jednego mostka cieplnego, bowiem w wyniku podtopienia budynku wodami popowodziowymi istotne jest określenie ich wpływu na wysokości parteru budynku (wysokości przewidywanego podtopienia). W związku z tym ograniczono się do oceny mostka cieplnego najbardziej narażonego na działanie wód popowodziowych, co w przypadku kompleksowej analizy ciepłno – wilgotnościowej budynku wymagałoby rozszerzenia.

9.2.1 Model numeryczny

Model numeryczny w programie WUFI Pro

W analizie numerycznej wykonano obliczenia mające na celu oszacowanie czasu potrzebnego do osuszenia przegrody zewnętrznej wykonanej w technologii lekkiego szkieletu stalowego, w której materiałach nagromadziła się woda popowodziowa. Symulację wykonano dla przegrody, w której uwzględniono wszystkie materiały – model 1 (rys. 9.10a) oraz przegrody bez tynku zewnętrznego, ocieplenia zewnętrznego i płyty gipsowo – kartonowej - model 2 (rys. 9.10). Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu programu WUFI Pro.



Rys. 9.10. Konstrukcja przegrody zewnętrznej poddanej analizie osuszania w programie WUFI: a) model przegrody z wszystkimi jej materiałami – model 1, b) model przegrody bez tynku i ocieplenia zewnętrznego – model 2. 1 – tynk cienkowarstwowy gr. 0,45 cm, 2 – twarda wełna mineralna o gr. 14 cm, 3 – płyta OSB gr. 1,2 cm, 4 – folia paroprzepuszczalna, 5 – wełna mineralna miękka o gr. 14 cm, 6 – folia paroizolacyjna, 7 – płyta OSB gr. 1,25 cm, 8 – płyta gipsowo -kartonowa gr. 1,25 cm.

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu wyjściowej zawartości wilgoci w materiałach tworzących przegrodę zewnętrzną: teoretyczną, normalną i nasyconą. Teoretyczna zawartość wilgoci odpowiadała wilgotności względnej powietrza 0%, dla wilgotności naturalnej $RH = 65\%$ i 100% w przypadku nasycenia. W przypadku 100% wilgotności względnej założono długotrwałe zanurzenie przegrody w wodzie. Odpowiada to założeniom zalania ścian budynku wodami popowodziowymi. Jako dane zawartości wody przy założonej wilgotności wyjściowej posłużyły wyniki otrzymane z badań doświadczalnych (tabela 9.6).

Obliczenia dla konstrukcji przegrody zewnętrznej wykonano uwzględniając klimat zewnętrzny dla miasta Kraków, a klimat wewnętrzny dla 3 klasy wilgotności wewnętrznej i temperatury 20°C [119, 120, 149]. Założono, że ściana jest zwrócona na południe. Symulacja obejmowała cztery okresy obliczeniowe trwające od pierwszego dnia sierpnia: 1 miesiąc, 1 rok, 2 lat i 4 lata. Do przeprowadzenia analizy właściwości materiałowe i klimatyczne zaczerpnięto z bazy danych programu WUFI Pro, natomiast zawartość wody w materiale zadeklarowano z uzyskanych badań eksperymentalnych.

Tabela 9.6. Początkowa zawartość wody w materiałach przegrody zewnętrznej.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 0% RH | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 65% RH | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 100% RH |
|-----|---------------------------|--|---|--|
| 1 | Tynk cienkowarstwowy | 0 | 6 | 164,7 |
| 2 | Wełna mineralna - twarda | 0 | 0,8 | 712 |
| 3 | Płyta OSB | 0 | 95 | 932 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Wełna mineralna - luźna | 0 | 0,85 | 621 |
| 6 | Folia paroizolacyjna | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Płyta OSB | 0 | 95 | 932 |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa | 0 | 6,43 | 564 |

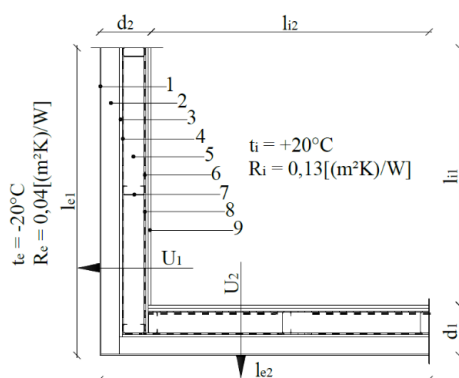
Model numeryczny w programie Ansys Academic Researcher 2020

Zbadanie wpływu wilgotności powstałej na skutek działania wód popowodziowych na parametry cieplne w przegrodzie zewnętrznej przeprowadzono w programie Ansys Academic Researcher 2020 w module Steady - State Thermal. Wpływ ten został oszacowany na podstawie zmian współczynnika przewodzenia ciepła wraz z zawartością wilgoci. Wartości przewodności cieplnej dla materiałów tworzących analizowaną przegrodę na podstawie danych materiałowych dostępnych w bazie programu WUFI Pro zestawiono w tabeli 9.7. Dla lepszej czytelności analizowane modele narożników w zależności od zawartości wody zostały odpowiednio opisane. I tak złącze 1 odpowiada materiałom o współczynniku przewodzenia ciepła dla wilgotności względnej wynoszącej 0%, złącze 2 przypisane jest do parametrów dla wilgotności względnej 65%, a złącze 3 dla pełnego nasycenia wodą, gdy wilgotność względna wynosi 100%.

Do określenia właściwości cieplnych zamodelowano naroże przegrody zewnętrznej wykonanej w technologii lekkiego szkieletu stalowego bazującego na profilach C140 (rys. 9.11). Program WUFI Pro pozwalał jedynie na modelowanie zjawisk jednowymiarowych, natomiast program Ansys Academic Researcher 2020 umożliwił przeprowadzenie trójwymiarowej symulacji narożnika przegrody zewnętrznej.

Tabela 9.7. Współczynniki przewodzenia ciepła dla materiałów o różnej wilgotności dla analizowanej przegrody zewnętrznej.

| Lp. | Materiał | Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] przy zawartości wody odpowiadającej wilgotności | | |
|-----|---------------------------|--|---|--|
| | | złącze 1 λ [W/(m·K)] dla RH = 0% | złącze 2 λ [W/(m·K)] dla RH = 65% | złącze 3 λ [W/(m·K)] dla RH = 100% |
| 1 | Tynk cienkowarstwowy | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 2 | Wełna mineralna - twarda | 0,035 | 0,035 | 0,24 |
| 3 | Płyta OSB | 0,18 | 0,212 | 0,588 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | 4,2 | 4,2 | 4,2 |
| 5 | Wełna mineralna - luźna | 0,035 | 0,035 | 0,187 |
| 6 | Profil stalowy C140 | 50 | 50 | 50 |
| 7 | Folia paroizolacyjna | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| 8 | Płyta OSB | 0,18 | 0,212 | 0,588 |
| 9 | Płyta gipsowo - kartonowa | 0,25 | 0,258 | 1,191 |



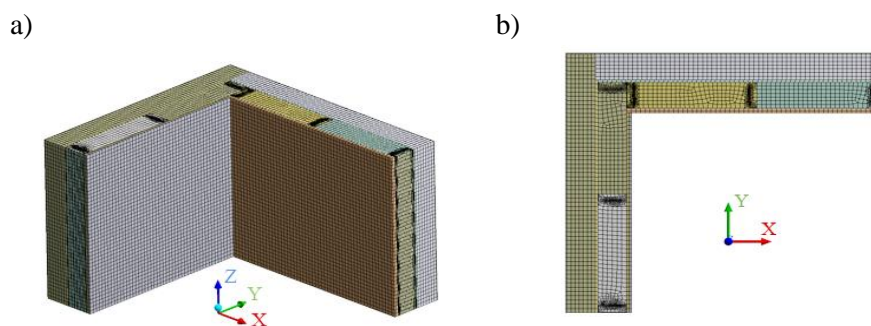
- 1 – tynk cienkowarstwowy gr. 0,5 cm
- 2 – wełna mineralna gr. 14 cm
- 3 – płyta OSB gr. 1,2cm
- 4 – folia paroprzepuszczalna
- 5 – wełna mineralna 140 cm
- 6 – słupek stalowy C140
- 7 – folia paroizolacyjna
- 8 – płyta OSB gr. 1,2 cm
- 9 – płyta g-k gr. 1,25 cm

Rys. 9.11. Schemat naroża przegrody zewnętrznej w technologii lekkiego szkieletu stalowego.

Na podstawie [148] przyjęto wewnętrzną temperaturę $t_i = +20$ [°C] natomiast wg. [130] projektową temperaturę zewnętrzną $t_e = -20$ [°C]. Dla analizy MES, przyjęto współczynniki przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej dla

przepływu: poziomego po stronie wewnętrznej $h_i = 7,69$ [W/(m²·K)] i po stronie zewnętrznej $h_e = 25$ [W/(m²·K)], które stanowią odwrotność oporów R_{si}, R_{se} [(m²·K)/W] [98, 116]. Do obliczeń minimalnej temperatury na wewnętrznej stronie przegrody t_{min} [°C] oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} stosuje się warunki brzegowe wg. [139], dla których zadeklarowano opór $R_{si} = 0,25$ [(m²·K)/W].

Do podziału modelu na elementy skończone zastosowano siatkę Multizone (rys. 9.12), jak w pracy [143, 167], która gwarantuje powstanie mniejszej liczby węzłów i elementów oraz większą dokładność w porównaniu z siatkami czworokątnymi [4]. Elementy skończone w powyższej metodzie generowane są z elementów sześciokątnych. Dla przyjętych modeli obliczeniowych wygenerowanych zostało 195 624 elementów i 953 590 węzłów.



Rys.9.12. Dyskretyzacja modelu obliczeniowego naroża przegrody zewnętrznej: a) widok izometryczny, b) widok z góry.

9.2.2 Symulacja numeryczna

Symulacja numeryczna w programie WUFI Pro

Program WUFI oparty jest na matematycznym modelu opisującym niestacjonarny, jednowymiarowy sprzężony transport ciepła i wilgoci oparty na modelu Kunzela [81]. Sprzężony przepływ ciepła i wilgoci uwzględniający przewodzenie i akumulację oraz zasadę zachowania masy i energii opisany został za pomocą równań różniczkowych [81, 82]:

- równanie transportu ciepła:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (9.5)$$

– równanie transportu masy:

$$\rho_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w \cdot D_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (9.6)$$

gdzie:

H – entalpia wilgotnego materiału, [J/m³],

θ – temperatura, [°C],

λ – współczynnik przewodzenia ciepła wilgotnego materiału, [W/(m·K)],

h_v – ciepło parowania, [J/kg],

δ – współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, [kg/(m·s·Pa)],

μ – współczynnik oporu dyfuzyjnego suchego materiału,

p – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa],

ρ_w – gęstość wody, [kg/m³],

u – zawartość wilgoci, [m³/m³],

φ – wilgotność względna, [%],

D_w – współczynnik przewodzenia kapilarnego, [m²/s].

W przedstawionych równaniach strona lewa zawiera człony akumulacyjne. Dla przepływu ciepła jego wielkość zależy od zdolności magazynowania ciepła w wilgotnym materiale. W przypadku transportu wilgoci akumulacja zawiera pochodną izotermy sorpcji. Prawa strona równań (9.5), (9.6) opisuje transport ciepła i masy. W przypadku ciepła uwzględnia się współczynnik przewodzenia ciepła materiału wilgotnego i jego przenoszenie z wilgocią razem z przemianami fazowymi. Współczynnik dyfuzji pary wodnej i przewodzenia kapilarnego uwzględniany jest w transporcie masy [83].

Symulacja numeryczna w programie ANSYS Academic Researcher

W przypadku ustalonej analizy termicznej w programie Ansys, temperatury {T} są rozwiązywane za pomocą zależności [3, 143, 158]:

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (9.7)$$

Założenia:

- w analizie stanu ustalonego nie są uwzględniane efekty przejściowe,
- [K] może być stałą lub funkcją temperatury,
- {Q} może być stałą lub funkcją temperatury,
- stałe temperatury reprezentują ograniczenia {T} w systemie.

Do analizy przyjęto model przestrzenny, gdzie w każdym obszarze rozkład temperatury w stanie ustalonym jest opisany prawem Fouriera, a pomiędzy poszczególnymi obszarami (materiałami) występuje idealny kontakt:

$$q = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \cdot \nabla T \quad (9.8)$$

gdzie:

q – gęstość strumienia ciepła, [W/m²],

λ – przewodność cieplna, [W/(m·K)],

T – temperatura, [K],

∇T – wektor zwany operatorem nabla.

Znak minus w równaniu (9.8) oznacza kierunek przepływu ciepła z obszaru o temperaturze wyższej do obszaru o temperaturze niższej. W równaniu (9.7) podstawę stanowi prawo Fouriera. Oznacza to, że analiza termiczna, jest równaniem opartym na przewodnictwie.

W analizie domyślnie zakłada się idealny kontakt termiczny, co oznacza, że nie występuje spadek temperatury na granicy styku. W rzeczywistości kontakty między materiałami tworzącymi przegrodę zewnętrzną mogą przyczynić się do spadku temperatury na ich styku (rys. 9.13). Wielkość przepływu ciepła przez styk jest określona przez kontaktowy strumień ciepła q , zgodnie z równaniem (9.9):

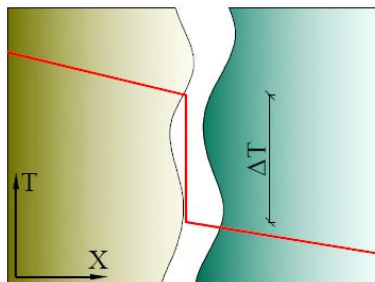
$$q = TCC \cdot (T_{\text{target}} - T_{\text{contact}}) \quad (9.9)$$

gdzie:

T_{target} – temperatura powierzchni docelowej, [K],

T_{contact} – temperatura powierzchni styku, [K],

TCC – przewodność termiczna kontaktu, [W/(m·K)].

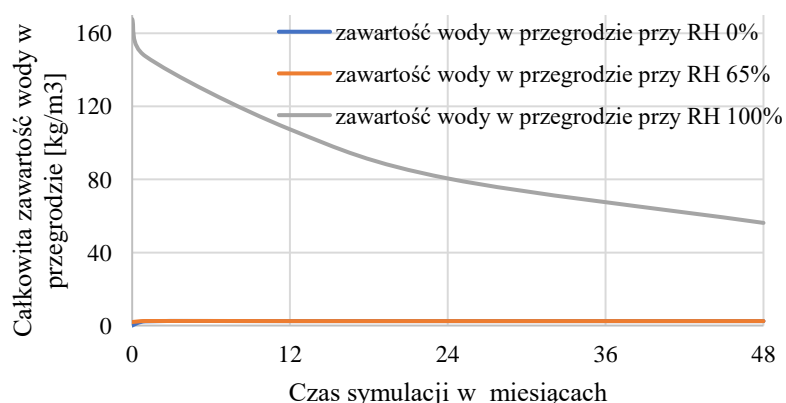


Rys. 9.13. Przykład kontaktu na którym może wystąpić spadek temperatury [3].

9.2.3 Analiza obliczeń numerycznych

Analiza obliczeń uzyskanych z programu WUFI Pro

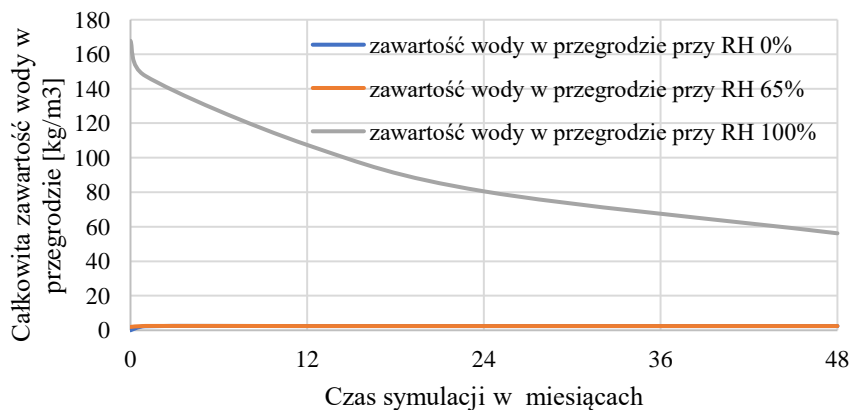
Porównanie przeprowadzonej symulacji dla kompletnej przegrody zewnętrznej (model 1) przedstawia rysunek 9.14. Wyniki zaprezentowane zostały przy różnych poziomach początkowego zawilgocenia (RH = 0, 65 i 100%) oraz okresach suszenia (1 rok, 2 lata i 4 lata). W przypadku zerowej zawartości wody (RH = 0%) na początku symulacji widoczny jest wzrost wilgoci do momentu osiągnięcia stanu równowagi. Dla przypadku gdy RH wynosi 65% również zauważalny jest przyrost wody w przegrodzie w okresie jednego miesiąca. Po upływie roku wilgotność w ścianie zaczyna się stabilizować. Natomiast dla modelu przegrody symulującej długotrwałe zanurzenie w wodzie obserwuje się w początkowych okresach znaczny ubytek wilgotności. Pełne zestawienia analiz numerycznych obejmujących osuszanie przegrody zewnętrznej znajdują się w Załączniku 4. W przypadku czteroletniego osuszania ściany ilość wody jest wciąż bardzo duża. Konieczny zatem staje się demontaż poszycia przegrody zewnętrznej zalanej części budynku i wymiana materiału na w pełni użytkowy deklarowanych przez producenta właściwościach. Usunięcie poszycia, usztywniającego konstrukcję prętową budynku może prowadzić do utraty jego stateczności, co zostało wykazane w rozdziale 7.1.



Rys. 9.14. Zawartość wody w rozpatrywanej przegrodzie (model 1) przy różnych warunkach brzegowych i okresach suszenia.

Przeprowadzono również symulację, w której założono usunięcie ocieplenia zewnętrznego i płyty gipsowo – kartonowej (model 2) w celu szybszego osuszenia pozostałych warstw przegrody poddanych działaniu wód popowodziowych (RH = 100%). Dla porównania wykonano obliczenia dla pozostałych warunków brzegowych, tj. zawartości wody w materiałach przy 0% i 65% wilgotności względnej. Z danych na rys. 9.15 wynika, że w przypadku

usunięcia z przegrody zewnętrznej części jej warstw zalana przegroda pozostaje w dalszym ciągu mokra po długotrwałym suszeniu.



Rys. 9.15. Zawartość wody w rozpatrywanej przegrodzie (model 2) przy różnych warunkach brzegowych i okresach suszenia.

Analiza obliczeń uzyskanych z programu Ansys Academic Researcher 2020

Efektom końcowym symulacji cieplnej w programie Ansys Research Academic było otrzymanie wektorowego rozkładu gęstości strumienia ciepła q [W/m²], całkowitego strumienia ciepła Φ [W] przepływającego przez analizowany narożnik oraz minimalnej temperatury t_{\min} [°C] na wewnętrznej stronie narożnika przegrody zewnętrznej w konstrukcji z lekkiego szkieletu stalowego (tabela 9.8).

Tabela 9.8. Rezultaty analizy numerycznej dla narożnika przegrody zewnętrznej.

| | złącze 1 | złącze 2 | złącze 3 |
|---|----------|----------|----------|
| Gęstość strumienia ciepła dla narożnika przegrody zewnętrznej q [W/m ²] | 5,52 | 5,64 | 26,4 |
| Całkowity strumień ciepła przepływający przez narożnik przegrody zewnętrznej Φ [W] | 16,194 | 16,743 | 74,06 |
| Wartości minimalne temperatury t_{\min} [°C] na wewnętrznej powierzchni przegrody zewnętrznej | 13,81 | 13,768 | 6,636 |

Do wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U [W/(m²·K)] dla rozpatrywanego narożnika postępowano zgodnie z algorytmem prezentowanym w pracach [44, 74, 140, 165], który obejmuje:

- wyznaczenie wartości średniej składowej poziomej gęstości strumienia ciepła q [W/m^2],
- obliczenie współczynnika przenikania ciepła zgodnie z (9.10):

$$U = \frac{q}{t_i - t_e} \quad (9.10)$$

Wartość strumienia ciepła Φ [W] przepływającego przez złącze dla każdego z rozpatrywanych wariantów posłużyła do wyznaczenia liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [$W/(m \cdot K)$]. Natomiast minimalne wartości temperatury wykorzystano do wyznaczenia czynnika temperaturowego $f_{Rsi,obl}$ [120]. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 9.9.

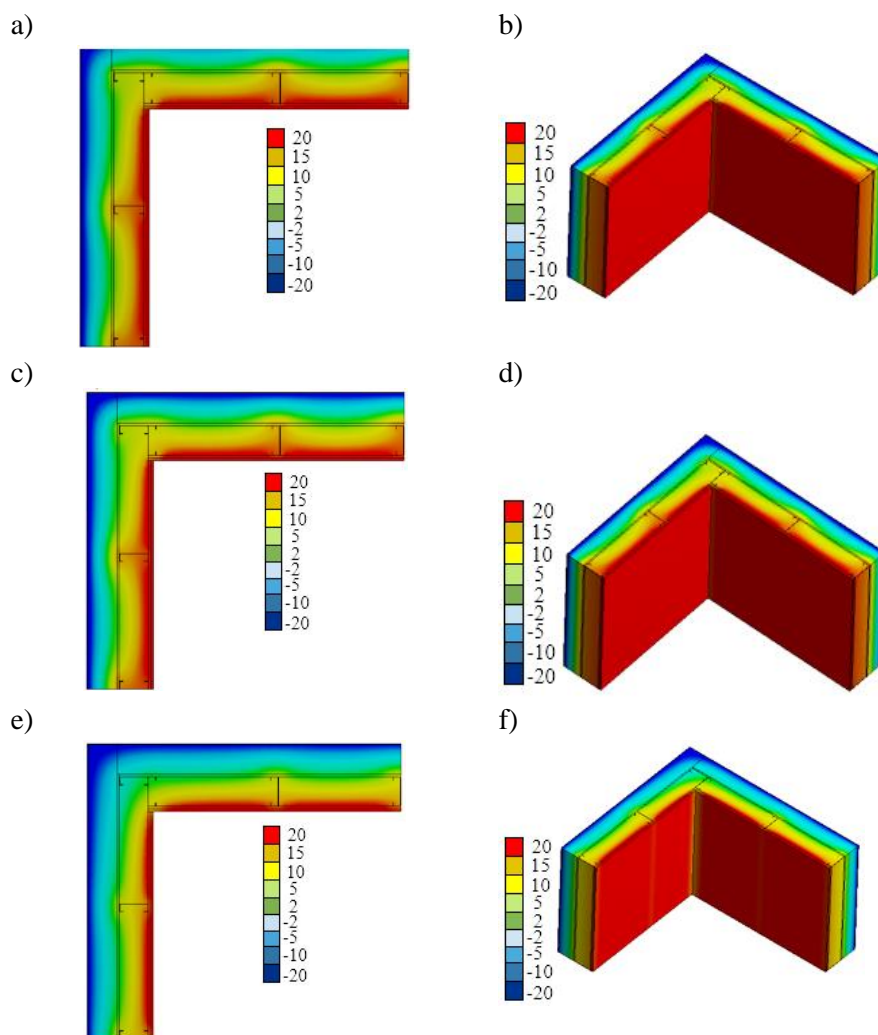
Uzyskane wartości parametrów ciepłno – wilgotnościowych wskazują, że wilgotne materiały, z podwyższoną przewodnością cieplną, zwiększają straty ciepła, a tym samym zwiększają wartość Ψ . Natomiast obniżona temperatura powierzchni wewnętrznej przegrody w konsekwencji prowadzi do zagrożeń mykologicznych. Według [121, 149], wymagania dla wartości krytycznej współczynnika temperaturowego powinny wynosić powyżej $f_{Rsi,kryt.} = 0,72$.

Tabela 9.9. Parametry cieplne analizowanych przegród zewnętrznych, obejmujących złącze 1, 2 i 3.

| Charakterystyczne parametry cieplne narożnika ściany zewnętrznej | | Wartości | | |
|--|--|----------|---------------|--------|
| 1 | Współczynnik przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$] narożnika $U = \frac{q}{(t_i - t_e)}$ | złącze 1 | U | 0,138 |
| | | złącze 2 | U | 0,141 |
| | | złącze 3 | U | 0,660 |
| 2 | Liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego L^{2D} [$W/(m \cdot K)$] $L^{2D} = \frac{\phi}{l \cdot (t_i - t_e)}$ | złącze 1 | L^{2D} | 0,405 |
| | | złącze 2 | L^{2D} | 0,419 |
| | | złącze 3 | L^{2D} | 1,852 |
| 3 | Liniowy współczynnik przenikania ciepła obliczany z uwzględnieniem wymiarów zewnętrznych Ψ_e [$W/(m \cdot K)$] $\Psi_e = L^{2D} - (l_{e1} \cdot U_1 + l_{e2} \cdot U_2)$ | złącze 1 | Ψ_e | -0,003 |
| | | złącze 2 | Ψ_e | 0,419 |
| | | złącze 3 | Ψ_e | 1,852 |
| 4 | Współczynnik temperaturowy $f_{Rsi,obl}$ $f_{Rsi} = \frac{t_{si,min} - t_e}{t_i - t_e}$ | złącze 1 | $f_{Rsi,obl}$ | 0,845 |
| | | złącze 2 | $f_{Rsi,obl}$ | 0,844 |
| | | złącze 3 | $f_{Rsi,obl}$ | 0,666 |

Na rysunku 9.16 przedstawiono rozkład temperatur dla rozpatrywanych wariantów naroża ściany, obejmujących złącze 1, 2 i 3. Dla materiałów nasyconych wodą dla rozkładu temperatury od strony wewnętrznej przegrody w

konstrukcji lekkiego szkieletu stalowego uwydatnia się pasmo niskiej temperatury, które prowadzi do zagrożeń mykologicznych narożnika przegrody.



Rys. 9.16. Rozkład temperatury [°C] w narożu przegrody zewnętrznej uzyskany w następstwie symulacji komputerowej: a), b) złącze 1 - materiały o współczynniku przewodzenia ciepła dla wilgotności względnej 0%, c), d) złącze 2 - materiały o współczynniku przewodzenia ciepła dla wilgotności względnej 65%, e), f) złącze 3 - materiały o współczynniku przewodzenia ciepła dla wilgotności względnej 100%.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Celem pracy w zakresie mechaniki konstrukcji była ocena wpływu częściowego demontażu poszycia przegrody zewnętrznej konstrukcji na stateczność ogólną bryły budynku oraz przeprowadzenie badań nieswobodnego skręcania cienkościennych profili otwartych typu C z uwzględnieniem autorskiego opracowania wkładki usztywniającej.

Zakres realizacji postawionych celów uwzględniał przegląd literatury z przedmiotowej tematyki oraz obejmował przeprowadzenie badań - analiz numeryczno – doświadczalnych, dotyczących przegród zewnętrznych wykonanych w konstrukcji z lekkiego szkieletu stalowego.

W pierwszej części obliczeń numerycznych dotyczącej mechaniki konstrukcji wykazano wpływ demontażu poszycia zewnętrznego na stateczność bryły budynku. Modele numeryczne analizowanych obiektów budowlanych oparte na technologii lekkiego szkieletu stalowego bazowały na cienkościennych elementach o przekroju otwartym typu C90 i C140. Pręty tego typu charakteryzują się stosunkowo małą sztywnością skrętną co sprawia, że są wrażliwe na przestrzenną formę utraty stateczności. Ma to wpływ na stany graniczne nośności i użyteczności konstrukcji. Główną przyczyną przekroczenia stanu granicznego użyteczności analizowanych modeli budynków (rozdział 7) było usunięcie poszycia usztywniającego w części parterowej co znacząco zmniejszyło sztywność konstrukcji. Poprawa sztywności bryły budynku nastąpiła z chwilą zamontowania stężeń ściennych.

Druga część obliczeń numerycznych przeprowadzonych w niniejszej pracy dotyczyła analizy nieswobodnego skręcania otwartych prętów cienkościennych typu C90 i C140 wzmocnionych wkładkami według autorskiego wynalazku. Utworzone modele obliczeniowe posłużyły do oceny korelacyjności przeprowadzonych symulacji nieswobodnego skręcania przez porównanie uzyskanych wyników numerycznych z wynikami eksperymentalnymi przemieszczeń giętno – skrętnych.

Część eksperymentalna dotycząca mechaniki konstrukcji wykazała na przyjętych schematach badawczych, bazujących na ceowych profilach cienkościennych typu C90 i C140 wpływ zastosowania wkładki usztywniającej wykonanej w technologii druku 3D na poprawę sztywności giętno-skrętnej badanych profili. Zadaniem wkładki montażowej jest zwiększenie sztywności profilu w miejscu osadzania stężeń. Konieczność stosowania cięgien stalowych stężających lekkie konstrukcje szkieletowe może wynikać z następstw obciążeń wyjątkowych, których oddziaływanie może doprowadzić do uszkodzenia struktury nośnej bryły budynku. Przedmiotowe rozwiązanie można zastosować również w przypadku konieczności demontażu całego poszycia pierwszej kondygnacji (tak jak w omawianych przykładach numerycznych z rozdziału 7), gdy zachodzi konieczność usunięcia skutków podtopienia budynku. Demontaż i wymiana całości poszycia ma miejsce gdy podtopieniu budynku towarzyszyć będzie ponadto skażenie wody.

Uzyskane wyniki badań numeryczno – doświadczalnych pozwalają sformułować następujące wnioski:

- analizowany w pracy numeryczny model konstrukcji szkieletowej dwukondygnacyjnego budynku bez poszycia usztywniającego w części parterowej przekroczył graniczne wartości przemieszczeń poziomych określonych w normach PN-EN 1990:2004 i PN-EN 1993-1-1:2006 [131, 135];
- zastosowanie autorskiego rozwiązania miejscowego usztywnienia stalowych profili cienkościennych wpływa na zwiększenie sztywności giętno – skrętnej całego profilu;
- samoklinująca się wkładka usztywniająca wykonana w technologii druku 3D jest efektywnym sposobem zwiększenia sztywności nieswobodnego skręcania stalowych profili cienkościennych typu C;
- przeprowadzone badania doświadczalne i numeryczne dla stalowego ceowego profilu cienkościennego wykazały korelacje pomiędzy obliczeniami numerycznymi i wynikami badań doświadczalnych.

Analiza numeryczno – doświadczalna z zakresu fizyki budowli dotyczyła przydatności materiałów przegrody zewnętrznej z chwilą jej zawilgocenia spowodowanego oddziaływaniem wód popowodziowych.

W związku z tym, że istnieje niewiele danych z badań naukowych opisujących wpływ powodzi na konstrukcję przegrody wykonaną w technologii lekkiego szkieletu stalowego, ocena przydatności materiałów stosowanych w obiektach, które mogą być podatne na wody popowodziowe jest utrudniona. Dlatego też przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu wód popowodziowych na późniejsze właściwości cieplno – wilgotnościowe przegród zewnętrznych.

Badania obejmujące zagadnienia z zakresu fizyki budowli koncentrowały się na wpływie na właściwości cieplno – wilgotnościowe, jaki może mieć zanurzenie w wodzie materiałów konstrukcyjnych przegrody zewnętrznej (w wyniku podtopienia budynku) oraz proces ich osuszania. W tym celu program badań eksperymentalnych obejmował wykonanie izoterm sorpcji dla każdego z materiałów wchodzących w skład przegrody zewnętrznej oraz zbadanie ich nasiąkliwości. Wyniki badań sorpcyjności porównano z danymi dostępnymi w bazie programu komputerowego WUFI Pro oraz modelami matematycznymi. Otrzymane wyniki badań sorpcyjności i nasiąkliwości posłużyły do wykonania modelu higrotermicznego w programie WUFI Pro. Przeprowadzona symulacja w zależności od początkowego stanu zawilgocenia przegrody zewnętrznej pozwalała oszacować czas jej wysychania i przydatność do dalszej eksploatacji. Do analizy numerycznej wykorzystano również program Ansys Academic Researcher 2020, w którym określono parametry cieplne narożnika przegrody zewnętrznej dla materiałów zawierający wilgoć będącą pozostałością po wodach popowodziowych.

Uzyskane wyniki analizy pozwoliły stwierdzić, że:

- przeprowadzona symulacja osuszania przegrody w pełni nasyconej wodą i przyjętym 4 letnim okresem suszenia wykazała jej nieprzydatność do dalszej eksploatacji;
- usunięcie z przegrody ocieplenia zewnętrznego i płyty gipsowo - kartonowej nie prowadzi do jej wyschnięcia nawet w 4 letnim okresie osuszania;
- przeprowadzona symulacja osuszania przegrody w pełni nasyconej wodą i przyjętym 4 letnim okresem suszenia wykazała jej nieprzydatność do dalszej eksploatacji;
- przeprowadzona analiza numeryczna potwierdziła, że niezbędny jest demontaż części przegrody zewnętrznej zalanej wodami popowodziowymi i wymiany jej warstw na nowy materiał;
- rezultaty badań izoterm sorpcji dla materiałów analizowanej przegrody zewnętrznej korelują z wynikami uzyskanymi na podstawie opisu matematycznego jak też danych numerycznych;
- analiza mostka cieplnego naroża przegrody zewnętrznej poddanej oddziaływaniu wód popowodziowych wykazała zwiększenie strat ciepła i wzrost zagrożeń mykologicznych.

STRESZCZENIE

Numeryczno – doświadczalna analiza przegród zewnętrznych w konstrukcji z lekkiego szkieletu stalowego

mgr inż. Mariusz Kosiń

**Słowa kluczowe: profile cienkościenne, analiza giętno – skrętna, analiza
cieplno – wilgotnościowa, druk 3D, MES**

W pracy przedstawiono numeryczno-doświadczalną analizę przegród zewnętrznych wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego w następstwie działania wód popowodziowych wymuszających konieczność zdjęcia warstw poszycia oraz wpływu zawilgocenia materiałów przegrody na jej właściwości cieplno-wilgotnościowe. W zakresie podjętego celu pracy wykonano obszerny przegląd najnowszej literatury z przedmiotowej tematyki. Część pierwsza pracy dotycząca mechaniki konstrukcji odnosiła się do wpływu częściowego demontażu poszycia przegrody zewnętrznej konstrukcji na stateczność ogólną bryły budynku oraz badań nieswobodnego skręcania cienkościennych profili otwartych typu C z uwzględnieniem autorskiego opracowania wkładki usztywniającej wykonanej w technologii druku 3D. Wykazano, że opracowana wkładka usztywniająca jest efektywnym sposobem zwiększenia sztywności nieswobodnego skręcania stalowych profili cienkościennych typu C. Druga część pracy z zakresu fizyki budowli dotyczyła wpływu wód popowodziowych na późniejsze właściwości cieplno – wilgotnościowe przegród zewnętrznych. Badania koncentrowały się na ocenie właściwości cieplno – wilgotnościowych materiałów konstrukcyjnych przegrody zewnętrznej zanurzonych w wodzie (w wyniku podtopienia budynku) oraz procesie ich osuszania. Na podstawie przeprowadzonych badań oszacowano czas potrzebny do wyschnięcia i przydatność do dalszej eksploatacji materiałów wchodzących w skład przegrody zewnętrznej.

ABSTRACT

Numerical – experimental analysis of external partitions in a light steel frame construction

MSc Mariusz Kosiń

Key words: thin-walled profiles, analyses of bending –torsion, hygrothermal analysis, 3D printing, FEM

The paper presents a numerical and experimental session of external partitions made in the technology of a light steel skeleton as a result of the action of flood waters forcing layered images and the influence of moisture in the partition materials on its thermal and humidity. In terms of the aim of the work, an extensive review of the latest literature on the subject was made. The first part of the work on the mechanics of the structure referred to the influence of the partial disassembly of the shell of the external partition of the structure on the general stability of the building body and the research of non-free torsion of thin-walled open profiles type C, taking into account the original development of a stiffening insert made in 3D printing technology. It has been shown that the developed stiffening insert is an effective method of increasing the rigidity of torsion of thin-walled steel C-profiles. The second part of the work in the field of building physics concerned the influence of flood waters on the subsequent thermal and moisture properties of external partitions. The research focused on the evaluation of the thermal and humidity properties of the structural materials of the outer partition immersed in water (as a result of flooding the building) and the drying process. On the basis of the conducted tests, the time needed to dry and the suitability for further use of the materials included in the external partition were estimated.

LITERATURA

- [1] Adamowski J., Matkowski Z., 2013. Aktualne problemy osuszania i remontów zalanych i zawilgoconych budynków. *Materiały Budowlane* 3, 2 - 7.
- [2] Ambroziak A., 2016. Autodesk robot structural analysis - wymiarowanie konstrukcji stalowych i żelbetowych - przykłady obliczeń. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk.
- [3] Angelis E., Serra E., 2014. Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia* 45, 362 – 371.
- [4] Ansys Workbench – Mechanical introduction. Thermal Analysis 2015.
- [5] Ansys-Workbench v. 19 system documentation 2019.
- [6] Asphaug S. K., Kvande T., Time B., Peuhkuri R., Kalamees T., Johansson P., Berardi U., Lohne J., 2020. Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. *Building and Environment* 169, 572 – 586.
- [7] Babanali M. B., Shumska L., Leshchenko M., 2018. Heat treatment technology of porous building materials with predictability of thermophysical properties. *International Journal of Engineering & Technology* 7, 501 – 509.
- [8] Bielajew N. M., 1954. Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej Warszawa.
- [9] Billah M., Islam M., Ali R. B., 2019. Cold formed steel structure – an overview. *WSN* 118, 59 - 73.
- [10] Bishara N., Vogelsang S., Plagge R., 2015. Numerical simulation of the hygrothermal behaviour of a new solid wood panel for room temperature control – calibration of the heating curve. *Energy Procedia* 78, 176 – 182.
- [11] Biswas S., Schwen D., Hales J., 2020. Development of a finite element based strain periodicity implementation method. *Finite Elements in Analysis and Design* 179, 436 – 451.
- [12] Black M. M., Semple H. M., 1969. Torsion-bending analysis of continuous thin-walled beams. *International Journal of Mechanical Sciences* 11, 791 – 810.
- [13] Bozsaky D., 2015. Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating. *Procedia Engineering* 123, 68 – 75.
- [14] Brzoska Z., 1965. Statyka i stateczność konstrukcji prętowych cienkościennych. PWN Warszawa.
- [15] Cammerer J., Achtziger J., 1985. Effect of the moisture content on the thermal conductivity of building materials and insulation products. *Kurzberichte aus der Bauforschung Germany*.
- [16] Celik T., Kamali S., 2019. Multidimensional comparison of lightweight steel and reinforced concrete structures - a case study. *Tehnicki Vjesnik* 25, 1234 – 1242.
- [17] Chen W. F., 2000. Structural stability: from theory to practice. *Engineering Structures* 22, 116 – 122.

- [18] Chen Y., Chen Z., 1998. Transfer function method to calculate moisture absorption and desorption in buildings. *Building and Environment* 33, 201-207.
- [19] Chung K., Ho H. C., Wang A. J., 2008. Advances in analysis and design of cold-formed steel structures. *Advances in Structural Engineering* 11, 615 – 632.
- [20] Colinart T., Glouannec P., 2017. Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling. *Energy and Buildings* 139, 360 – 370.
- [21] Colinart T., Glouannec P., Bendouma M., Chauvelon P., 2017. Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 2: Influence on hygrothermal behavior of hemp concrete. *Energy and Buildings* 152, 42 – 51.
- [22] Cunningham M. J., 1988. The moisture performance of framed structures – a mathematical model. *Building and Environment* 23, 123 - 135.
- [23] D’Ayala D., Aktas Y. D., 2016. Moisture dynamics in the masonry fabric of historic buildings subjected to wind-driven rain and flooding. *Building and Environment* 104, 208 – 220.
- [24] Danczyk J., Suresh K., 2013. Finite element analysis over tangled simplicial meshes: Theory and implementation. *Finite Elements in Analysis and Design* 70/71, 57 – 67.
- [25] De P. S., Mahato J. K., Kundu A., Chakraboti P. C., Shome M., 2017. True stress-control ratcheting behaviour of cold-rolled interstitial-free steel sheet. *Mechanics of Materials* 115, 34 – 46.
- [26] Desai P., Katti V., 2017. Bracings as Lateral Load Resisting Structural System. *International Research Journal of Engineering and Technology* 4, 1351 – 1355.
- [27] Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R., 2012. Design of cold-formed steel structures. *The European Convention for Constructional Steelwork Brussels*.
- [28] Dyla A., 2015. *Fizyka cieplna budowli w praktyce*. PWN Warszawa.
- [29] Elkawas A. A., Hassanein M. F., Elchanakani M., 2018. Lateral-torsional buckling strength and behaviour of high-strength steel corrugated web girders for bridge construction. *Thin-Walled Structures* 122, 112- 123.
- [30] Erkmen R. E., Mohareb M., 2006. Torsion analysis of thin-walled beams including shear deformation effects. *Thin-Walled Structures* 44, 1096 – 1108.
- [31] Franco J. M. S., Duarte J. P., Batista E., Landesmann A., 2014. Shape grammar of steel cold-formed sections based on manufacturing rules. *Thin-Walled Structures* 79, 218 – 232.
- [32] Gagarin V. G., Akhmetov V. K., Zubarev K. P., 2018. Mathematical model using discrete-continuous approach for moisture transfer in enclosing construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 463, 1 – 7.

- [33] Gambhir M.L., 2013. Stability analysis and design of structures. Springer New York.
- [34] Garbalińska H., Siwińska A., 2007. Izotermy sorpcji cegły ceramicznej, silikatowej i betonu komórkowego. Fizyka budowli w teorii i praktyce. Czasopismo Naukowe, Sekcja Fizyki Budowli Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN Łódź, 41 – 46.
- [35] Gawin D., 2000. Modelowanie sprzężonych zjawisk cieplno – wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Zeszyty Naukowe. Rozprawy Naukowe Z.279, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź.
- [36] Gawin D., Baggio P., Schrefler B. A., 1996. Modelling heat and moisture transfer with phase changes in building materials. Archives of Civil Engineering 42, 325 - 349.
- [37] Gawin D., Klemm P., 1987. Modele matematyczno sprzężonego przenoszenia masy i energii w ośrodkach kapilarno – porowatych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź.
- [38] Gawin D., Koniorczyk M., 2006. Numerical modelling of coupled heat, moisture and salt transport in porous materials. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, CAMES 13(4), 565 - 574.
- [39] Gawin D., Kossecka E., Künzel H., Radoń J., Więckowska A., Witczak K., Zirkelbach D., 2007. Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach cieplno – wilgotnościowych przegród budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź.
- [40] Gendy B. L., Hanna M. T., 2017. Effect of geometric imperfections on the ultimate moment capacity of cold-formed sigma-shape sections. HBRC Journal 13, 163 – 170.
- [41] Gielsvik A., 1981. The Theory of thin walled bars. Wiley New Jersey.
- [42] Glaser H., 1958. Simplified calculation of vapour diffusion through layered walls involving the formation of water and ice. Kältetechnik 10(11), 358 – 364.
- [43] Gliszczyński A., Kubiak T., Urbaniak M., 2014. Wpływ warunków brzegowych i własności materiałowych na stateczność zginanych belek kompozytowych. Modelowanie Inżynierskie 19(50), 25 - 32.
- [44] Gołaś A., Ryś M., Gajda R., 2011. Badanie własności termoizolacyjnych okien z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Modelowanie Inżynierskie 10(41), 91 - 98.
- [45] Gomulińska E., 1968. Obliczanie cienkościennych elementów budowlanych kształtowanych na zimno z blach stalowych. Arkady Warszawa.
- [46] Gosowski B., 2003. Spatial stability of braced thin-walled members of steel structures. Journal of Constructional Steel Research 59, 839 - 865.
- [47] Gosowski B., 2015. Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław.

- [48] Goto Y., Wakili K. G., Frank T., Stahl T., Ostermeyer Y. Ando N., Wallbaum H., 2012. Heat and moisture balance simulation of a building with vapor - open envelope system for subtropical regions. *Building Simulation* 5, 301 – 314.
- [49] Haba B. Boudenne A., Benzarti K., Agoudjil B., 2017. Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete. *Construction and Building Materials* 154, 963 – 971.
- [50] Hanaor D. A., Gan Y., Einav I., 2016. Static at fractal interfaces. *Tribology International* 93, 229 – 238.
- [51] Hancock G. J., 2003. Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research* 118, 59 – 73.
- [52] Hancock G. J., 2016. Cold-formed steel structures - research review 2013- 2014. *Advances in Structural Engineering* 19, 1 – 16.
- [53] Hartman F., Katz F., 2007. *Structural analysis with finite elements*, Springer Heidelberg.
- [54] Hassanieh A., Valipour H., 2020. Experimental and numerical study of OSB sheathed-LVL stud wall with stapled connections. *Construction and Building Materials* 233, 373 – 389.
- [55] Hattori G., Serpa A. L., 2015. Contact stiffness estimation in ANSYS using simplified models and artificial neural networks. *Finite Elements in Analysis and Design* 97, 43 – 53.
- [56] Hilti, 2017. *Katalog produktów*. Hilti Poland Warszawa.
- [57] Hoła J., Adamowski J., Matkowski Z., 2010. Skuteczność zabezpieczeń przeciwwilgociowych wykonanych w obiekcie zabytkowym. *Materiały Budowlane* 3, 22 - 23.
- [58] Hoła J., 2018. Degradacja budynków zabytkowych wskutek nadmiernego zawilgocenia – wybrane problemy. *Budownictwo i Architektura* 17, 133 - 148.
- [59] Hongisto V., Makila M., Suokas M., 2015. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – the effect of wall construction. *Building and Environment* 85, 309 – 320.
- [60] Hradil P., Talja A., Kurkela J., Fülöp L., Ongelin P., 2017. Evaluation of ductility limits for structural steel design. *Journal of Constructional Steel Research* 135, 1 – 10.
- [61] Huang X., Bai L., Yang J., Wang F., Zhu J., Liu Q., 2019. Distortional-buckling analysis of channel sections with web stiffened by longitudinal ribs subjected to axial compression or bending. *Thin-Walled Structures* 144, 322 – 334.
- [62] Hubner K.H., Dewhrist D. L., Smith D. E., Byrom T. G., 2001. *The finite element method of engineers*. John Wiley & Sons New Jersey.
- [63] Hutchings I., Shipway P., 2017. *Tribology – friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann Oxford.

- [64] Huynh M. T., Pham C. H., Hancock G. J., 2020. Experimental behaviour and modelling of screwed connections of high strength sheet steels in shear. *Thin-Walled Structures* 146, 106 – 119.
- [65] Javidan M.M., Kang H., Isobe D., Kim J., 2018. Computationally efficient framework for probabilistic collapse analysis of structures under extreme actions. *Engineering Structures* 172, 440 – 452.
- [66] Jiang Y., Zevenbergen C., Ma Y., 2018. Urban pluvial flooding and stormwater management - a contemporary review of China's challenges and sponge cities strategy. *Environmental Science and Policy* 80, 132 – 143.
- [67] Judd J., Charney F., 2016. Seismic collapse prevention system for steel-frame buildings. *Journal of Constructional Steel Research* 118, 60 – 75.
- [68] Katalog firmy AmTech, 2010. Opis technologii Sunday System. AmTech sp. z o.o. Głogów Małopolski.
- [69] Kidmann R., Kraus M., 2011. Steel structures. Design using FEM. Ernst & Sohn Berlin.
- [70] Koci V., Vejmelkova E., Cachova M., Konakova D., Keppert M., Madera J., Cerny R., 2016. Effect of moisture content on thermal properties of porous building materials. *International Journal of Thermophysics* 38, 28 – 40.
- [71] Koelner, 2015. Katalog techniczny. Koelner S.A. Wrocław.
- [72] Kohonen R., 1984. Method of analyze the transient hygrothermal behaviour of building material and components. Technical Research Center of Finland Helsinki.
- [73] Kosiń M., Major I., Major M., Kalinowski J., 2020. Model tests of bending and torsional deformations of thin-walled profiles stiffened with elements made in 3D printing technology. *Case Studies in Construction Materials* 13, 401 – 422.
- [74] Kosiń M., Major M., 2017. Numerical thermal analysis of the vertical external partition made as the frame thin-walled steel structure. *MATEC Web of Conferences* 107 Trstena, 47 – 55.
- [75] Kosiń M., Major M., Kalinowski J., 2017. Wkładka usztywniająca, zwłaszcza cienkościennych profili typu C. PL423102. Urząd Patentowy RP.
- [76] Kothandaraman C. P., 2006. Fundamentals of heat and mass transfer. New Age International Delhi.
- [77] Krześciński G., Zagrajek T., Marek P., Borkowski P., 2015. Metoda elementów skończonych w mechanice materiałów i konstrukcji. Rozwiązywanie zagadnień za pomocą systemu Ansys. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- [78] Kubik J., 2000. Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej Opole.
- [79] Kubik J., Kucharczyk A., 2007. Przepływ wilgoci w zasolonych ścianach. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź.
- [80] Kubik J., Świrska J., 2003. Wpływ temperatury na efektywny współczynnik dyfuzji pary wodnej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź.

- [81] Künzle H., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building materials. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.
- [82] Künzle H., Radon J., Holm A., Schmidt T., Zirkelbach D., 2003. WUFI-pro – handbuch. IBP Holz-kirchen Valley.
- [83] Künzle H., Radoń J., Holm A., 2001. Hygrothermal design of construction assemblies with WUFI – a tool for architects and engineers. VIII Polska Konferencja Naukowo-Techniczna – Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce Łódź, 467 - 476.
- [84] Kurzawa Z., Rzeszut K., Szumigła M., 2015. Stalowe konstrukcje prętowe część III. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań.
- [85] Lacey A. W., Chen W., Hao H., Bi K., 2017. Structural response of modular buildings – An overview. *Journal of Building Engineering* 16, 45 – 56.
- [86] Laim L., Rodrigues J. P., Silva L. S., 2013. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures* 72, 1 - 13.
- [87] Lavine A. S., Bergman T. L., Incropera F. P., 2011. Fundamentals of heat and mass transfer - 7th Edition. John Wiley & Sons New Jersey.
- [88] Lawson R. M., Popo-Ola S. O., Way A., Heatley T., Pedreschi R., 2010. Durability of light steel framing in residential applications. ICE Publishing, 109 – 121.
- [89] Lazarević A. J., Uroš M., Čengija A., 2017. Fundamental models of structural stability. *The Mining Geology Petroleum Engineering Bulletin*, 37 – 47.
- [90] Leimer H., 2016. Thermal physics of buildings. Hanser Publications Cincinnati.
- [91] Li W., Ma H., 2020. A nonlinear cross-section deformable thin-walled beam finite element model with high-order interpolation of warping displacement. *Thin-Walled Structures* 152, 748 – 767.
- [92] Li Y. L., Li Y. Q., Shen Z. Y., 2016. Investigation on flexural strength of cold-formed thin-walled steel beams with built-up box section. *Thin-Walled Structures* 107, 66 – 79.
- [93] Ling J. Y., Kong S. L., De'nan F., 2015. Numerical study of buckling behaviour of cold-formed C-channel steel purlin with perforation. *Procedia Engineering* 125, 1135 – 1141.
- [94] Liu X., Bradford M. A., Chen Q., Ban H., 2016. Finite element modelling of steel–concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors. *Finite Elements in Analysis and Design* 108, 54 – 65.
- [95] Logan D. L., CL Engineering, 2016. First course in the finite element method. Cengage Boston.
- [96] LSK, 2008. European lightweight steel-framed construction. LSK and Arcelor publication Luxemburg.
- [97] Lu. B., Li D. Tian X., 2015. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing. *Engineering* 1, 85 – 89.

- [98] Łączek S., 2012. Przykłady analizy konstrukcji w systemowe Ansys Workbench v. 12.1. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej Kraków.
- [99] Madsen J., 2005. Which is the better building material? Concrete or steel? *Buildings Magazines* 99, 62 – 64.
- [100] Major M., Kosiń M., 2016. Lekkie konstrukcje stalowe w budownictwie mieszkaniowym [W:] *Materiały i technologie ekologiczne w budownictwie*, Ulewicz M., Repelewicz A., (red.) Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 92 – 105.
- [101] Major M., Kuliński K., 2015. Comparative numerical analysis of advertising board tower using Adina and Autodesk Robot Structural analysis. *Transactions of the VSB. Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series* 15, 1 – 10.
- [102] Major M., Major I., Kalinowski J., Kosiń M., 2018. Analysis of a selected node of a truss made of cold-rolled sections based on the finite element method. *Transactions of the VSB. Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series* 18, 20 - 24.
- [103] Major M., Major I., Kosiń M., 2017. Numerical static analysis of the curtain wall with light steel structure. *Transactions of the VSB. Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series* 17, 43 – 50.
- [104] Marsh K., 2014. *Autodesk Robot Structural Analysis professional 2015 – essentials*. Marsh API LLC New York.
- [105] Mazzorana B., Simoni S., Scherer C., Gems B., Fuchs S., Keiler M., 2014. A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrology Earth System Sciences* 18, 3817 – 3836.
- [106] McMills A., 2017. *3D printing basics for entertainment design*. Taylor & Francis Ltd Florida.
- [107] Mendera Z., 1969. Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Budownictwo Lądowe* 33, 188 – 197.
- [108] Mendes N., Fernandes C. P., Philippi P. C., Lamberts R., 2001. Moisture content influence on thermal conductivity of porous building materials. *Building Simulation. 7th International IBPSA Conference. Rio de Janeiro*, 957 – 963.
- [109] Moaveni S., 2015. *Finite element analysis - theory and applications with Ansys*. Paerson Education London.
- [110] Moghaddam B., Mostaghim Z. S., 2013. A numerical method based on finite difference for solving fractional delay differential equations. *Journal of Taibah University for Science* 7, 120 – 127.
- [111] Mortazavi M., Sharafi P., Kildshti K., Samali B., 2020. Prefabricated hybrid steel wall panels for mid-rise construction in seismic regions. *Journal of Building Engineering* 27, 942 – 951.
- [112] Munteanu C., Tamas-Gavera D. R., Cobirzan N., Aciu C., Fernea R., Demeter L. D., 2017. Study on the acoustic rehabilitation of an educational building. *Procedia Engineering* 181, 131 – 138.

- [113] Murawski L., von Doan D., Szeleziński A., Mus A., 2017. Metoda elementów skończonych w modelowaniu cienkościennych konstrukcji okrętowych. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka* 12, 99 – 109.
- [114] Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D., 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B* 143, 172 – 196.
- [115] Nicolai A., 2011. Towards a Semi-Generic Simulation Framework for Mass and Energy Transport in Porous Materials. 9th Nordic Symposium on Building Physics. Tampere, 559 - 566.
- [116] Pan Chi_Ling, 2004. Prediction of the strength of bolted cold-formed channel section in tension. *Thin-Walled Structures* 42, 1177 – 198.
- [117] Pashechko M., Latos A., 2015. Beam-to-column connection calculations using Robot Software. *Advances in Science and Technology Research Journal* 9, 45 – 49.
- [118] Patoka K., 2013. Paroprzepuszczalność czy dyfuzja, czyli jak określić wysoką paroprzepuszczalność MWK. *Izolacje* 4, 73 – 78.
- [119] Pawłowski K., 2013. Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle nowych warunków technicznych dotyczących budynków. Wydawnictwo Medium Warszawa.
- [120] Pawłowski K., 2016. Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Grupa Medium Warszawa.
- [121] Pawłowski K., 2017. Wpływ usytuowania ocieplenia od wewnątrz na parametry fizykalne złączy budowlanych, *Izolacje* 3, 50 – 52.
- [122] Perré P., Challansonnex A., Colin J., 2019. On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 133, 968 – 975.
- [123] Piechnik S., 2000. Pręty Cienkościenne – otwarte. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej Kraków.
- [124] Pleinert H., Sadouki H., Wittmann F. H., 1988. Determination of moisture distributions in porous building materials by neutron transmission analysis. *Materials and Structures* 31, 218 – 224.
- [125] Płoński W., 1968. Problem wilgoci w przegrodach budowlanych. Arkady Warszawa.
- [126] PN – EN 12087:2013-7. Określenie nasiąkliwości wodą przy długotrwałym zanurzeniu. Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie.
- [127] PN – EN 1993-1-5:2008/NA:2010. Projektowanie konstrukcji stalowych Część 5:Blachownice.
- [128] PN-B-03200:1990/Az3:1995. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [129] PN-B-03207:2002. Konstrukcje stalowe. Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno. Projektowanie i wykonanie.
- [130] PN-EN 12831-1:2017-08. Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.

- [131] PN-EN 1990:2004/NA:2010. Eurokod 0. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [132] PN-EN 1991-1-1:2004/NA:2010. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1. Oddziaływania ogólne - Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [133] PN-EN 1991-1-3:2005/NA:2010. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3. Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.
- [134] PN-EN 1991-1-4:2008/NA:2010. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4. Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru.
- [135] PN-EN 1993-1-1:2006/A1:2014-07. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [136] PN-EN 1993-1-3:2008/NA:2010. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [137] PN-EN ISO 12570:2002. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych - Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze.
- [138] PN-EN ISO 12571:2013-12. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych.
- [139] PN-EN ISO 13788:2013-05. Ciepłno – wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowa. Metody obliczania.
- [140] PN-EN ISO 6946:2008. Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- [141] Radoń J., Holm A., 2007. Model obliczeniowy i analiza kształtowania się mikroklimatu pomieszczeń za pomocą programu komputerowego WUFI Plus. Ciepłownictwo – Ogrzewnictwo – Wentylacja 11, 63 – 64.
- [142] Radoń J., Pazold M., Herkel S., Antrettel F., Burhene S., 2011. Integration of HVAC models into a hygrothermal whole building simulation tool. Proceedings of building simulation. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association Sydney, 1777 - 1783.
- [143] Rashid K., Haq E. U., Kamran M. S., Munir N., Shahid A., 2019. Experimental and finite element analysis on thermal conductivity of burnt clay bricks reinforced with fibers. Construction and Building Materials 221, 190 – 199.
- [144] Rashidi S., Esfahani J. A., Karimi N., 2018. Porous materials in building energy technologies. A review of the applications, modelling and experiments. Renewable and Sustainable Energy Reviews 91, 229 – 247.
- [145] Rawska-Skotniczy A., 2014. Obciążenia budynków i konstrukcji budowlanych według Eurokodów. PWN Warszawa.
- [146] Restrepo J. I., Bersofsky A. M., 2011. Performance characteristics of light gage steel stud partition walls. Thin-Walled Structures 49, 317 – 324.

- [147] Rinchen, Rasmussen K. J., 2019. Numerical modelling of cold-formed steel single C-section portal frames. *Journal of Constructional Steel Research* 158, 143 - 155.
- [148] Roure, F., 2011. Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin-Walled Structures* 49, 167 – 184.
- [149] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2002 r., Nr 75, poz. 690.
- [150] Sani M. S. H., Osman A. R., Muftah F., 2019. A review and development of cold-formed steel channel columns with Oriented Strand Board sections. *Materials Today: Proceedings* 17, 1078 – 1085.
- [151] Schafer B. W., 2019. Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design. *Thin-Walled Structures* 140, 533 – 541.
- [152] Schafer B. W., Adany S., 2014. Generalized constrained finite strip method for thin-walled members with arbitrary cross-section: primary modes. *Thin-Walled Structures* 84, 150 – 159.
- [153] Schafer B., 2011. Cold - formed steel structures around the world, a review of recent advances in applications, analysis and design. *Steel Construction* 4, 141 – 149.
- [154] Schafer, B.W., Peköz, T., 1999. Laterally Braced Cold-Formed Steel Flexural Members with Edge Stiffened Flanges. *Journal of Structural Engineering* 125(2) , 118-127.
- [155] Shahpari S. Z., Hematiyan R., 2013. Closed-form solutions for torsion analysis of structural beams considering web-flange junctions fillets. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 51(2), 393 – 407.
- [156] Silvestre N., Camotim D., 2010. On the mechanics of distortion in thin-walled open sections. *Thin-Walled Structures* 48, 469 – 481.
- [157] Siwińska A., Garbalińska H., 2007. Izotermy sorpcji materiałów na spoiwie cementowym. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym* 4, 349 – 354.
- [158] Skrzat A., 2014. Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów mechaniki ciała stałego i przepływów ciepła w programie ANSYS Workbench. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [159] Szczerek M., Wiśniewski M., 2000. *Tribologia i tribotechnika*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Radom.
- [160] Szymczyk C., 2011. Stability and initial post-buckling behaviour of frame system with vertical bracings. *Thin-Walled Structures* 49, 669 – 673.
- [161] Taranau G., Bunea G., Olteanu-Dontov I., Venghic M., Ovidiu-Toma I., 2019. Stability analysis of a scaled-down cold-formed steel structure. 15th Computational Civil Engineering Conference Iasi. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 586, 3 – 11.
- [162] The Committee on Light-gauge Steel Structures, 2004. The Japan Iron and Steel Federation and Steel-Framed House Association. *Steel Construction Today & Tomorrow Japan*.

- [163] Theodosiou T. G., Tsikaloudaki A. G., . Kontoleon K. J., 2015. Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades. *Energy and Buildings* 109, 377 – 384.
- [164] Trouncer A. N., Rasmussen K. J. R., 2016. Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 1: Experimental investigations. *Journal of Constructional Steel Research* 124, 57 – 76.
- [165] Tudiwer D., Teichmann F., Korjenic A., 2019. Thermal bridges of living wall systems. *Energy & Buildings* 205, 522 – 529.
- [166] Ungureanu V., 2010. Sustainable detached family house — case study. *Steel Construction* 3, 154 – 162.
- [167] Vasil'ev G. P., Lichman V. A., Peskov N. V., Semendyaeva N. L., 2015. Numerical modelling of heat and moisture diffusion in porous materials. *Computational Mathematics and Modelling* 26, 501 – 513.
- [168] Vlasov V. Z., 1959. Tonkostennyye uprugie sterzni. GIFML Moskwa.
- [169] Vries de D. A., 1987. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. *Journal of heat and mass transfer* 30, 1343 - 1350.
- [170] Wael A. Altabay, 2017. Using ANSYS for Finite Element Analysis. Momentum Press New York.
- [171] Wan H., Xu X., Gao J. J., Li A., 2017. A Moisture penetration depth model of building hygroscopic material. *Procedia Engineering* 205, 3235 – 3242.
- [172] Wang L., Young B., 2017. Design of cold-formed steel built-up sections with web perforations subjected to bending. *Thin-Walled Structures* 120, 458 – 469.
- [173] Watson K., 2005. Steel framed housing. National Association of Steel-framed Housing Inc. Australia.
- [174] Way L., Popo-Ola S., Biddle A., Lawson R. M., 2009. Durability of light steel framing in residential building. The Steel Construction Institute Berkshire.
- [175] Winter G., 1970. Commentary on the 1968 edition off the specification for the design of cold-formed steel structural members. American Iron and Steel Institute New York.
- [176] Wkręt–Met. Techniki zamocowań. Katalog 2018. Klimas Wkręt–Met Sp. z o.o. Kuźnica Kiedrzyńska.
- [177] Wójcik R., 2010. Porady praktyczne dla powodzi na przykładzie z Wilkowa. *Materiały Budowlane* 7, 89 – 93.
- [178] Wójcik R., 2010. Stan wilgotnościowy budynków drewnianych w Wilkowie trzy miesiące po powodzi. *Materiały Budowlane* 10, str. 65 – 68.
- [179] Wyrwał J., 2004. Termodynamiczne podstawy fizyki budowli. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej Opole.
- [180] Wyrwał J., Świrska J., 1988. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Warszawa.

- [181] Xiaolin Chen, Yijun L., 2014. Finite element modeling and simulation with Ansys Workbench, CRC Press Ohio.
- [182] Yin L., Feng B., 2018. Response of cold-formed steel storage racks with spine bracings using speed-lock connections with bolts I: static elastic-plastic pushover analysis. *Thin-Walled Structures* 125, 51 - 62.
- [183] Yu, C., Schafer, B. W., 2007. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 581 – 590.
- [184] Zhang X., Rasmussen K. J. R., Zhang H., 2015. Structural modelling of cold-formed steel portal frames. *Structures* 4, 56 – 68.
- [185] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z., 2017. *The Finite Element Method – its basis and fundamentals* 7th Edition. Butterworth-Heinemann Oxford.
- [186] Żmuda J., 2013. *Konstrukcje wsporcze dźwignic*. PWN Warszawa.
- [187] Żółtowski W., Król P. 2000. *Zasady projektowania konstrukcji z profili cienkościennych Lindab „Z” i „C” - Poradnik projektanta*. Lindab Sp. z o.o. Warszawa.

ZAŁĄCZNIK 1

I. ZESTAWIENIE OBCIĄŻEŃ DLA BUDYNKU Z PROFILI C90

1.1. Obciążenia stałe

Tabela Z-1.1. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C90 - dach.

| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Dachówka bitumiczna 0,1 [kN/m ²] | 0,1 | 1,35 | 0,135 |
| 2 | Papa asfaltowa 0,1 [kN/m ²] | 0,1 | 1,35 | 0,135 |
| 3 | Płyta OSB 0,012 m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 4 | Profil stalowy C90 - 0,020 [kN/m] | 0,02 | 1,35 | 0,027 |
| 5 | Wełna mineralna gr. 0,09m - 1,4 [kN/m ³] | 0,126 | 1,35 | 0,170 |
| 6 | Dodatkowa wełna mineralna gr. 0,10 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,14 | 1,35 | 0,189 |
| 7 | Paroizolacja | - | - | - |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie stalowym gr. 0,0125 m - 15 [kN/m ³] | 0,188 | 1,35 | 0,254 |
| | Suma | 0,836 | | 1,129 |

Tabela Z-1.2. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C90 - poddasze

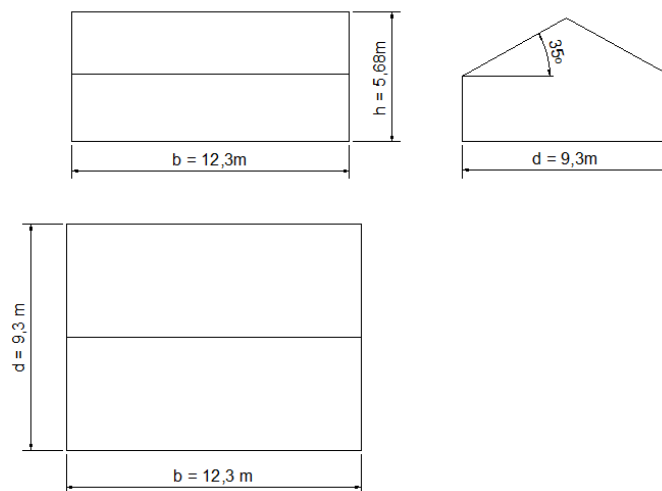
| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Płyta OSB gr. 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 2 | Profil stalowy C90 - 0,020 [kN/m] | 0,020 | 1,35 | 0,027 |
| 3 | Wełna mineralna gr. 0,09 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,126 | 1,35 | 0,170 |
| 4 | Paroizolacja | - | - | - |
| 5 | Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie stalowym gr. 0,0125 m - 15 [kN/m ³] | 0,188 | 1,35 | 0,254 |
| | Suma | 0,496 | | 0,670 |

Tabela Z-1.3. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C90 – ściany zewnętrzne.

| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Tynk cienkowarstwowy gr. 0,005 m - 16 [kN/m ³] | 0,08 | 1,35 | 0,108 |
| 2 | Wełna mineralna gr. 0,16 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,224 | 1,35 | 0,302 |
| 3 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | - | - | - |
| 5 | Profil stalowy C90 - 0,028 [kN/m] | 0,028 | 1,35 | 0,038 |
| 6 | Wełna mineralna gr. 0,09 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,126 | 1,35 | 0,170 |
| 7 | Folia paroizolacyjna | - | - | - |
| 8 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 9 | Płyta gipsowo - kartonowa gr. 0,0125 m - 12 [kN/m ³] | 0,15 | 1,35 | 0,203 |
| | Suma | 0,932 | | 1,258 |

1.2. Obciążenie śniegiem

Budynek o rzucie 9,3 m x 12,3 m, z dachem dwuspadowym o kącie nachylenia połaci dachowej 35°, i całkowitej wysokości budynku 5,68 m. Budynek zlokalizowany w Częstochowie leżącej w II strefie obciążenia śniegiem na wysokości 253 m n. p. m – teren normalny.



Rys. Z-1.1. Charakterystyczne wymiary budynku.

1. Wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu s_k .

$$s_k = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

2. Współczynnik kształtu dachu μ_1 .

$$\mu_1 = 0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30$$

$$\mu_1 = 0,667$$

α – kąt nachylenia dachu

3. Współczynnik ekspozycji C_e terenu.

$$C_e = 1$$

4. Współczynnik termiczny C_t .

$$C_t = 1$$

5. Obciążenie śniegiem dachu s .

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \text{ kN/m}^2$$

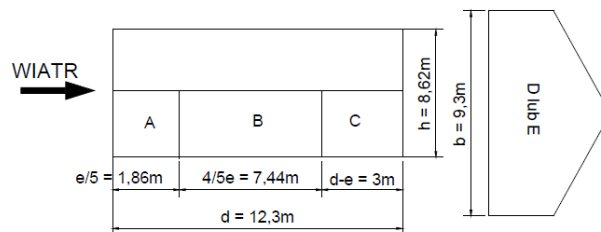
$$s = 0,600 \text{ kN/m}^2$$

1.3. Obciążenie wiatrem

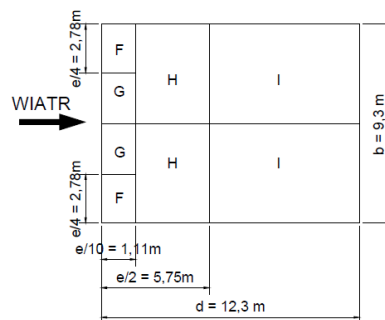
Budynek o rzucie 9,3 m x 12,3 m, z dachem dwuspadowym o kącie nachylenia połaci dachowej 35° , wysokości ścian równej 2,8 m i całkowitej wysokości budynku 5,68 m. Budynek zlokalizowany w Częstochowie leżącej w I strefie obciążenia wiatrem na wysokości 253 m n.p.m. Teren zakwalifikowany jest do kategorii III o wysokości chropowatości $z_0=0,3$ m. Rozważono dwa przypadki obciążenia wiatrem:

- WARIANT I – wiatr wieje równoległe do kalenicy (rys. Z-1.2),
- WARIANT II – wiatr wieje prostopadle do kalenicy (rys. Z-1.3).

a)

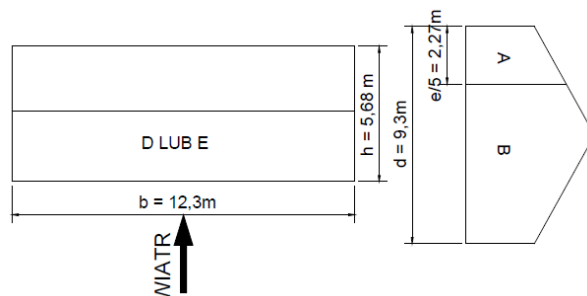


b)

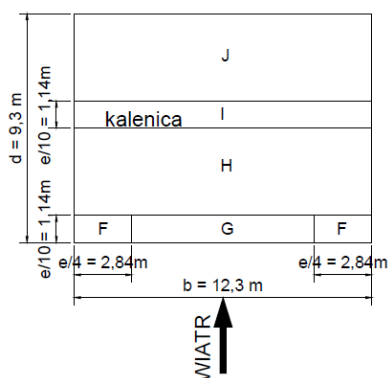


Rys. Z-1.2 Wiatr wiejący równoległe do kalenicy: a) oznaczenia ścian pionowych, b) oznaczenia dachu.

a)



b)



Rys. Z-1.3. Wiatr wiejący prostopadle do kalenicy: a) oznaczenia ścian pionowych, b) oznaczenia dachu.

Tabela Z-1.4. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku dla wariantu I.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru równoległy do kalenicy. Stosunek $h/d = 0,46$. | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pole | A | B | C | D | E |
| $c_{pe,10}$ | -1,2 | -0,8 | -0,5 | 0,73 | -0,36 |
| $w_{e,10}$ | -0,590 | -0,394 | -0,246 | 0,359 | -0,177 |
| $c_{pe,1}$ | -1,4 | -1,1 | -0,5 | 1 | -0,42 |
| $w_{e,1}$ | -0,689 | -0,541 | -0,246 | 0,492 | -0,207 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,098 | | | - | 0,098 |
| $w_i(c_{pi} = -0,3)$ | - | - | - | -0,148 | - |
| $w_{net,10}$ | -0,689 | -0,492 | -0,344 | 0,507 | -0,276 |

Tabela Z-1.5. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku dla wariantu I.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku. Kierunek wiatru równoległy do kalenicy. Kąt nachylenia połaci 35°. | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Pole | F | G | H | I |
| $c_{pe,10}$ | -1,1 | -1,4 | -0,833 | -0,5 |
| $w_{e,10}$ | -0,541 | -0,689 | -0,410 | -0,246 |
| $c_{pe,1}$ | -1,5 | -2 | -1,2 | -0,5 |
| $w_{e,1}$ | -0,738 | -0,984 | -0,590 | -0,246 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | | |
| $w_{net,10}$ | -0,651 | -0,799 | -0,520 | -0,356 |

Tabela Z-1.6. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku dla wariantu II.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru prostopadły do kalenicy. Stosunek h/d = 0,61. | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Pole | A | B | D | E |
| $c_{pe,10}$ | -1,2 | -0,8 | 0,75 | -0,4 |
| $w_{e,10}$ | -0,590 | -0,394 | 0,369 | -0,197 |
| $c_{pe,1}$ | -1,4 | -1,1 | 1 | -0,479 |
| $w_{e,1}$ | -0,689 | -0,541 | 0,492 | -0,236 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,098 | | - | 0,110 |
| $w_i(c_{pi} = -0,3)$ | - | - | -0,164 | - |
| $w_{net,10}$ | -0,689 | -0,548 | 0,596 | -0,372 |

Tabela Z-1.6. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku dla wariantu II.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru prostopadły do kalenicy. Kąt nachylenia połaci 35°. | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pole | F | G | H | I | J |
| $C_{pe,10}$ | -0,333 | -0,033 | -0,133 | -0,333 | -0,433 |
| | 0,7 | 0,7 | 0,613 | 0 | 0 |
| $W_{e,10}$ | -0,164 | -0,016 | -0,065 | -0,164 | -0,213 |
| | 0,344 | 0,344 | 0,302 | 0,000 | 0,000 |
| $C_{pe,1}$ | -1 | -1 | -0,133 | -0,33 | -0,433 |
| | 0,7 | 0,7 | 0,613 | 0 | 0 |
| $W_{e,1}$ | -0,492 | -0,492 | -0,065 | -0,162 | -0,213 |
| | 0,344 | 0,344 | 0,302 | 0,000 | 0,000 |
| $w_i(C_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | | | |
| $w_i(C_{pi} = -0,3)$ | -0,164 | | | | |
| $W_{net,10}$ | -0,128 | -0,128 | -0,117 | -0,227 | -0,282 |
| | 0,000 | 0,148 | 0,099 | 0,000 | -0,049 |
| | 0,234 | 0,234 | 0,192 | -0,110 | -0,110 |
| | 0,508 | 0,508 | 0,466 | 0,164 | 0,164 |

II. ZESTAWIENIE OBCIĄŻEŃ DLA BUDYNKU Z PROFILI C140

2.1. Obciążenia stałe

Tabela Z-1.7. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C140 - dach.

| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Dachówka bitumiczna 0,1 [kN/m ²] | 0,1 | 1,35 | 0,135 |
| 2 | Papa asfaltowa 0,1 [kN/m ²] | 0,1 | 1,35 | 0,135 |
| 3 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 4 | Profil stalowy C140 - 0,028 [kN/m] | 0,028 | 1,35 | 0,038 |
| 5 | Wełna mineralna gr. 0,12 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,168 | 1,35 | 0,227 |
| 6 | Dodatkowa wełna mineralna gr. 0,10 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,14 | 1,35 | 0,189 |
| 7 | Paroizolacja | - | - | - |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie stalowym gr. 0,0125 m - 15 [kN/m ³] | 0,188 | 1,35 | 0,254 |
| | Suma | 0,886 | | 1,196 |

Tabela Z-1.8. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C140 - poddasze.

| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 2 | Profil stalowy C140 - 0,028 [kN/m] | 0,028 | 1,35 | 0,038 |
| 3 | Wełna mineralna gr. 0,14 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,196 | 1,35 | 0,265 |
| 4 | Paroizolacja | - | - | - |
| 5 | Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie stalowym gr. 0,0125 m - 15 [kN/m ³] | 0,188 | 1,35 | 0,254 |
| | Suma | 0,574 | | 0,775 |

Tabela Z-1.9. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C140 - strop.

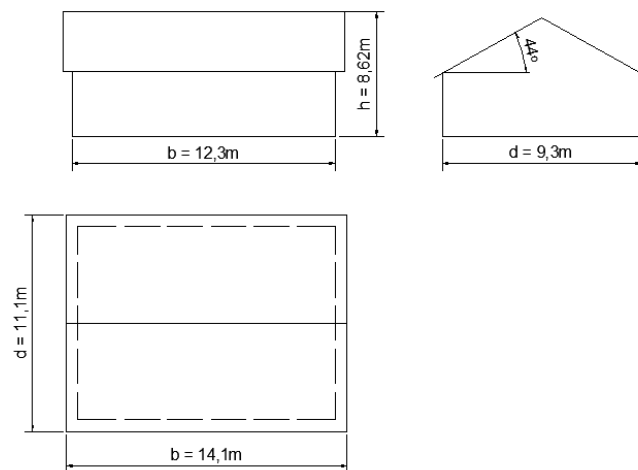
| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Parkiet dębowy gr. 0,02m - 7 [kN/m ³] | 0,14 | 1,35 | 0,189 |
| 2 | Jastrych cementowy 0,05 m - 21[kN/m ³] | 1,05 | 1,35 | 1,418 |
| 3 | Folia PE | - | - | - |
| 4 | Styropian EPS gr. 0,05 m - 0,45[kN/m ³] | 0,023 | 1,35 | 0,031 |
| 5 | Folia PE | - | - | - |
| 6 | Płyta OSB 0,02m - 6,5 [kN/m ³] | 0,13 | 1,35 | 0,175 |
| 7 | Profil stalowy C140 - 0,028 [kN/m] | 0,028 | 1,35 | 0,038 |
| 8 | Wełna mineralna gr. 0,14 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,196 | 1,35 | 0,265 |
| 9 | Płyta gipsowo - kartonowa na ruszcie stalowym gr. 0,0125 m - 15 [kN/m ³] | 0,188 | 1,35 | 0,254 |
| | Suma | 1,895 | | 2,558 |

Tabela Z-1.10. Zestawienie obciążeń dla budynku z profili C140 – ściany zewnętrzne.

| Lp. | Rodzaj obciążenia | Obciążenie charakterystyczne [kN/m ²] | Współczynnik obciążenia γ_f [-] | Obciążenie obliczeniowe [kN/m ²] |
|-----|--|---|--|--|
| 1 | Tynk cienkowarstwowy gr. 0,005 m - 16 [kN/m ³] | 0,08 | 1,35 | 0,108 |
| 2 | Wełna mineralna gr. 0,16 m 1,4[kN/m ³] | 0,224 | 1,35 | 0,302 |
| 3 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | - | - | - |
| 5 | Profi stalowy C140 - 0,028 [kN/m] | 0,028 | 1,35 | 0,038 |
| 6 | Wełna mineralna gr. 0,14 m - 1,4 [kN/m ³] | 0,196 | 1,35 | 0,265 |
| 7 | Folia paroizolacyjna | - | - | - |
| 8 | Płyta OSB 0,012m - 6,5 [kN/m ³] | 0,078 | 1,35 | 0,105 |
| 9 | Płyta gipsowo - kartonowa gr. 0,0125 m - 12 [kN/m ³] | 0,15 | 1,35 | 0,203 |
| | Suma | 1,002 | | 1,353 |

2.2. Obciążenie śniegiem

Budynek o rzucie 9,3 m x 12,3 m, z dachem dwuspadowym o kącie nachylenia połaci dachowej 44°, i całkowitej wysokości budynku 8,62 m. Okap dachu wystaje poza obrys budynku 0,9m. Budynek zlokalizowany w Częstochowie leżącej w II strefie obciążenia śniegiem na wysokości 253 m n. p. m – teren normalny.



Rys. Z-1.4. Charakterystyczne wymiary budynku.

1. Wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu s_k .

$$s_k = 0,9 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

2. Współczynnik kształtu dachu μ_1 .

$$\mu_1 = 0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30$$

$$\mu_1 = 0,427$$

α – kąt nachylenia dachu

3. Współczynnik ekspozycji C_e terenu.

$$C_e = 1$$

4. Współczynnik termiczny C_t .

$$C_t = 1$$

5. Obciążenie śniegiem dachu s .

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \text{ kN/m}^2$$

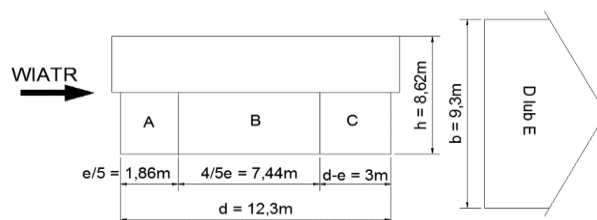
$$s = 0,384 \text{ kN/m}^2$$

2.3. Obciążenie wiatrem

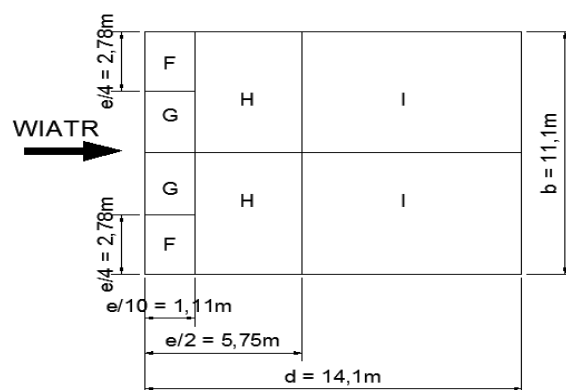
Budynek o rzucie 9,3 m x 12,3 m, z dachem dwuspadowym o kącie nachylenia połaci dachowej 44° , wysokości ścian równej 4,05 m i całkowitej wysokości budynku 8,62m. Okap dachu wystaje poza obrys budynku 0,9 m. Budynek zlokalizowany w Częstochowie leżącej w I strefie obciążenia wiatrem na wysokości 253 m n.p.m. Teren zakwalifikowany jest do kategorii III o wysokości chropowatości $z_0=0,3$ m. Rozważono dwa przypadki obciążenia wiatrem:

- WARIANT I – wiatr wieje równoległe do kalenicy (rys. Z-1.5),
- WARIANT II – wiatr wieje prostopadłe do kalenicy (rys. Z-1.6).

a)

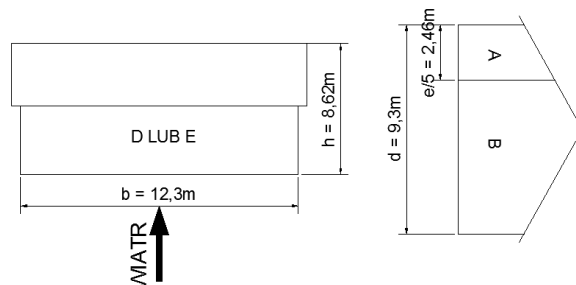


b)

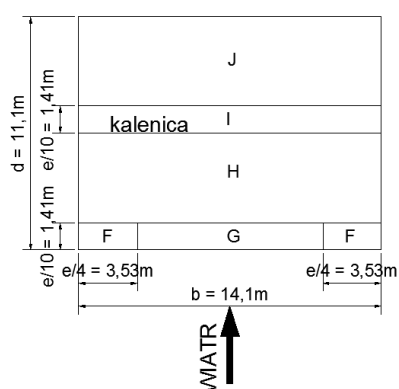


Rys. Z-1.5. Wiatr wiejący równoległe do kalenicy: a) oznaczenia ścian pionowych, b) oznaczenia dachu.

a)



b)



Rys. Z-1.6. Wiatr wiejący prostopadle do kalenicy: a) oznaczenia ścian pionowych, b) oznaczenia dachu.

Tabela Z-1.11. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku dla wariantu I.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru równoległy do kalenicy. Stosunek $h/d = 0,7$. | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pole | A | B | C | D | E |
| $c_{pe,10}$ | -1,2 | -0,8 | -0,5 | 0,76 | -0,42 |
| $w_{e,10}$ | -0,658 | -0,438 | -0,274 | 0,416 | -0,230 |
| $c_{pe,l}$ | -1,4 | -1,1 | -0,5 | 1 | -0,42 |
| $w_{e,l}$ | -0,767 | -0,603 | -0,274 | 0,548 | -0,230 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | | - | 0,110 |
| $w_i(c_{pi} = -0,3)$ | - | - | - | -0,164 | - |
| $w_{net,10}$ | -0,767 | -0,548 | -0,384 | 0,581 | -0,340 |

Tabela Z-1.12. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku dla wariantu I.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku. Kierunek wiatru równoległy do kalenicy. Kąt nachylenia połaci 44°. | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Pole | F | G | H | I |
| $c_{pe,10}$ | -1,1 | -1,4 | -0,906 | -0,5 |
| $w_{e,10}$ | -0,603 | -0,767 | -0,496 | -0,274 |
| $c_{pe,1}$ | -1,5 | -2 | -1,2 | -0,5 |
| $w_{e,1}$ | -0,822 | -1,096 | -0,658 | -0,274 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | | |
| $w_{net,10}$ | -0,713 | -0,877 | -0,606 | -0,384 |

Tabela Z-1.13. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku dla wariantu II.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru prostopadły do kalenicy. Stosunek h/d = 0,92. | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Pole | A | B | D | E |
| $c_{pe,10}$ | -1,2 | -0,8 | 0,789 | -0,479 |
| $w_{e,10}$ | -0,658 | -0,438 | 0,432 | -0,262 |
| $c_{pe,1}$ | -1,4 | -1,1 | 1 | -0,479 |
| $w_{e,1}$ | -0,767 | -0,603 | 0,548 | -0,262 |
| $w_i(c_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | - | 0,110 |
| $w_i(c_{pi} = -0,3)$ | - | - | -0,164 | - |
| $w_{net,10}$ | -0,767 | -0,548 | 0,596 | -0,372 |

Tabela Z-1.14. Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem dachu budynku dla wariantu II.

| Współczynniki ciśnienia i wartości charakterystyczne obciążenia wiatrem ścian budynku. Kierunek wiatru prostopadły do kalenicy. Kąt nachylenia połaci 44°. | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pole | F | G | H | I | J |
| $C_{pe,10}$ | -0,033 | -0,033 | -0,013 | -0,213 | -0,313 |
| | 0,7 | 0,7 | 0,613 | 0 | 0 |
| $W_{e,10}$ | -0,018 | -0,018 | -0,007 | -0,117 | -0,172 |
| | 0,384 | 0,384 | 0,336 | 0,000 | 0,000 |
| $C_{pe,1}$ | -0,1 | -0,1 | -0,013 | -0,213 | -0,313 |
| | 0,7 | 0,7 | 0,613 | 0 | 0 |
| $W_{e,1}$ | -0,055 | -0,055 | -0,007 | -0,117 | -0,172 |
| | 0,384 | 0,384 | 0,336 | 0,000 | 0,000 |
| $w_i(C_{pi} = 0,2)$ | 0,110 | | | | |
| $w_i(C_{pi} = -0,3)$ | -0,164 | | | | |
| $W_{net,10}$ | -0,128 | -0,128 | -0,117 | -0,227 | -0,282 |
| | 0,146 | 0,146 | 0,157 | 0,047 | -0,008 |
| | 0,274 | 0,274 | 0,226 | -0,110 | -0,110 |
| | 0,548 | 0,548 | 0,500 | 0,164 | 0,164 |

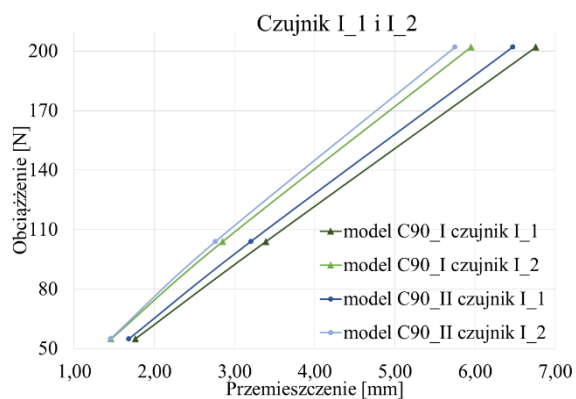
ZAŁĄCZNIK 2

I. Wyniki badań eksperymentalnych dla modelu I i modelu II – profil C90

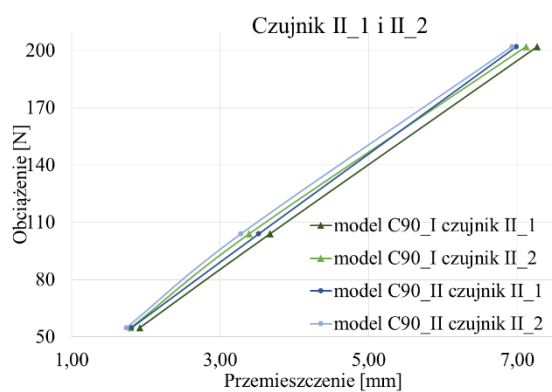
Tabela Z-2.1. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_I) i modelu z usztywnieniem (model C90_II) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | model C90_I | model C90_II | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,76 | 1,68 | 4,55 |
| | I_2 | 1,46 | 1,45 | 0,68 |
| | II_1 | 1,92 | 1,81 | 5,73 |
| | II_2 | 1,8 | 1,74 | 3,33 |
| | III_1 | 1,57 | 1,5 | 4,46 |
| | III_2 | 1,62 | 1,51 | 6,79 |
| 103,99 | I_1 | 3,39 | 3,20 | 5,60 |
| | I_2 | 2,85 | 2,76 | 3,16 |
| | II_1 | 3,67 | 3,52 | 4,09 |
| | II_2 | 3,39 | 3,28 | 3,24 |
| | III_1 | 2,98 | 2,96 | 0,67 |
| | III_2 | 3,12 | 3,01 | 3,53 |
| 202,09 | I_1 | 6,76 | 6,47 | 4,29 |
| | I_2 | 5,95 | 5,75 | 3,36 |
| | II_1 | 7,27 | 6,99 | 3,85 |
| | II_2 | 7,12 | 6,93 | 2,67 |
| | III_1 | 6,16 | 5,99 | 2,76 |
| | III_2 | 6,56 | 6,33 | 3,51 |

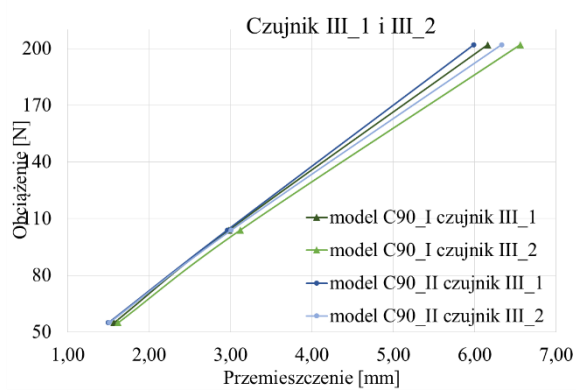
a)



b)



c)

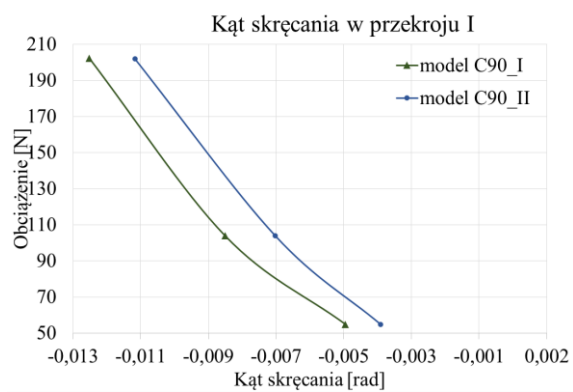


Rys. Z-2.1. Wykres zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_I) i profili z usztywnieniem (model C90_II), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

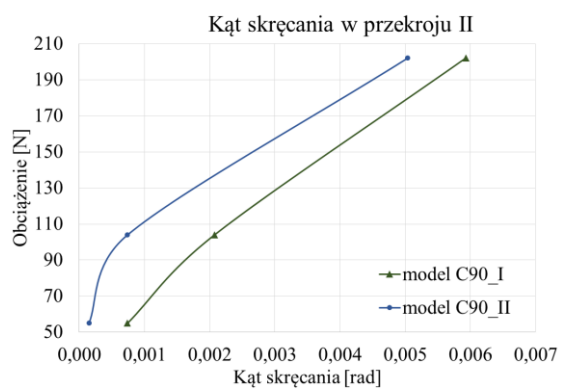
Tabela Z-2.2. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_I) i modelu z usztywnieniem (model C90_II) dla profili C90. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_I | model C90_II | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,004447 | -0,003409 | 23,33 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,000741 | 0,000148 | |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,008004 | -0,006522 | 18,52 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,002075 | 0,000741 | |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,012006 | -0,010672 | 11,11 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,005929 | 0,005040 | |
| | III_2 | | | |

a)



b)



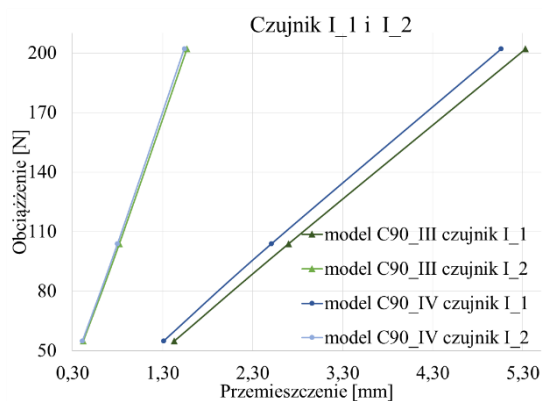
Rys. Z-2.2. Wykres kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C90_I) oraz modelu usztywnionego (model C90_II): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

II. Wyniki badań eksperymentalnych dla modelu III i modelu IV – profil C90

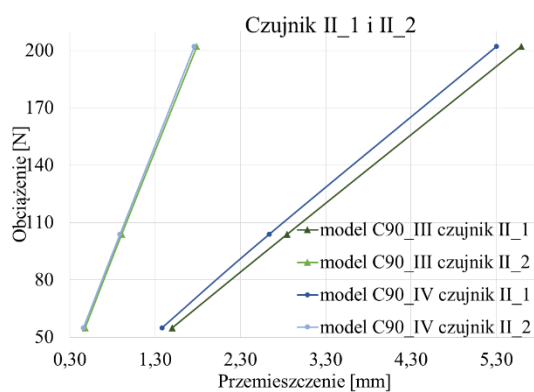
Tabela Z-2.3. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_III) i modelu z usztywnieniem (model C90_IV) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_III | model C90_IV | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,43 | 1,31 | 8,39 |
| | I_2 | 0,42 | 0,41 | 2,38 |
| | II_1 | 1,5 | 1,38 | 8,00 |
| | II_2 | 0,48 | 0,46 | 4,17 |
| | III_1 | 1,2 | 1,13 | 5,83 |
| | III_2 | 0,38 | 0,37 | 2,63 |
| 103,99 | I_1 | 2,7 | 2,51 | 7,04 |
| | I_2 | 0,82 | 0,8 | 2,44 |
| | II_1 | 2,85 | 2,64 | 7,37 |
| | II_2 | 0,91 | 0,89 | 2,20 |
| | III_1 | 2,28 | 2,17 | 4,82 |
| | III_2 | 0,73 | 0,71 | 2,74 |
| 202,09 | I_1 | 5,33 | 5,06 | 5,07 |
| | I_2 | 1,57 | 1,54 | 1,91 |
| | II_1 | 5,59 | 5,3 | 5,19 |
| | II_2 | 1,79 | 1,76 | 1,68 |
| | III_1 | 4,54 | 4,37 | 3,74 |
| | III_2 | 1,45 | 1,43 | 1,38 |

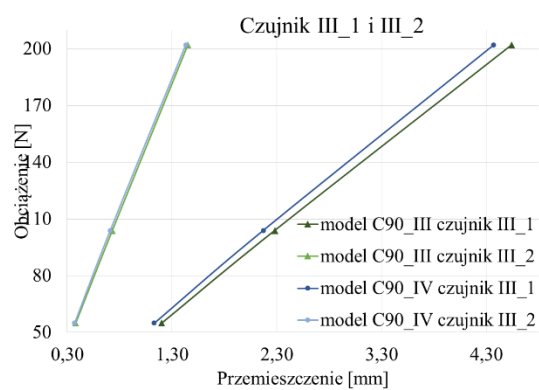
a)



b)



c)

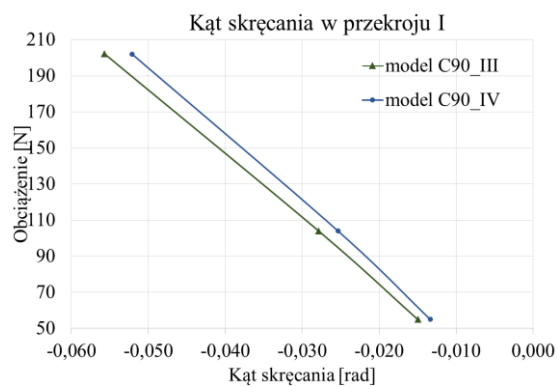


Rys. Z-2.3. Wykres zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_III) i profili z usztywnieniem (model C90_IV), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

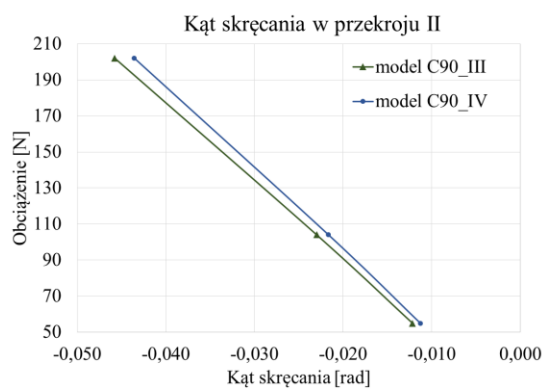
Tabela Z-2.4. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_III) i modelu z usztywnieniem (model C90_IV) dla profili C90. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_III | model C90_IV | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,014970 | -0,013340 | 10,89 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,012155 | -0,011265 | 7,32 |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,027861 | -0,025343 | 9,04 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,022972 | -0,021639 | 5,80 |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,055678 | -0,052131 | 6,37 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,045772 | -0,043553 | 4,85 |
| | III_2 | | | |

a)



b)



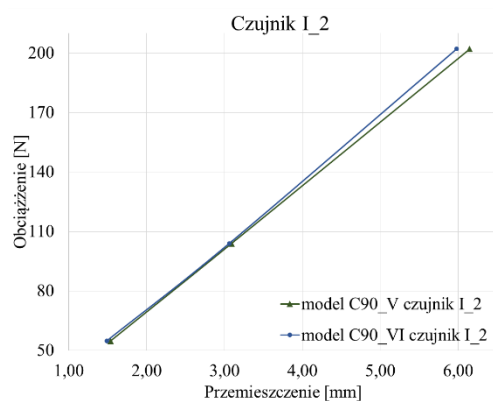
Rys. Z-2.4. Wykres kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C90_III) oraz modelu usztywnionego (model C90_IV): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

III. Wyniki badań eksperymentalnych dla modelu V i modelu VI – profil C90

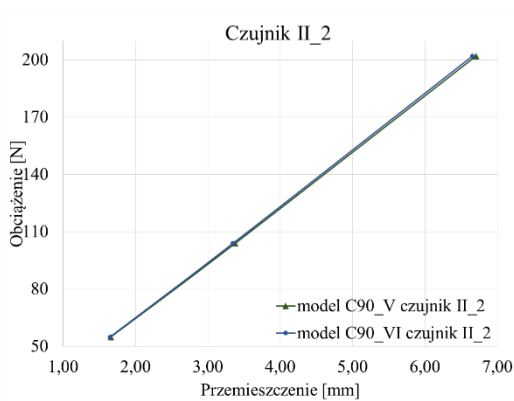
Tabela Z-2.5. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_V) i modelu z usztywnieniem (model C90_VI) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|--------------|-------------------------|
| | | model C90_V | model C90_VI | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 1,54 | 1,49 | 3,2 |
| | II_2 | 1,66 | 1,65 | 0,6 |
| | III_2 | 1,54 | 1,47 | 4,5 |
| 103,99 | I_2 | 3,09 | 3,06 | 1,0 |
| | II_2 | 3,38 | 3,35 | 0,9 |
| | III_2 | 3,08 | 3,02 | 1,9 |
| 202,09 | I_2 | 6,15 | 5,98 | 2,8 |
| | II_2 | 6,71 | 6,66 | 0,7 |
| | III_2 | 6,15 | 5,99 | 2,6 |

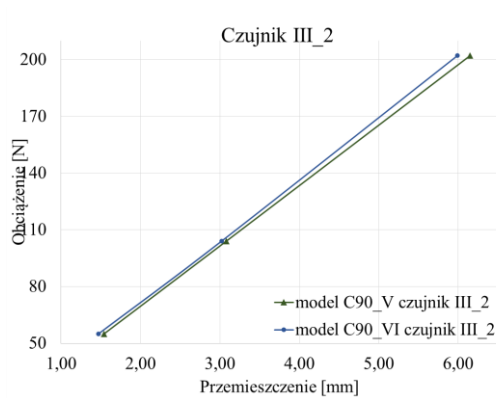
a)



b)



c)



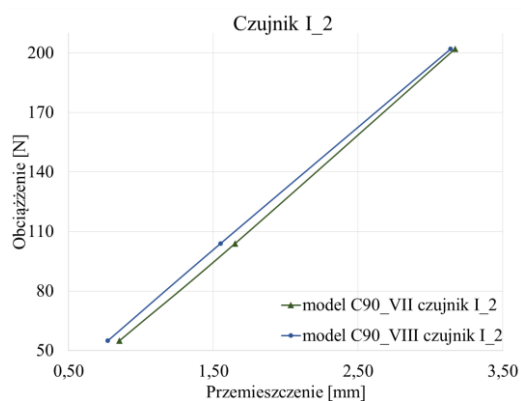
Rys. Z-2.5. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_V) i profili z usztywnieniem (model C90_VI), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

IV. Wyniki badań eksperymentalnych dla modelu VII i modelu VIII – profil C90

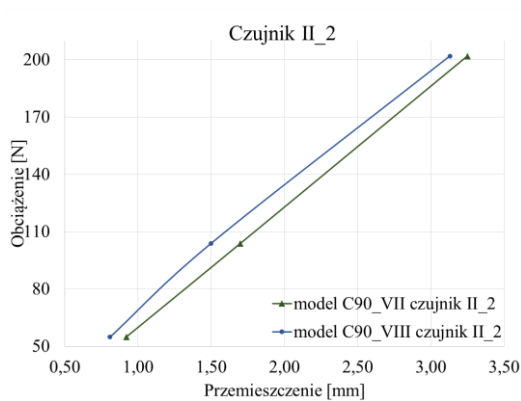
Tabela Z-2.6. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z badań eksperymentalnych dla modelu bez usztywnień (model C90_VII) i modelu z usztywnieniem (model C90_VIII) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki eksperymentu | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| | | model C90_VII | model C90_VIII | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 0,85 | 0,77 | 9,41 |
| | II_2 | 0,92 | 0,81 | 11,96 |
| | III_2 | 0,72 | 0,63 | 12,50 |
| 103,99 | I_2 | 1,65 | 1,55 | 6,06 |
| | II_2 | 1,70 | 1,50 | 11,76 |
| | III_2 | 1,36 | 1,24 | 8,82 |
| 202,09 | I_2 | 3,17 | 3,14 | 0,95 |
| | II_2 | 3,25 | 3,13 | 3,69 |
| | III_2 | 2,55 | 2,48 | 2,75 |

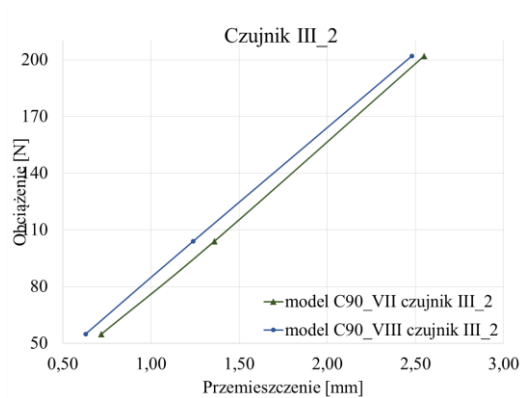
a)



b)



c)



Rys. Z-2.6. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_VII) i profili z usztywnieniem (model C90_VIII), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

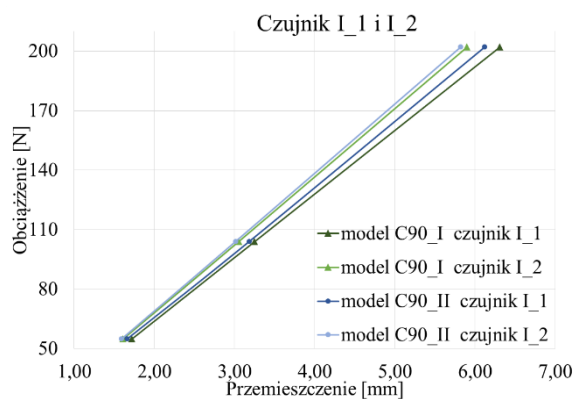
ZAŁĄCZNIK 3

I. Wyniki analizy numerycznej dla modelu I i modelu II – profil C90

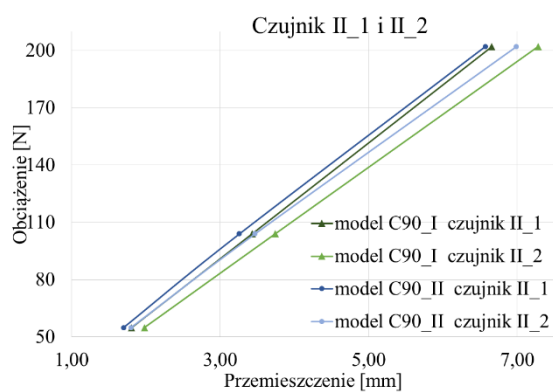
Tabela Z-3.1. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C90_I) i modelu z usztywnieniem (model C90_II) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_I | model C90_II | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,72 | 1,66 | 3,49 |
| | I_2 | 1,61 | 1,59 | 1,24 |
| | II_1 | 1,81 | 1,70 | 6,08 |
| | II_2 | 1,98 | 1,80 | 9,09 |
| | III_1 | 1,47 | 1,44 | 2,04 |
| | III_2 | 1,84 | 1,74 | 5,43 |
| 103,99 | I_1 | 3,25 | 3,18 | 2,15 |
| | I_2 | 3,05 | 3,01 | 1,31 |
| | II_1 | 3,43 | 3,26 | 4,96 |
| | II_2 | 3,74 | 3,47 | 7,22 |
| | III_1 | 2,78 | 2,74 | 1,44 |
| | III_2 | 3,49 | 3,29 | 5,73 |
| 202,09 | I_1 | 6,31 | 6,12 | 3,01 |
| | I_2 | 5,90 | 5,82 | 1,36 |
| | II_1 | 6,66 | 6,57 | 1,35 |
| | II_2 | 7,28 | 6,99 | 3,98 |
| | III_1 | 5,41 | 5,27 | 2,59 |
| | III_2 | 6,77 | 6,40 | 5,47 |

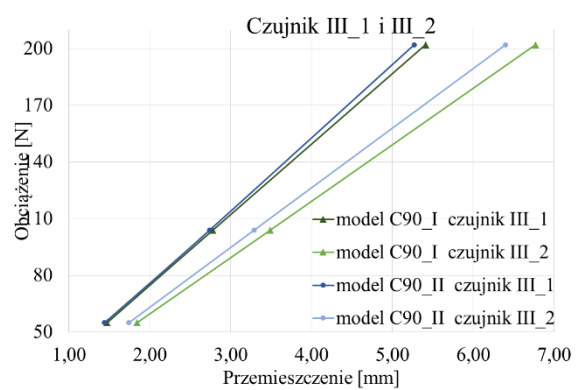
a)



b)



c)

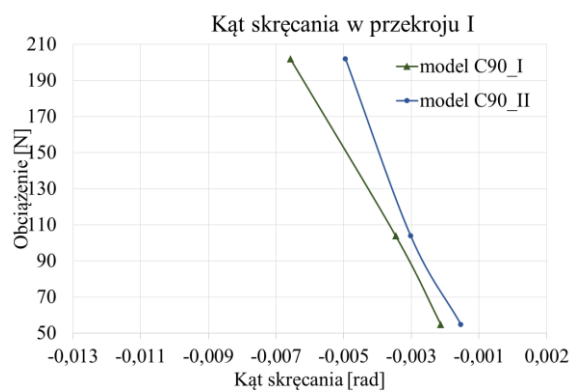


Rys. Z-3.1. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_I) i profili z usztywnieniem (model C90_II), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

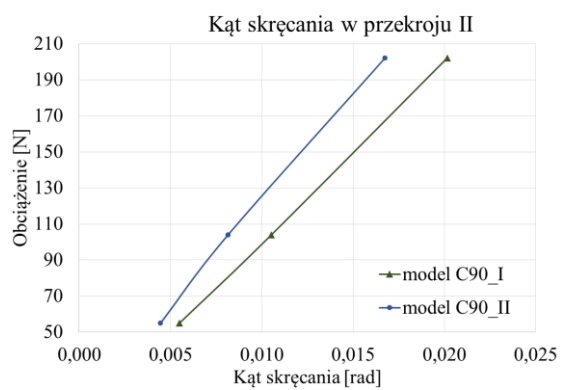
Tabela Z-3.2. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C90_I) i modelu z usztywnieniem (model C90_II) dla profili C90. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_I | model C90_II | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,001631 | -0,001038 | 36,36 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,005485 | 0,004447 | |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,002965 | -0,002520 | 15,00 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,010524 | 0,008153 | |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,006077 | -0,004447 | 26,83 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | 0,020157 | 0,016749 | |
| | III_2 | | | |

a)



b)



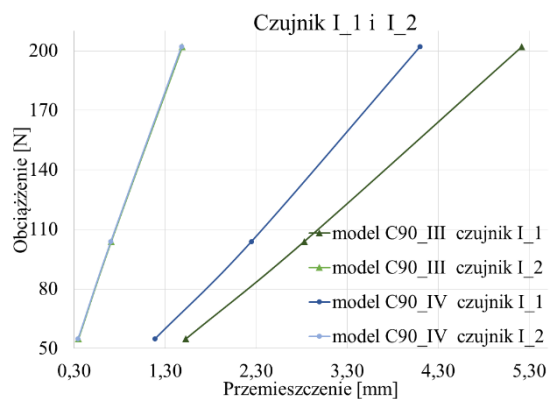
Rys. Z-3.2. Wykresy kąta skręcania profilu między modelem bez usztywnień (model C90_I) a modelem usztywnionym (model C90_II): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

II. Wyniki analizy numerycznej dla modelu III i modelu IV – profil C90

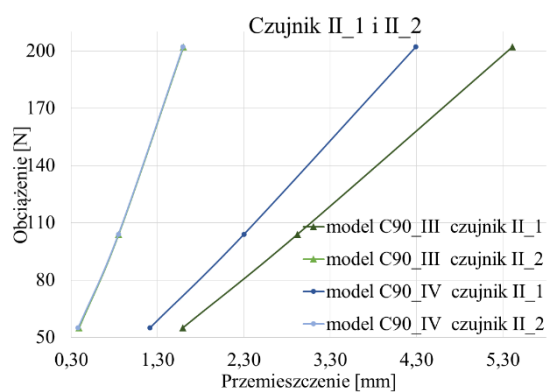
Tabela Z-3.3. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (Model C90_III) i modelu z usztywnieniem (Model C90_IV) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|----------------|-------------------|------------------------------|--------------|-------------------------|
| | | model C90_III | model C90_IV | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_1 | 1,53 | 1,19 | 22,22 |
| | I_2 | 0,35 | 0,35 | 1,43 |
| | II_1 | 1,59 | 1,21 | 23,90 |
| | II_2 | 0,39 | 0,38 | 2,82 |
| | III_1 | 1,32 | 1,01 | 23,48 |
| | III_2 | 0,35 | 0,35 | 1,14 |
| 103,99 | I_1 | 2,83 | 2,25 | 20,49 |
| | I_2 | 0,71 | 0,71 | 0,70 |
| | II_1 | 2,92 | 2,30 | 21,23 |
| | II_2 | 0,85 | 0,85 | 0,47 |
| | III_1 | 2,41 | 1,90 | 21,16 |
| | III_2 | 0,65 | 0,65 | 0,77 |
| 202,09 | I_1 | 5,22 | 4,10 | 21,46 |
| | I_2 | 1,49 | 1,48 | 0,67 |
| | II_1 | 5,41 | 4,29 | 20,70 |
| | II_2 | 1,60 | 1,60 | 0,31 |
| | III_1 | 4,37 | 3,51 | 19,68 |
| | III_2 | 1,31 | 1,31 | 0,38 |

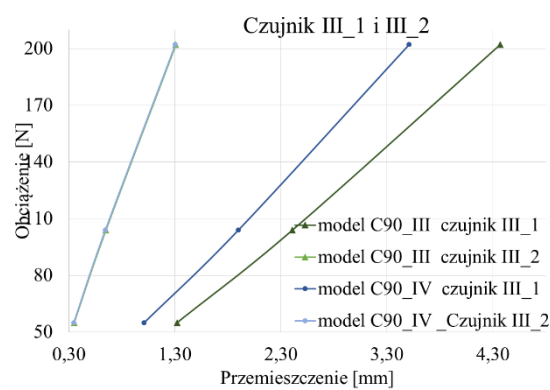
a)



b)



c)

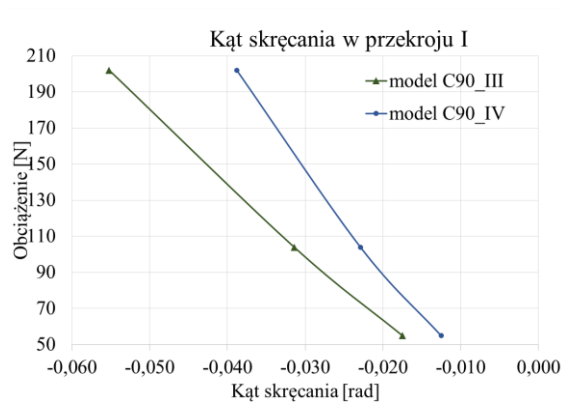


Rys. Z-3.3. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia profili bez usztywnień (model C90_III) i profili z usztywnieniem (model C90_IV), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujników I_1 i I_2, b) czujników II_1 i II_2, c) czujników III_1 i III_2.

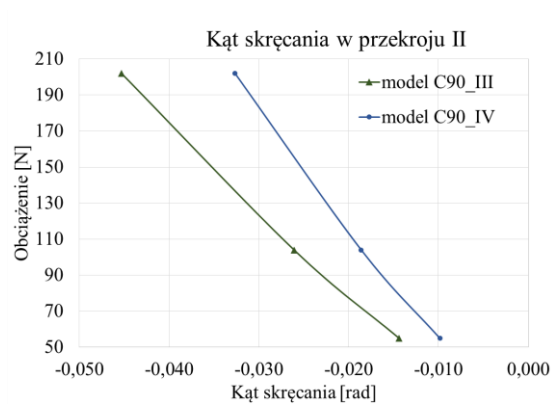
Tabela Z-3.4. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń kątowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C90_III) i modelu z usztywnieniem (model C90_IV) dla profili C90. Kąt skręcania w przekroju I-I i przekroju II-II.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_III | model C90_IV | |
| | | Przemieszczenia kątowe [rad] | | |
| 54,94 | I_1 | -0,017490 | -0,012525 | 28,39 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,014378 | -0,009842 | |
| | III_2 | | | |
| 103,99 | I_1 | -0,031415 | -0,022898 | 27,11 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,026083 | -0,018601 | |
| | III_2 | | | |
| 202,09 | I_1 | -0,055235 | -0,038818 | 29,72 |
| | I_2 | | | |
| | III_1 | -0,045328 | -0,032674 | |
| | III_2 | | | |

a)



b)



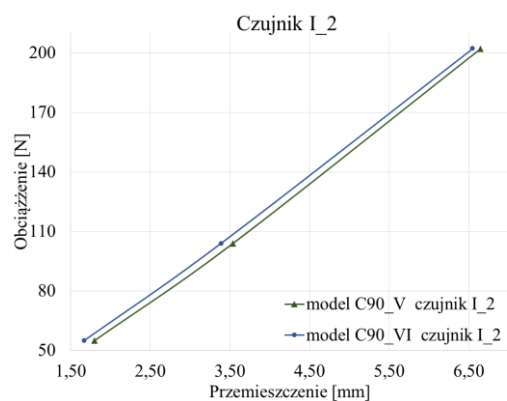
Rys. Z-3.4. Wykresy kąta skręcania profilu dla modelu bez usztywnień (model C90_III) oraz modelu z usztywnieniem (model C90_IV): a) kąt skręcania w przekroju I-I, b) kąt skręcania w przekroju II-II.

III. Wyniki analizy numerycznej dla modelu V i modelu VI – profil C90

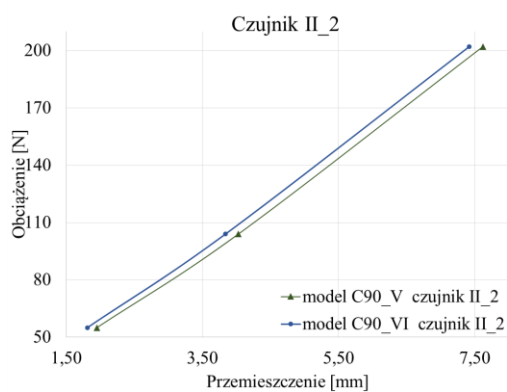
Tabela Z-3.5. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C90_V) i modelu z usztywnieniem (model C90_VI) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------------------|
| | | model C90_V | model C90_VI | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 1,54 | 1,49 | 3,2 |
| | II_2 | 1,66 | 1,65 | 0,6 |
| | III_2 | 1,54 | 1,47 | 4,5 |
| 103,99 | I_2 | 3,09 | 3,06 | 1,0 |
| | II_2 | 3,38 | 3,35 | 0,9 |
| | III_2 | 3,08 | 3,02 | 1,9 |
| 202,09 | I_2 | 6,15 | 5,98 | 2,8 |
| | II_2 | 6,71 | 6,66 | 0,7 |
| | III_2 | 6,15 | 5,99 | 2,6 |

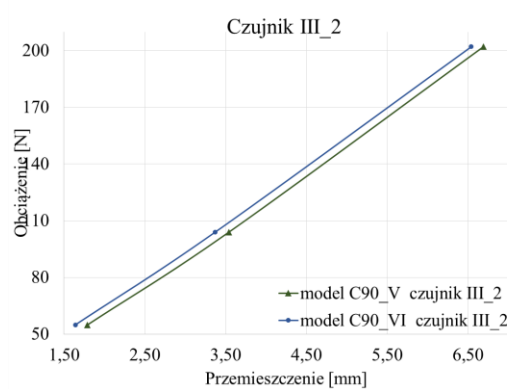
a)



b)



c)



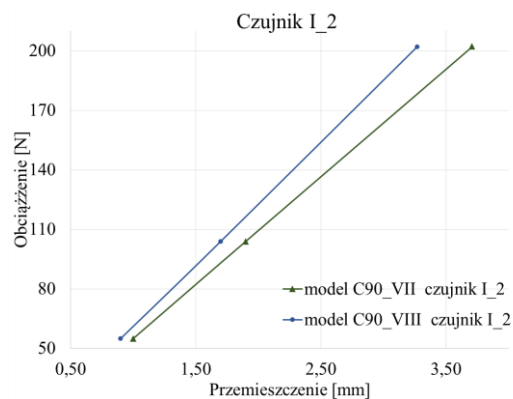
Rys. Z-3.5. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_V) i profili z usztywnieniem (model C90_VI), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

IV. Wyniki analizy numerycznej dla modelu VII i modelu VIII – profil C90

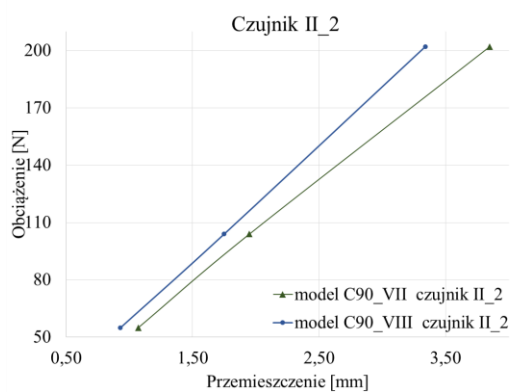
Tabela Z-3.6. Porównanie procentowe Δ [%] przemieszczeń pionowych uzyskanych z analizy numerycznej dla modelu bez usztywnień (model C90_VII) i modelu z usztywnieniem (model C90_VIII) dla profili C90.

| Obciążenie [N] | Czujnik pomiarowy | Wyniki analizy numerycznej | | Porównanie Δ [%] |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| | | model C90_VII | model C90_VIII | |
| | | Przemieszczenia pionowe [mm] | | |
| 54,94 | I_2 | 0,85 | 0,77 | 9,41 |
| | II_2 | 0,92 | 0,81 | 11,96 |
| | III_2 | 0,72 | 0,63 | 12,50 |
| 103,99 | I_2 | 1,65 | 1,55 | 6,06 |
| | II_2 | 1,70 | 1,50 | 11,76 |
| | III_2 | 1,36 | 1,24 | 8,82 |
| 202,09 | I_2 | 3,17 | 3,14 | 0,95 |
| | II_2 | 3,25 | 3,13 | 3,69 |
| | III_2 | 2,55 | 2,48 | 2,75 |

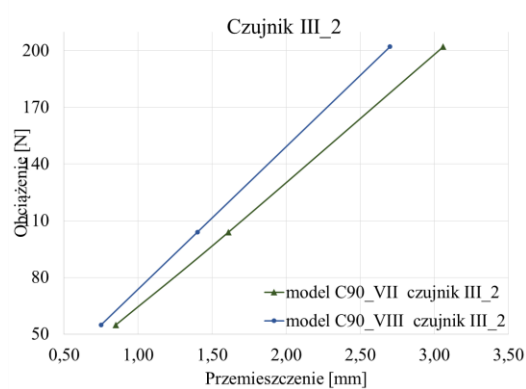
a)



b)



c)



Rys. Z-3.6. Wykresy zależności przemieszczeń pionowych od obciążenia dla profili bez usztywnień (model C90_VII) i profili z usztywnieniem (model C90_VIII), przemieszczenia odczytane przy użyciu: a) czujnika I_2, b) czujnika II_2, c) czujnika III_2.

ZAŁĄCZNIK 4

Tabela Z-4.1. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 0% – model 1.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 0% RH | | | | |
|---|---------------------------|--|----------------------------|-------|--------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata | 4 lata |
| 1 | Tynk cienkowarstwowy | 0 | 39,84 | 19,24 | 19,24 | 19,24 |
| 2 | Wełna mineralna - twarda | 0 | 0,68 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 3 | Płyta OSB | 0 | 77,05 | 91,21 | 91,21 | 91,21 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Wełna mineralna - luźna | 0 | 0,57 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
| 6 | Folia paroizolacyjna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Płyta OSB | 0 | 81,48 | 82,58 | 82,58 | 82,58 |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa | 0 | 5,47 | 5,34 | 5,34 | 5,34 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 0 | 2,32 | 2,44 | 2,44 | 2,44 |

Tabela Z-4.2. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 65% – model 1.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 65% RH | | | | |
|---|---------------------------|---|----------------------------|-------|--------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata | 4 lata |
| 1 | Tynk cienkowarstwowy | 6 | 40,59 | 19,24 | 19,24 | 19,24 |
| 2 | Wełna mineralna - twarda | 0,8 | 0,72 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 3 | Płyta OSB | 95 | 87,12 | 91,21 | 91,21 | 91,21 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Wełna mineralna - luźna | 0,85 | 0,69 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
| 6 | Folia paroizolacyjna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Płyta OSB | 95 | 83,22 | 82,58 | 82,58 | 82,58 |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa | 6,43 | 5,51 | 5,34 | 5,34 | 5,34 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 1,92 | 2,49 | 2,44 | 2,44 | 2,44 |

Tabela Z-4.3. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 100% – model 1.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 100% RH | | | | |
|---|---------------------------|--|----------------------------|--------|--------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata | 4 lata |
| 1 | Tynk cienkowarstwowy | 164,7 | 49,36 | 21,77 | 20,94 | 19,71 |
| 2 | Wełna mineralna - twarda | 712 | 490,02 | 273,22 | 98,34 | 0,8 |
| 3 | Płyta OSB | 932 | 795,84 | 227,44 | 142,81 | 119,09 |
| 4 | Folia paroprzepuszczalna | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,02 | 0,02 |
| 5 | Wełna mineralna - luźna | 621 | 472,75 | 466,13 | 451,95 | 382,24 |
| 6 | Folia paroizolacyjna | 0,05 | 0,04 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Płyta OSB | 932 | 233,72 | 84,3 | 75,65 | 75,07 |
| 8 | Płyta gipsowo - kartonowa | 564 | 8,94 | 5,4 | 4,17 | 4,09 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 167,78 | 147,48 | 107,42 | 80,53 | 56,2 |

Tabela Z-4.4. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 0% – model 2.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 0% RH | | | | |
|---|--------------------------|--|----------------------------|----------|-------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata |
| 1 | Płyta OSB | 0 | 103,85 | 89,98 | 89,98 | 89,98 |
| 2 | Folia paroprzepuszczalna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Wełna mineralna - luźna | 0 | 0,63 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| 4 | Folia paroizolacyjna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Płyta OSB | 0 | 83,32 | 82,22 | 82,22 | 82,22 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 0 | 2,33 | 2,17 | 2,17 | 2,17 |

Tabela Z-4.5. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 65% – model 2.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 50% RH | | | | |
|---|--------------------------|---|----------------------------|----------|-------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata |
| 1 | Płyta OSB | 95 | 104,8 | 89,98 | 89,98 | 89,98 |
| 2 | Folia paroprzepuszczalna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Wełna mineralna - luźna | 0,85 | 0,64 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| 4 | Folia paroizolacyjna | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Płyta OSB | 95 | 83,48 | 82,22 | 82,22 | 82,22 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 1,92 | 2,35 | 2,17 | 2,17 | 2,17 |

Tabela Z-4.6. Zawartość wody w poszczególnych materiałach w czasie trwania osuszania przegrody dla RH 100% – model 2.

| Lp. | Materiał | Zawartość wody [kg/m ³] przy wilgotności 100% RH | | | | |
|---|--------------------------|--|----------------------------|----------|--------|--------|
| | | Początek symulacji | Czas zakończenia symulacji | | | |
| | | | 01.08.2020 | 1miesiąc | 1 rok | 2 lata |
| 1 | Płyta OSB | 932 | 192,44 | 106,31 | 116,32 | 116,32 |
| 2 | Folia paroprzepuszczalna | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| 3 | Wełna mineralna - luźna | 621 | 471,16 | 448,4 | 437,85 | 437,85 |
| 4 | Folia paroizolacyjna | 0,05 | 0,02 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | Płyta OSB | 93 | 176,26 | 83,37 | 80,4 | 80,4 |
| Całkowita zawartość wody w całej przegrodzie [kg/m ²] | | 85,76 | 70,39 | 65,05 | 63,66 | 63,66 |