

WPŁYW NIEJEDNORODNOŚCI CECH FIZYKOMECHANICZNYCH DREWNA NA STAN NAPRĘŻEŃ W ELEMENTACH KONSTRUKCYJNYCH

Michał BASZEŃ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy przedstawione zostały analizy wpływu właściwości fizykomechanicznych drewna na rozkład naprężeń oraz przemieszczeń węzłów w elementach ściennych oraz stropowych w szkieletowych konstrukcjach drewnianych. Przedstawiono wartości naprężeń i przemieszczeń konstrukcji otrzymane podczas badań eksperymentalnych przeprowadzonych w Politechnice Białostockiej. Przedstawiono również wartości cech fizykomechanicznych drewna użytego w analizowanych konstrukcjach.

Słowa kluczowe: szkieletowe konstrukcje drewniane, właściwości fizykomechaniczne drewna, badania eksperymentalne.

1. Wstęp

Drewno było jednym z pierwszych materiałów, jakie człowiek na drodze ewolucji używał do tworzenia obiektów w jakich mógł zamieszkać i chronić się przed żywiołami. Drewno, którego było pod dostatkiem w większości ludzkich lokalizacji idealnie nadawało się do celów budowlanych. Jednakże już od początku zastosowań budowlanych, właściwości fizykomechaniczne drewna powodowały, że ten łatwo dostępny budulec nie zawsze spełniał oczekiwania budowniczych.

Drewno w odróżnieniu od izomorficznej stali czy też bardziej złożonego betonu, jednak pracującego prawie identycznie we wszystkich kierunkach, charakteryzuje się zmiennymi właściwościami wytrzymałościowymi w różnych kierunkach. Spowodowane jest to budową drzew i sposobem ich rozwoju (Wood Handbook, 2010).

Drzewa większości gatunków rosną szybciej wzdłużnie, aniżeli w poprzek pnia. To powoduje, że znaczne przyrosty długości wzdłuż włókien muszą być zrekompensowane zwiększoną sztywnością i wytrzymałością właśnie w tym kierunku. Kierunek w poprzek włókien, nie tak ważny jeżeli chodzi o przenoszenie chociażby ciężaru własnego rozwijającego się drzewa, wykazuje znacznie mniejsze wytrzymałości w stosunku do kierunku wzdłuż włókien.

Te właściwości doskonale znane współczesnym projektantom i budowniczym, przed wiekami zupełnie nieznanymi dawnym konstruktorom powodowały duże trudności w budowaniu. Dopiero upływ czasu, a co za tym idzie nabywana wiedza inżynierska przekazywana

z pokolenia na pokolenie pozwalała unikać błędów w konstruowaniu, a co za tym idzie nieuchronnych katastrof.

Rozwój nauk ścisłych, pojawienie się pojęć wytrzymałości i sztywności materiału, wreszcie badania doświadczalne ukazały złożoność pracy elementów z drewna. To co przekazywano z pokolenia na pokolenie jako pewne dogmaty w wyniku rozwoju nauki uzyskało wytłumaczenia z punktu widzenia fizyki i mechaniki. Nie zmienia to jednak faktu, że ortotropowy charakter pracy elementów drewnianych sprawia do dziś problemy projektantom, jak i wykonawcom.

W artykule zostaną przedstawione wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na elementach ściennych i stropowych, jak również wyniki badań materiałowych drewna użytego do skonstruowania elementów badawczych. Zostaną przeanalizowane wartości naprężeń w szkielecie drewnianym badanych ścian i stropów, celem oszacowania wpływu niejednorodności cech fizykomechanicznych drewna oraz ortotropii konstrukcji na wartości sił wewnętrznych.

2. Właściwości drewna

Jak wspomniano na wstępie drewno charakteryzuje się ortotropią, to jest wysoką wytrzymałością w kierunku równoległym do włókien, natomiast zdecydowanie niższą w kierunku prostopadłym. Polska norma PN-EN 338:2009 *Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości* określa

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.baszen@kmb.pb.edu.pl

następujące właściwości sprężyste dla wybranych klas drewna w przypadku drzew iglastych (tab. 1).

Tabela 1. Wybrane właściwości fizykomechaniczne drewna według PN-EN 338:2009

Klasa drewna	C27	C30	C35	C40	
Właściwości sprężyste [kN/mm ²]					
Średni moduł sprężystości wzdłuż włókien	$E_{0,mean}$	11,500	12,000	13,000	14,000
Średni moduł sprężystości w poprzek włókien	$E_{90,mean}$	0,380	0,400	0,430	0,470
Średni moduł odkształcenia postaciowego	G_{mean}	0,700	0,750	0,810	0,880

Każdy gatunek drzew charakteryzuje się pewnymi właściwościami wytrzymałościowymi jak i sprężystymi. Można określić średnią wartość wytrzymałości drewna czy też jego moduły sprężystości oraz odkształcalności postaciowej, będą to jednak wielkości przybliżone. Oczywiście jest, że drewno drzew tego samego gatunku, nawet z tej samej lokalizacji może różnić się w zakresie właściwości fizykomechanicznych i to czasami znacznie. Powoduje to, że zapewnienie bezpieczeństwa pracy statycznej konstrukcji oraz bezpieczne i ekonomiczne projektowanie jest możliwe po przeprowadzeniu wszechstronnych badań materiałowych, których celem będzie wyznaczenie właściwości fizykomechanicznych użytego drewna.

3. Badania charakterystyk materiałowych drewna

Badania materiałowe cech fizykomechanicznych drewna (Kokocinski, 2004) przeprowadza się według zaleceń Polskich Norm. Badania wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien przeprowadza się zgodnie z normą PN-79/D-04102 *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien*, wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien według normy PN-77/D-04229 *Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien*, zaś oznaczanie współczynnika sprężystości przy ściskaniu wzdłuż włókien według PN-58/D-04115 *Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy ściskaniu wzdłuż włókien*.

Badania materiałowe przed testami eksperymentalnymi (Baszeń, 2004) konstrukcji z drewna przeprowadzone zostały na normowych próbkach o wymiarach 20×20mm i wysokości 30mm. Próbki zostały wycięte ze szkieletu drewnianego badanych elementów pod kątem 0° (równoległe do włókien), 90° (prostopadle do włókien) oraz pod kątem 45°, co pozwoliło określić właściwości dla obu kierunków głównych, jak również wyznaczenie modułu odkształcenia postaciowego.

Badania przeprowadzono na próbkach o średniej wilgotności 11%, w pomieszczeniu w którym temperatura

wahała się w zakresie 22-23°C, zaś średnia wilgotność względna powietrza wynosiła około 30%.

Wartości odkształceń postaciowych próbek odczytywano na poziomie 10% i 40% obciążenia niszczącego. Przeprowadzono cztery próby dla drewna z konstrukcji ścian oraz cztery próby dla drewna z elementów stropowych.

W tabeli 2 przedstawiono charakterystyki materiałowe drewna świerkowego, które zostało zastosowane w konstrukcji ścian trójpasmowych, zaś w tabeli 3 zaprezentowane zostały charakterystyki materiałowe drewna sosnowego z którego został wykonany szkielet drewniany konstrukcji stropów.

Tabela 2. Właściwości fizykomechaniczne drewna świerkowego

Nr próbki	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	G_{mean}	ν_0	ν_{90}
	[kN/mm ²]			[-]	
1	12,309	0,647	0,714	0,397	0,038
2	11,970	0,627	0,722	0,389	0,040
3	13,118	0,590	0,716	0,366	0,054
4	12,152	0,604	0,799	0,355	0,050
Średnia	12,387	0,617	0,738	0,376	0,046
Odchylenie standardowe	0,506	0,025	0,041	0,020	0,008

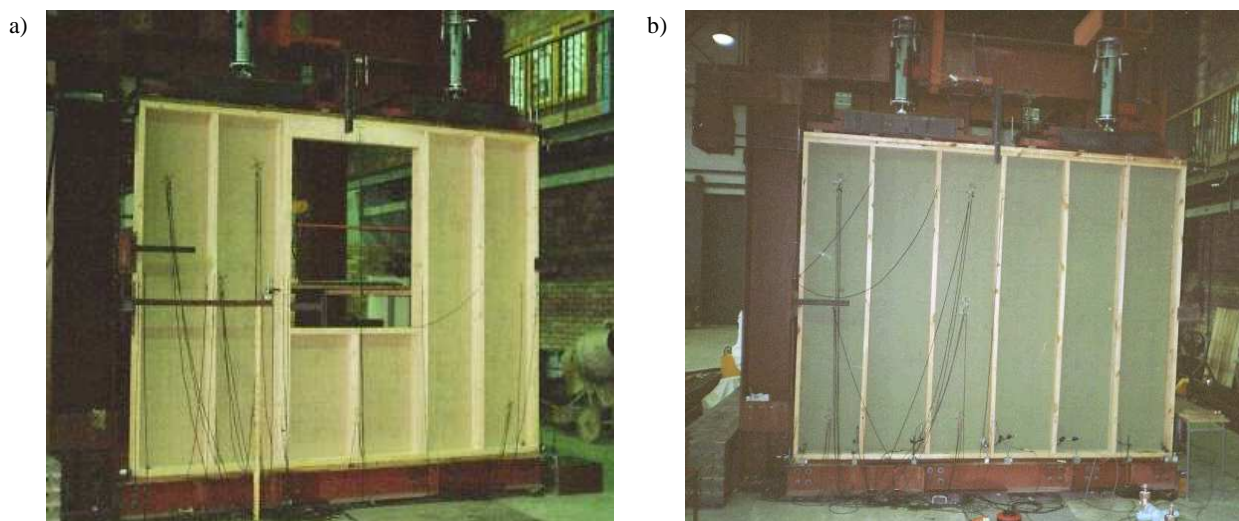
Tabela 3. Właściwości fizykomechaniczne drewna sosnowego

Nr próbki	$E_{0,mean}$	$E_{90,mean}$	G_{mean}	ν_0	ν_{90}
	[kN/mm ²]			[-]	
1	10,155	0,603	0,719	0,432	0,029
2	13,238	0,553	0,838	0,380	0,035
3	12,299	0,510	1,117	0,404	0,042
4	12,063	0,529	0,914	0,349	0,026
Średnia	11,939	0,549	0,897	0,391	0,033
Odchylenie standardowe	1,293	0,040	0,167	0,035	0,007

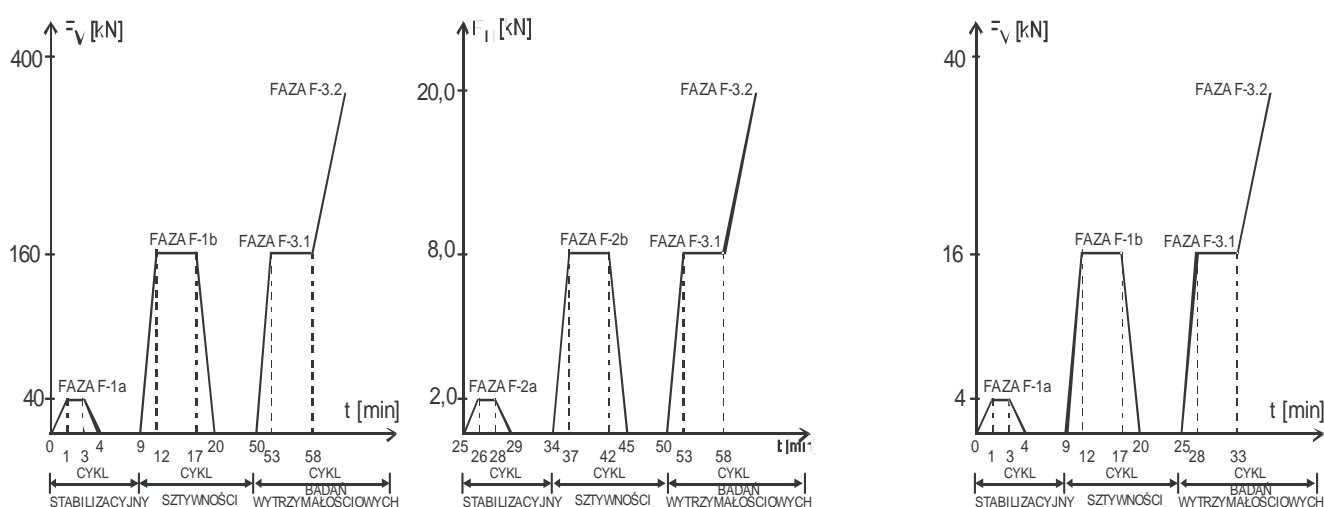
Powyższe dane wyraźnie pokazują, jak znaczne odchylenia wartości od średniej mogą wykazywać poszczególne próbki. Takie różnice mają duże znaczenie w określaniu wartości naprężeń w elementach podczas badań eksperymentalnych elementów w skali naturalnej, jak również podczas analiz numerycznych w których wprowadza się do programu obliczeniowego pewne uśrednione wartości, a nie przeprowadza się obliczenia dla każdego otrzymanego zestawu właściwości wytrzymałościowych czy sprężystych drewna.

4. Badania doświadczalne

Wspomniane wyżej badania doświadczalne były częścią pracy badawczo-analitycznej (Baszeń, 2004) przeprowadzonej na Politechnice Białostockiej. Celem badań było opracowanie modelu numerycznego opisującego elementy ścienne i stropowe szkieletowego budownictwa drewnianego (Baszeń i Miedziałowski, 2006; Miedziałowski i Baszeń, 2007). Celem weryfikacji zaproponowanego modelu przeprowadzono badania elementów ściennych i stropowych w skali naturalnej, elementy pokazano na rysunku 1. Analizowane było wyłączenie poszczególnych części składowych elementów badawczych oraz ich sztywność.



Rys. 1. Elementy testowe: a) element ścienny, b) element stropowy



Rys. 2. Fazy obciążeń elementu: a) ściennego, b) stropowego

Przeprowadzono badania na trzech elementach ściennych oraz czterech stropowych. Elementy stropowe testowane były w dwóch seriach, nieznacznie różniąc się wymiarami (Baszeń, 2004).

Elementy ścienne poddawano działaniu obciążeń zewnętrznych w płaszczyźnie testowanego elementu. W przypadku ścian przykładane były dwa obciążenia pionowe oraz poziome, natomiast w przypadku stropów tylko jedno.

Elementy stropowe, identyczne jak elementy ścienne, badano w pozycji pionowej. Taki rodzaj przeprowadzonych testów wynikał z konieczności użycia jednego stanowiska badawczego do eksperymentu. Przy takim sposobie pracy stropu pomijany był jego ciężar, a jedynym obciążeniem było obciążenie działające w płaszczyźnie, symulujące parcie wiatru.

Elementy ścienne obciążane były obciążeniem pionowym symulującym oddziaływanie ze stropu wyższej kondygnacji oraz obciążeniem poziomym symulującym parcie wiatru.

Obciążenia elementów ściennych zadawane były w trzech fazach, zaś elementów stropowych w dwóch fazach. Dwie pierwsze fazy w przypadku ścian i pierwsza faza w przypadku stropów podzielone były na dwa cykle

(stabilizacyjny i sztywności), zaś ostatnia faza obciążeń dla obu rodzajów konstrukcji, nazwana była cyklem badań wytrzymałościowych. Schemat faz obciążenia elementów ściennych prezentuje rysunek 2a, zaś obciążenia elementów stropowych rysunek 2b. Pominięcie fazy F-2 w przypadku stropów wynikało z chęci zachowania tej samej numeracji dla cyklu badań wytrzymałościowych w obu rodzajach konstrukcji.

W przypadku badań doświadczalnych elementów ściennych faza F-1 obejmowała cykle obciążeń pionowych, faza F-2 cykle obciążeń poziomych, natomiast faza F-3 równoczesne działanie obu rodzajów obciążeń. W przypadku badań eksperymentalnych elementów stropowych poddawane one były oddziaływaniu tylko jednego rodzaju obciążenia w trakcie wszystkich cykli obciążeniowych.

Obciążenie pionowe (ściany) lub obciążenie wzdłuż belek stropowych (stropy) realizowane było za pomocą dwóch siłowników skierowanych pionowo w dół.

W obu przypadkach obciążenie przekazywane było na drewniany szkielet elementu testowego za pomocą systemu stalowych przekładek, które przekazywały obciążenie z dwóch siłowników na element w postaci ośmiu sił skupionych. Rozstaw punktów przyłożenia tych

ośmiu sił skupionych był jednakowy po całej szerokości ściany i symetryczny względem pionowej osi środkowej elementu, co zapewniało symetryczność obciążenia.

5. Wyniki testów

Zgodnie z zasadami mechaniki konstrukcji, jeżeli konstrukcja jest układem symetrycznym poddanym działaniu symetrycznych obciążeń zewnętrznych, to układ sił wewnętrznych także musi spełniać warunki symetryczności lub asymetryczności (w zależności od rodzaju rozpatrywanych sił wewnętrznych). Podobna zależność pojawia się w przypadku wykresu przemieszczeń realizowanych równoległe do osi symetrii układu.

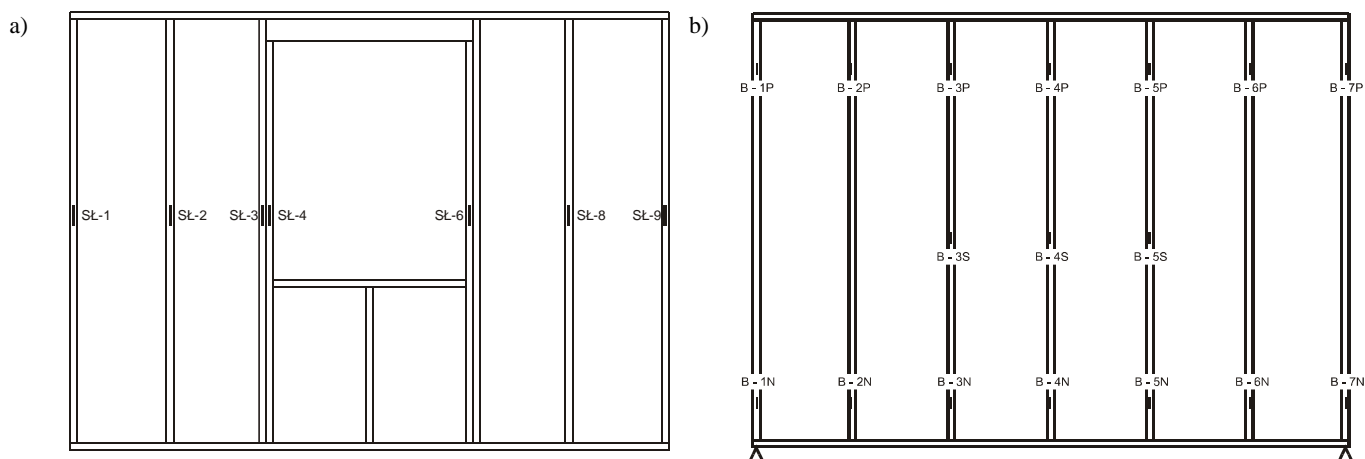
Analizowane w trakcie badań doświadczalnych (Baszeń, 204) elementy ścienne i stropowe były elementami symetrycznymi względem środkowej osi układu. Wszystkie obciążenie zadawane w przypadku elementów stropowych oraz obciążenia pionowe w przypadku ścian także były obciążeniami symetrycznymi.

Takie warunki wejściowe sugerowały, że rozkład sił wewnętrznych, w tym przypadku – naprężenia normalne, na kierunku działającego obciążenia, w słupach (ściany) lub belkach stropowych (stropy) powinien także spełniać zasadę symetrii.

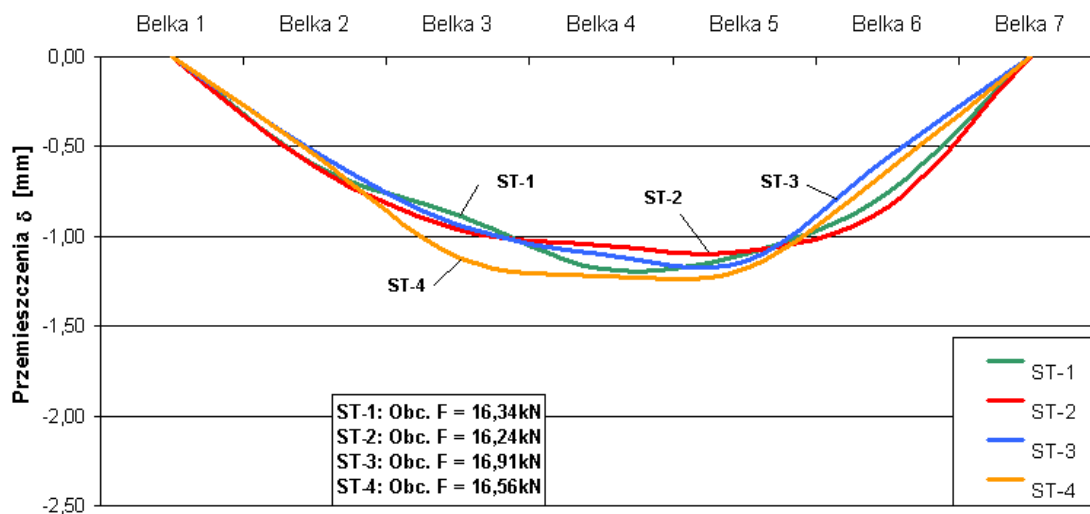
Przeanalizowane zostały wartości naprężeń normalnych w słupkach w połowie wysokości konstrukcji ściennej pod działaniem obciążenia pionowego, wartości naprężeń normalnych w belkach stropowych w $\frac{1}{4}$ ich długości patrząc od krawędzi. Dodatkowo określono wielkości przemieszczeń węzłów połączeń belek stropowych z nieobciążoną belką obwodową. Na rysunku 3a przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych na elemencie ściennym, zaś na rysunku 3b na elemencie stropowym.

Wielkości przemieszczeń krawędzi nieobciążonej stropów pokazano na rysunku 4.

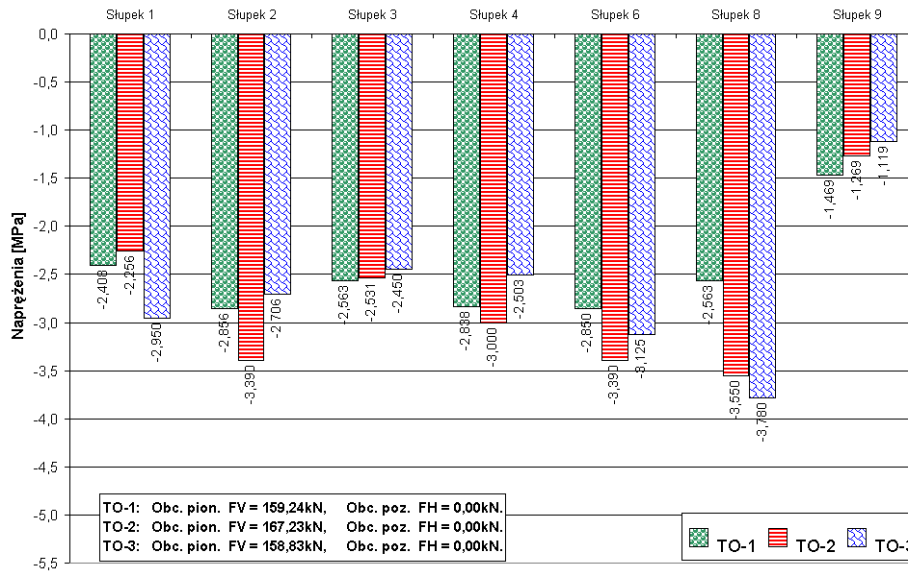
Naprężenia w słupkach elementów ściennym przedstawia rysunek 5, zaś rysunki 6 i 7 prezentują naprężenia w belkach stropowych w przekrojach przykrawędziowych.



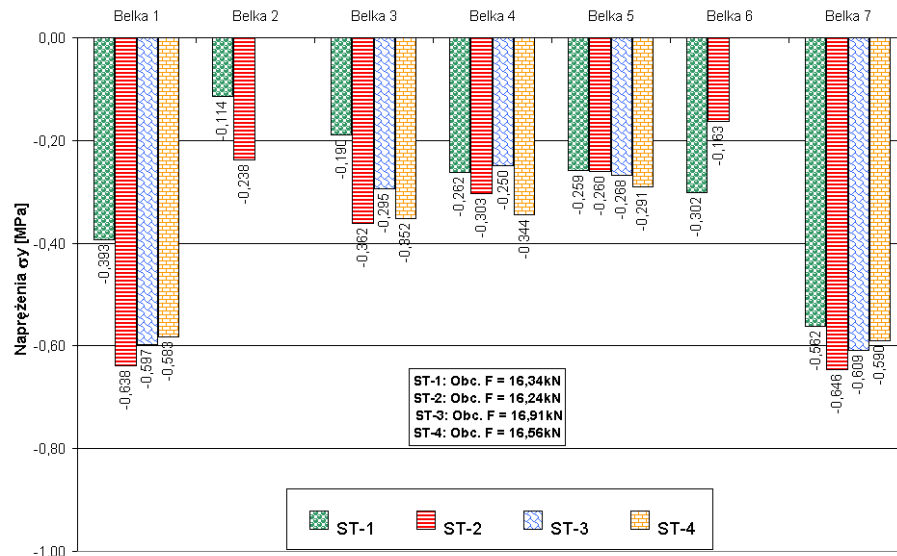
Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na elemencie: a) ściennym, b) stropowym



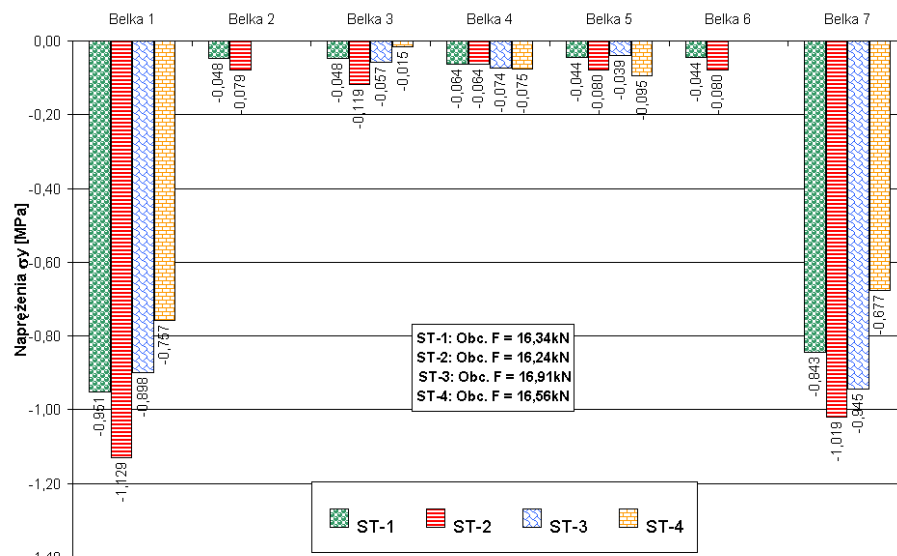
Rys. 4. Przemieszczenie węzłów belki nieobciążonej obwodowej elementów stropowych



Rys. 5. Rozkład naprężeń normalnych w poszczególnych słupkach elementów ściennych



Rys. 6. Rozkład naprężeń normalnych w belkach stropowych przy krawędzi obciążonej



Rys. 7. Rozkład naprężeń normalnych w belkach stropowych przy krawędzi nieobciążonej

6. Podsumowanie

Drewno będące bardzo popularnym budulcem jest materiałem, który charakteryzuje zmiennymi (w obszarze rozpatrywanego elementu) wartościami cech fizyko-mechanicznych. Nawet otrzymując z zakładu produkcyjnego wartości charakterystyk drewna otrzymuje się tylko wielkości średnie z danej partii, natomiast każdy element może charakteryzować się własnościami fizycznymi lub mechanicznymi dość znacznie odbiegającymi od wielkości uśrednionych.

Dobrym tego przykładem są wartości zestawione w tabelach 2 i 3 w rozdziale 3. Różnice dla poszczególnych próbek badawczych w wartościach modułów sprężystości oraz modułu odkształcalności poprzecznej w elementach ściennych sięgają 5%, zaś w przypadku elementów stropowych te różnice osiągają 10%, a w przypadku modułu G nawet przekraczają tę wartość.

Wyniki testów doświadczalnych zaprezentowane w rozdziale 5 pokazują, że ortotropia konstrukcji, która spowodowana jest zmiennością cech materiałowych i fizycznych w elemencie badawczym, powoduje że rozkład naprężeń oraz odkształceń nie jest symetryczny. Zaprezentowane wykresy wyraźnie pokazują brak symetrii mimo symetryczności zarówno konstrukcji i obciążenia, coś świadczy o zmiennych wartościach fizyko-mechanicznych elementów konstrukcji.

Można oczywiście dywagować, czy symetria obciążenia i konstrukcji nie została zaburzona w trakcie badań, jednak możliwe nieznaczące odchylenia zarówno umiejscowienia konstrukcji na stanowisku badawczym, jak również przyłożenia obciążenia zewnętrznego względem osi symetrii układu, nie mogły wpływać tak wyraźnie na dystrybucję sił wewnętrznych na poszczególne elementy składowe konstrukcji ściany lub stropu.

Wyraźne różnice w wartościach w elementach symetrycznych względem osi środkowej pokazują, że zmienne wartości własności fizykomechaniczne drewna w konstrukcji może być czynnikiem w znaczący sposób wpływającym na rozkład sił wewnętrznych. Dlatego też bardzo ważne jest pamiętanie w trakcie zarówno

projektowania, jak i montażu o tych cechach drewna, ażeby nie narazić się na niebezpieczeństwo utraty nośności przez konstrukcję w najmniej spodziewanym miejscu.

Literatura

- Baszeń M. (2004). Model obliczeniowy elementów z otworami konstrukcji szkieletowych budynków drewnianych z poszyciem wraz z weryfikacją doświadczalną. Praca doktorska, *Politechnika Białostocka* 2004.
- Baszeń M., Miedziałowski Cz. (2006). Badania elementów stropowych z otworami szkieletowych budynków drewnianych. W: *VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin, 2006, 71-78.
- Kokociński W. (2004). Drewno. Pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych. *Prodruck*, Poznań, 2004.
- Miedziałowski Cz., Baszeń M. (2007). Analiza numeryczna i badania drewnianych szkieletowych elementów ściennych z otworami. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/2007, 47-49.
- Wood handbook - Wood as an engineering material. (2010). General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: *U.S. Department of Agriculture*, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010, 508 p.

THE INFLUENCE OF DIVERSITY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD ON THE STRESS DISTRIBUTION IN STRUCTURAL ELEMENTS

Abstract: The influence of physical and mechanical properties of wood on the stress distribution and joint displacements in the wall and floor elements in the light wood framed structures was presented in this paper. There were presented stress values and displacement of construction obtained during the experimental tests in Białystok Technical University, as well the values of physical and mechanical properties of wood used in the analyzed structures.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy własnej W/WBIS/9/09 realizowanej w Politechnice Białostockiej