

AUTOREFERAT

prezentujący dorobek i osiągnięcia naukowe

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy
Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki
Instytut Techniki
Zakład Konstrukcji Drewnianych

SPIS TREŚCI

1. IMIĘ I NAZWISKO	3
2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE:	3
3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:.....	3
4. OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ DO UBIEGANIA SIĘ O STOPIEŃ NAUKOWY DOKTORA HABILITOWANEGO	4
4.1. Osiągnięcie naukowe	4
4.2. Cel naukowy pracy, osiągnięte wyniki oraz omówienie ich ewentualnego wykorzystania	4
4.2.1. Wprowadzenie	4
4.2.2. Modele anizotropii właściwości sprężystych płyty wiórowej i MDF	5
4.2.3. Wpływ gęstości płyt na ich właściwości sprężyste	5
4.2.4. Rozkład modułu Younga na grubości płyty	6
4.2.5. Właściwości sprężyste płyty wiórowej i MDF jako płyt trzywarstwowych	6
4.2.6. Metody wyznaczania stałych sprężystości warstw płyt	6
4.2.7. Modelowanie struktury płyt za pomocą metod numerycznych.....	7
4.2.8. Cel i zakres pracy.....	8
4.2.9. Wyniki badań.....	9
4.2.10. Wnioski	15
5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH	18
6. PODSUMOWANIE.....	22

1. IMIĘ I NAZWISKO

Marek Kociszewski

2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE:

1993 – magister wychowania technicznego, Wydział Matematyki i Techniki, Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Bydgoszczy

2001 – doktor nauk leśnych w zakresie drzewnictwa – stopień naukowy nadany uchwałą Rady Wydziału Technologii Drewna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie 28 czerwca 2001 r.

Tytuł rozprawy: „Badanie połączeń narożnikowych ściennych”,

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:

1.10.1993 – obecnie – Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy (wcześniej Wyższa Szkoła Pedagogiczna, Akademia Bydgoska), Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki

1993 – 2001 – asystent

2001 – 2016 – adiunkt

2016 – obecnie – asystent

4. OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ DO UBIEGANIA SIĘ O STOPIEŃ NAUKOWY DOKTORA HABILITOWANEGO

4.1. OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE

Zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) jako osiągnięcie naukowe wybrałem rozprawę:

„Właściwości sprężyste płyty wiórowej i MDF jako materiałów anizotropowych o nierównomiernym rozkładzie gęstości na grubości płyty”.

Marek Kociszewski

Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy ISBN 978-83-7096-966-0
Recenzenci wydawniczy: dr hab. inż. Piotr Borysiuk, dr hab. inż. Piotr Pohl

4.2. CEL NAUKOWY PRACY, OSIĄGNIĘTE WYNIKI ORAZ OMÓWIENIE ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA

4.2.1. Wprowadzenie

Płyty wiórowe i MDF są szeroko stosowanymi materiałami konstrukcyjnymi. Często wykonuje się z nich elementy lub całe konstrukcje, które poddawane są znacznym obciążeniom. Projektowanie tych elementów/konstrukcji wymaga bazowania na obliczeniach wytrzymałościowych, które z kolei wymagają znajomości właściwości mechanicznych płyt. Pomimo wielu badań właściwości te nie są dostatecznie poznane. Płyty wiórowe i MDF są bowiem, w odróżnieniu od większości materiałów konstrukcyjnych – np. metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych, materiałami cechującymi się dużą niejednorodnością budowy. Składają się z drobnych cząstek drzewnych usytuowanych względem siebie w sposób nieuporządkowany a ponadto w wyniku procesu prasowania ich gęstość jest mocno zróżnicowana – warstwy leżące blisko powierzchni mają znacznie większą gęstość niż warstwy środkowe. Niejednorodność struktury na grubości płyty charakteryzuje zwłaszcza typowe trzywarstwowe płyty wiórowe, których warstwy zewnętrzne wykonuje się z drobniejszych wiórów, stosując większy stopień zaklejenia niż w przypadku warstwy wewnętrznej. Drugim istotnym utrudnieniem w badaniu właściwości mechanicznych płyt wiórowych i MDF jest, podobnie jak w przypadku drewna, silna anizotropia tych właściwości, zwłaszcza w odniesieniu do kierunku równoległego i prostopadłego do płaszczyzny płyty.

Właściwości sprężyste są tymi właściwościami mechanicznymi płyt drewnopochodnych, od których zależą odkształcenia sprężyste poddanych obciążeniom elementów konstrukcyjnych wykonanych z tych płyt. Znajomość tych właściwości umożliwia projektowanie odpowiednio sztywnych, czyli odpornych na odkształcenia elementów konstrukcyjnych. Właściwości sprężyste materiału wyrażane są poprzez stałe sprężystości. W niektórych przypadkach wystarczające jest posłużenie się w obliczeniach projektowych stałymi sprężystości odniesionymi do płyty traktowanej jako monolit. W wielu przypadkach

konieczne staje się jednak uwzględnienie stałych sprężystości warstw płyty. Jednym z problemów jest dobór odpowiedniego modelu anizotropii właściwości sprężystych, tak w odniesieniu do płyty wiórowej lub MDF, jak i ich warstw. Analiza właściwości sprężystych tych płyt jest złożona, wymaga korzystania z teorii sprężystości ciał anizotropowych oraz mechaniki układów warstwowych. Kolejnym problemem jest wyznaczanie stałych sprężystości warstw płyt. Metody bezpośredniego wyznaczania tych stałych na próbkach danej warstwy są nieefektywne. Zachodzi więc potrzeba opracowania bardziej efektywnych metod pośrednich. Celowość poznania właściwości sprężystych warstw płyt drewnopochodnych, w tym płyt wiórowych i MDF, jest tym większa, że w coraz większym stopniu do projektowania konstrukcji zawierających te płyty stosuje się metody komputerowe, zwłaszcza metody obliczeń numerycznych bazujące na metodzie elementów skończonych.

4.2.2. Modele anizotropii właściwości sprężystych płyty wiórowej i MDF

Właściwości sprężyste płyty wiórowej i MDF przyjęto opisywać dwoma modelami: ortotropowym i poprzecznie izotropowym. W przypadku modelu ortotropowego jako główne osie sprężystości przyjmuje się: kierunek formowania kobierca płyty, kierunek styczny do płaszczyzny płyty i zarazem prostopadły do kierunku formowania kobierca oraz kierunek prostopadły do płaszczyzny płyty. Model poprzecznie izotropowy sprężystości płyty wiórowej i MDF opiera się na założeniu, że płaszczyzna płyty jest płaszczyzną izotropii właściwości sprężystych. Model ten, jako prostszy, jest częściej stosowany w odniesieniu tak do płyty wiórowej, jak i MDF. Jest lepiej dopasowany do płyty MDF niż do płyty wiórowej, gdyż płaszczyzna płyty MDF jest bardziej zbliżona do izotropowej niż płaszczyzna płyty wiórowej.

Płyty drewnopochodne cechuje silna anizotropia właściwości sprężystych. Wartość modułu Younga w kierunku z prostopadłym do płaszczyzny płyty jest wielokrotnie mniejsza od wartości modułów Younga w kierunkach zawartych w płaszczyźnie płyty. Podobna relacja dotyczy modułów ścinania, moduły w przekrojach prostopadłych do płaszczyzny płyty mają dużo mniejsze wartości niż moduł w jej płaszczyźnie. Stosowanie więc modelu izotropowego do opisu sprężystości płyty wiórowej i MDF, choć niekiedy ma to miejsce, wydaje się niedopuszczalne.

4.2.3. Wpływ gęstości płyt na ich właściwości sprężyste

Elementy konstrukcyjne wykonane z płyt wiórowych i MDF poddawane są przede wszystkim zginaniu. Jako podstawowy parametr charakteryzujący sprężystość płyt przyjmuje się, zgodnie z normami określającymi wymagania stawiane płytom drewnopochodnym, moduł sprężystości przy zginaniu. Większość badań nad sprężystością płyt dotyczy więc tego parametru. Wiąże się go m.in. ze średnią gęstością płyty, udziałem warstw zewnętrznych wykonanych z mikrowiórow (w przypadku płyt wiórowych) oraz profilem gęstości płyty, czyli rozkładem gęstości na grubości płyty. Wpływ tego ostatniego czynnika jest od dawna przedmiotem zainteresowania badaczy płyt wiórowych i MDF. Profil gęstości płyt jest zwykle mocno nierównomierny. Gęstość maksymalna jest znacznie większa od gęstości średniej, w skrajnych przypadkach nawet dwukrotnie. Kształt tego profilu może być

sterowany przez zmianę prędkości prasowania płyty, stąd jest on często przyjmowany jako czynnik zmienny w badaniach.

4.2.4. Rozkład modułu Younga na grubości płyty

Płyty drewnopochodne można traktować jako układ wielowarstwowy składający się z umownych warstewek równoległych do płaszczyzny płyty. Warstewki te różnią się nie tylko gęstością, ale i właściwościami sprężystymi. Zgodnie z mechaniką układów warstwowych dany moduł sprężystości płyty zależy od odpowiednich modułów poszczególnych warstw. Analiza tej zależności, szczególnie w odniesieniu do modułu sprężystości płyty przy zginaniu, pozwala na optymalizację struktury płyty, zwykle w celu uzyskania maksymalnej wartości tego modułu.

4.2.5. Właściwości sprężyste płyty wiórowej i MDF jako płyt trzywarstwowych

Płyty wiórowe są na ogół płytami trzywarstwowymi składającymi się z dwóch warstw zewnętrznych o jednakowej grubości oraz z warstwy wewnętrznej. Struktura tych warstw jest mocno zróżnicowana, warstwy zewnętrzne wykonywane są z drobniejszych wiórów przy większym stopniu zaklejenia i są bardziej zagęszczone niż warstwa wewnętrzna. Płyty MDF także można traktować jako trzywarstwowe z umownymi warstwami zewnętrznymi o większej gęstości. Moduły sprężystości warstwy wewnętrznej mają dużo mniejsze wartości, na ogół ponad dwukrotnie, niż odpowiednie moduły warstw zewnętrznych.

O ile właściwości sprężyste warstw trzywarstwowych płyt wiórowych w pewnym zakresie poznane są dość dobrze, o tyle właściwości umownych warstw płyt MDF – w niewielkim stopniu. W szczególności brak jest danych o stałych sprężystości warstw płyt MDF, niezbędnych do opisu modelu ortotropowego lub poprzecznie izotropowego tych warstw, zwłaszcza przy modelowaniu numerycznym elementów konstrukcyjnych z tych płyt.

4.2.6. Metody wyznaczania stałych sprężystości warstw płyt

Istnieje wiele metod wyznaczania stałych sprężystości płyt drewnopochodnych. Są to zwykle metody statyczne polegające na pomiarze odpowiednich odkształceń próbek płyty przy ich rozciąganiu, ściskaniu, zginaniu, ścinaniu lub skręcaniu. Stosuje się też metody dynamiczne polegające na pomiarze określonych parametrów drgań podłużnych lub poprzecznych wywoływanych w próbkach płyt. Tylko niektóre z tych metod są określone normami i dotyczą płyt jako ciał monolitycznych.

Oznaczanie stałych sprężystości warstw płyt drewnopochodnych nie jest objęte normami. Badacze stosują własne metody, które można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. W przypadku metod bezpośrednich próbki do badań wykonuje się z wyodrębnionych mechanicznie warstw płyty. Preferowane są metody statyczne. W celu wyznaczenia modułu Younga w płaszczyźnie warstwy stosowano próby rozciągania, ściskania i zginania. Moduł Younga w kierunku prostopadłym do płaszczyzny warstwy wyznaczano w próbie ściskania lub zginania odpowiednich próbek sklejanych z warstw. W celu wyznaczenia modułu ścinania zastosowano próbę czystego ścinania warstwy płyty w jej płaszczyźnie. W badaniach dotyczących współczynników Poissona warstw płyty wiórowej posłużono się próbami

ściskania próbek blokowych sklejonych z danych warstw płyty, mierząc za pomocą tensometrów elektrooporowych odkształcenia jednostkowe w kierunku ściskania i w kierunku prostopadłym do niego. W tych samych próbach wyznaczano moduły Younga w trzech kierunkach. Zastosowano też metodę dynamiczną, polegającą na przepuszczaniu przez próbki warstw płyty wiórowej i MDF fal ultradźwiękowych i pomiarze prędkości tych fal w celu obliczenia modułu Younga.

Drugą grupą metod wyznaczania stałych sprężystości warstw płyt drewnopochodnych są metody pośrednie. Jedną z nich związana jest z wyznaczaniem modułu Younga cienkich warstewek płyty. Polega na porównaniu odkształceń próbki płyty przed i po mechanicznym usunięciu jej dwóch zewnętrznych warstewek o jednakowej grubości. Różnica tych odkształceń jest podstawą obliczenia modułu usuniętych warstewek. Inną metodą pośrednią, zastosowano do wyznaczenia modułów ścinania warstw płyty wiórowej. Prostopadłościennie próbki sklejone z warstw zewnętrznych lub wewnętrznych w ten sposób, że płaszczyzny warstw tworzyły kąt 45° z odpowiednimi ściankami próbek (tzw. próbki diagonalne), poddawano ściskaniu i mierzono odkształcenia jednostkowe w kierunku ściskania i w kierunku prostopadłym do niego. Na podstawie tych odkształceń obliczano moduły ścinania warstw płyty w trzech płaszczyznach.

Przytoczone metody wyznaczania stałych sprężystości warstw płyt – tak bezpośrednie, jak i pośrednie – są pracochłonne i wymagają stosowania specjalnych technik pomiaru odkształceń oraz oprzyrządowania. Są więc nieefektywne w praktycznym stosowaniu. Wskazane byłoby opracowanie nowych, bardziej efektywnych metod badania właściwości sprężystych warstw płyt drewnopochodnych.

4.2.7. Modelowanie struktury płyt za pomocą metod numerycznych

Analiza właściwości sprężystych płyty drewnopochodnej traktowanej jako materiał zarówno warstwowy, jak i anizotropowy, jest zagadnieniem o dużym stopniu złożoności. Dlatego coraz częściej podejmowane są próby wykorzystania technik komputerowych do numerycznego modelowania płyty jako układu sprężystego. Podejmowano już próby stosowania metody elementów skończonych (MES) do modelowania płyty jako kompozytu warstwowego. Pozwoliło to na obliczenie sztywności płyty na podstawie właściwości sprężystych materiałów, z których zbudowane są poszczególne warstwy płyty. Mimo tego, że obiektem badań nie była typowa płyta drewnopochodna, to zastosowana w badaniach metoda jest interesująca i może być zaimplementowana do analizy materiałów drzewnych. Podobną metodę zastosowano do obliczania modułu sprężystości przy zginaniu płyt wiórowych o różnym profilu gęstości. Posłużono się dwuwymiarowymi modelami dyskretnymi, którym nadano odpowiednie do rozkładu gęstości płyt parametry materiałowe. Właściwości sprężyste tak zamodelowanych warstw płyty określono na podstawie badań cienkich płyt o jednorodnej budowie (płaskim profilu gęstości) i różnej gęstości średniej, oznaczając ich moduły w płaszczyźnie płyty. W efekcie analizy numerycznej określono rozkłady naprężeń w płycie wiórowej poddanej zginaniu oraz zależności stałych sprężystości płyty od średniej gęstości płyty oraz gęstości jej warstw zewnętrznych.

Szerokie zastosowanie MES do analizy wytrzymałościowej konstrukcji, w tym konstrukcji drewnianych, ma też odniesienie do konstrukcji o elementach z płyt wiórowych

i MDF. Płyty te są obecnie podstawowymi materiałami służącymi do wykonywania mebli skrzyniowych. Newralgicznymi węzłami tych mebli, ze względu na występowanie dużych naprężeń, są połączenia kątowe elementów z płyt. Połączenia te realizuje się za pomocą różnych złączy, stosując łączniki z różnych materiałów. Kumulacja naprężeń ma miejsce w płycie drewnopochodnej w strefie styku z łącznikiem, zwykle metalowym lub drewnianym. Należy przy tym zauważyć, że strefa ta zawarta jest głównie w warstwach wewnętrznych płyt. W licznych już aplikacjach MES do obliczania i analizy naprężeń w połączeniach płyt wiórowych i MDF przyjmowano różne uproszczenia dotyczące tak struktury, jak i właściwości sprężystych łączonych płyt. Płyty traktowano jako jednorodne, tzn. nie brano pod uwagę ich warstw o zróżnicowanych właściwościach, i przyjmowano różny stopień uproszczenia ich anizotropii: od izotropii, poprzez poprzeczną izotropię, do ortotropii. Płyty modelowano też jako trzywarstwowe, przypisując odpowiednie stałe sprężystości warstwom zewnętrznym i warstwie wewnętrznej, i operowano różnymi modelami anizotropii warstw: izotropowym, poprzecznie izotropowym i ortotropowym. W jednej z prac uwzględniono pięć warstw płyty wiórowej (poza warstwami zewnętrznymi i wewnętrzną także dwie warstwy pośrednie) przypisując im ortotropię właściwości sprężystych. MES stosowano także do modelowania konstrukcji skrzyniowych z płyt wiórowych w celu obliczania ich odkształceń przy różnych obciążeniach konstrukcji. Upraszczano jednak znacznie modelowanie, traktując płytę wiórową jako jednorodną i izotropową.

Dotychczasowe próby modelowania płyt wiórowych i MDF za pomocą MES wskazują na jej dużą przydatność zarówno do badań sprężystości płyt, jak i do analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcji wykonanych z tych płyt. Jednym z problemów związanych z tym zagadnieniem jest wpływ uproszczenia struktury trzywarstwowej płyty (zastąpienie jej strukturą jednorodną) oraz zastąpienia mocno anizotropowych właściwości sprężystych warstw płyty właściwościami izotropowymi. Kolejny problem, wynikający z możliwości modelowania za pomocą MES płyty o dowolnej liczbie umownych warstewek o różnych właściwościach sprężystych, sprowadzić można do pytania: czy modelowanie płyty wiórowej lub MDF wystarczy ograniczyć do trzech warstw, czy też odpowiednia dokładność obliczeń wymaga podziału płyty na większą liczbę warstewek, zwłaszcza warstewek zawartych w warstwach zewnętrznych płyty.

4.2.8. Cel i zakres pracy

Problemy modelowania właściwości sprężystych płyt wiórowych i MDF nie zostały dostatecznie rozwiązane a wiedza w tym zakresie ma wiele istotnych luk. Celem niniejszej pracy było rozwiązanie wybranych problemów przy uwzględnieniu warstwowej budowy płyt i anizotropii ich właściwości sprężystych.

Zakres pracy obejmował:

- określenie rozkładu na grubości płyty modułów Younga i modułu ścinania w płaszczyźnie płyty,
- określenie kompletu stałych sprężystości warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej płyty, traktowanych jako ciała ortotropowe,
- opracowanie pośredniej metody wyznaczania modułów Younga i modułu ścinania warstw płyty w płaszczyźnie płyty oraz wyznaczenie tych modułów,

- o określenie wpływu sposobu modelowania numerycznego elementów konstrukcyjnych z płyt, uwzględniającego warstwowość i anizotropię właściwości sprężystych płyt, na uzyskiwane wartości naprężeń i odkształceń w tych elementach.

Założono następujące osie ortotropii płyty: x – kierunek formowania płyty, y – kierunek związany z płaszczyzną płyty i prostopadły do kierunku formowania płyty, z – kierunek prostopadły do płyty

Obiektami badań eksperymentalnych były wytworzone fabrycznie (przemysłowe) trzywarstwowe nieokleinowane płyty wiórowe i nieokleinowane płyty MDF. Uwzględniono płyty wiórowe i MDF o różnej grubości, a w przypadku płyt wiórowych także – o różnej gęstości, wykonane przez różnych producentów.

Realizacja celów badawczych wymagała przeprowadzenia badań eksperymentalnych obejmujących trzy podstawowe etapy:

- I. Wyznaczenie rozkładu modułów sprężystości (modułów Younga oraz modułu ścinania), na grubości płyty wiórowej i MDF,
- II. Wyznaczenie stałych sprężystości płyty wiórowej i MDF traktowanych jako materiały trzywarstwowe i ortotropowe,
- III. Opracowanie nowych, pośrednich metod wyznaczania modułów sprężystości warstw płyt drewnopochodnych, przy założeniu ich trzywarstwowej budowy oraz wyznaczenie wartości tych modułów dla płyty wiórowej i MDF.

Kolejność etapów badań nie była przypadkowa. W pierwszym etapie wyznaczono rozkłady modułów Younga i modułu ścinania na grubości badanych płyt traktowanych jako układy wielowarstwowe oraz odniesiono te rozkłady do profili gęstości płyt. Analiza tych rozkładów pozwoliła na stwierdzenie, że w odniesieniu do właściwości sprężystych płytę wiórową a także płytę MDF można rozpatrywać jako układ trzywarstwowy składający się z dwóch warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej. W drugim etapie badań wyznaczono więc komplet stałych sprężystości warstw płyty wiórowej i MDF, przy założeniu ortotropii właściwości sprężystych tych warstw. Metodyka bezpośredniego wyznaczania stałych sprężystości warstw na specjalnych próbkach wykonanych z warstw wyodrębnionych mechanicznie z płyty okazała się nieefektywna. Dlatego opracowano nowe, pośrednie metody wyznaczania modułów sprężystości warstw płyty drewnopochodnej traktowanej jako układ trzywarstwowy i zastosowano je do badania modułów płyt wiórowych i MDF o różnej grubości.

4.2.9. Wyniki badań

Rozkład wartości modułów sprężystości na grubości płyty

W badaniach zastosowano pośrednią metodę wyznaczania modułu Younga warstewek płyty w ich płaszczyznach, polegającą na porównywaniu sztywności próbek płyty przy zginaniu przed i po mechanicznym usunięciu z nich górnej i dolnej warstewki. Podobną

metodę pośrednią zastosowano do wyznaczania modułu ścinania warstewek płyty w ich płaszczyznach. Polegała ona na porównaniu sztywności próbek płyty przy ich ścinaniu wywołanym skręcaniem, przed i po usunięciu z nich skrajnych warstewek. Analogiczną metodą, opartą na porównaniu mas próbek przed i po usunięciu warstewek, wyznaczono ich gęstość. W ten sposób uzyskano wartości gęstości, modułów Younga oraz modułu ścinania w płaszczyznach warstewek płyt o grubości 0,5 mm. Pozwoliło to na przedstawienie tych wielkości w postaci rozkładów na grubości płyty. Rozkłady gęstości skonfrontowano z profilami wyznaczonymi za pomocą profilografu, stwierdzając dość dobrą zgodność porównywanych wykresów zarówno dla płyty wiórowej, jak i MDF. Stwierdzono także, że rozkłady modułów mają charakterystyczną postać, podobną do rozkładu gęstości. Wartość danego modułu wzrasta przy przesuwaniu się od punktów (warstewek) zawartych w środkowej części płyty do punktów leżących w pobliżu jej zewnętrznych powierzchni, po czym maleje w ostatnich skrajnych warstewkach. Nierównomierność rozkładu modułu można wyrazić stosunkiem jego największej i najmniejszej wartości. Dla płyty wiórowej stosunki te są na poziomie 2,6; 2,7 i 2,3, odpowiednio dla modułów E_x , E_y i G_{xy} . Nierównomierność rozkładu modułów jest znacznie większa niż nierównomierność rozkładu gęstości, dla którego stosunek największej i najmniejszej wartości jest równy ok. 1,5. Dla płyty MDF największa wartość każdego z badanych modułów jest ok. 3 razy większa od wartości najmniejszej. Podobnie do płyty wiórowej, nierównomierność rozkładu modułów jest znacznie większa niż nierównomierność rozkładu gęstości płyty MDF, dla którego stosunek największej i najmniejszej wartości jest równy ok. 1,4. Wartości poszczególnych modułów warstewek płyty wiórowej i MDF wzrastają w większym stopniu ze wzrostem odległości warstewki od środka płyty niż gęstość tych warstewek. Moduły Younga w płaszczyznach wszystkich warstewek i warstwy środkowej płyt w kierunku prostopadłym do kierunku formowania płyty mają niższe wartości niż moduły w kierunku formowania płyty o 9 i 2%, odpowiednio dla płyty wiórowej i MDF. Właściwości sprężyste płyty MDF w jej płaszczyźnie są więc bliższe izotropii niż właściwości płyty wiórowej.

Stale sprężystości warstw płyt traktowanych jako układy trzywarstwowe

Celem kolejnego etapu badań było wyznaczenie kompletu stałych sprężystości warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej płyty wiórowej i MDF przy założeniu, że warstwy te są ortotropowe w odniesieniu do właściwości sprężystych. Zgodnie z definicją ortotropii właściwości sprężystych komplet stałych sprężystości warstwy płyty stanowią: trzy moduły Younga, trzy moduły ścinania i sześć współczynników Poissona. Przyjęto metodę polegającą na ściskaniu odpowiednio przygotowanych, prostopadłościennych próbek i pomiarze ich odkształceń sprężystych, opracowaną przy współdziałaniu autora pracy i stosowaną wcześniej do badania właściwości sprężystych płyt wiórowych. Jest to kompleksowa metoda, pozwalająca wyznaczyć wymieniony komplet stałych sprężystości. Korzysta się z sześciu typów próbek o jednakowych wymiarach, sklejonych z wyizolowanych mechanicznie wewnętrznych lub zewnętrznych warstw płyty. W opisywanej metodzie pomiaru odkształceń jednostkowych w kierunku ściskania i prostopadłym do niego dokonuje się za pomocą tensometrii elektrooporowej. Badaniami w tym etapie objęto płyty wytworzone przez trzech producentów.

Stałe sprężystości warstw badanych płyt wiórowych i płyty MDF obliczono na podstawie zmierzonych odkształceń próbek uwzględniając właściwości sprężyste spoiny klejowej.

W przypadku płyt wiórowych względne różnice wartości poszczególnych stałych sprężystości płyt wytworzonych przez różnych producentów były na ogół nieduże. Spośród dwunastu analizowanych stałych sprężystości warstw zewnętrznych płyty, tylko w trzech przypadkach (dwa moduły ścinania oraz jeden współczynnik Poissona) odnotowano statystycznie istotny wpływ producenta płyty. Dla pozostałych stałych sprężystości warstw zewnętrznych oraz dla wszystkich dwunastu stałych warstwy wewnętrznej wartość stałej nie zależała istotnie od wytwórcy płyty wiórowej. Z tego względu zdecydowano się na uśrednienie wartości stałych sprężystości warstw płyty, oznaczonych na płytach różnych wytwórców. W ten sposób uzyskano komplet stałych sprężystości warstw płyty wiórowej traktowanych jako ciała ortotropowe.

Analizując uzyskane wyniki porównano moduły Younga, odpowiednio warstw płyty wiórowej i MDF, dla trzech głównych kierunków sprężystości, przyjmując jako bazę porównania wartość modułu w kierunku formowania kobierca płyty (x). Moduł w kierunku osi y , stycznej do płaszczyzny płyty i jednocześnie prostopadłej do osi x , ma mniejsze wartości. Dla płyty wiórowej jest mniejszy o 14% i 13%, odpowiednio dla warstwy zewnętrznej i wewnętrznej. Dla płyty MDF różnice między wartościami modułów tych są bardzo małe i nie przekraczają 3%. Moduł w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty jest wielokrotnie niższy od modułu w kierunku formowania płyty. Jego wartość jest 9,1 i 7,7 razy mniejsza niż wartość modułu w kierunku x , odpowiednio dla warstwy zewnętrznej i wewnętrznej płyty wiórowej oraz 5,3 i 5,6 razy mniejsza dla warstwy zewnętrznej i wewnętrznej płyty MDF.

Porównano także moduły ścinania, odpowiednio warstw płyty wiórowej i MDF, w trzech płaszczyznach symetrii sprężystej, przyjmując jako bazę porównania moduł w płaszczyźnie płyty (xy). Moduły w płaszczyznach prostopadłych do płyty (xz i yz) są dużo niższe od modułu w płaszczyźnie xy . Ich wartości są odpowiednio ok. 5 razy mniejsze niż wartość modułu w płaszczyźnie płyty dla warstwy zewnętrznej i ok. 4 razy mniejsze dla warstwy wewnętrznej płyty wiórowej. W przypadku płyty MDF wartości modułów w płaszczyznach prostopadłych do płyty są ponad 4,5 razy mniejsze dla warstwy zewnętrznej i prawie 3 razy mniejsze dla warstwy wewnętrznej niż wartość modułu w płaszczyźnie danej warstwy. Wartości modułów w obu prostopadłych płaszczyznach danej warstwy dla badanych płyt różnią się w niewielkim stopniu.

Następnie porównano moduły warstw płyt, przyjmując jako podstawę porównania moduł warstwy zewnętrznej. Wartości modułów warstwy wewnętrznej są znacznie mniejsze. Wartości modułów Younga tej warstwy osiągają średnio 43% ich wartości dla warstwy zewnętrznej płyty wiórowej i 44% dla warstwy zewnętrznej płyty MDF. W przypadku modułów ścinania różnice względne między warstwami nie są tak zbliżone. Wartość modułu w płaszczyźnie warstwy wewnętrznej płyty wiórowej jest na poziomie 45%, a wartości modułów w płaszczyznach prostopadłych na poziomie 55%, wartości odpowiednich modułów warstwy zewnętrznej. Dla płyty MDF wartości modułów w płaszczyznach xy , xz i yz warstwy wewnętrznej są na poziomie 45%, 75% i 71% wartości odpowiednich modułów warstwy zewnętrznej.

Współczynniki Poissona warstw badanych płyt różniły się w niewielkim stopniu, zwłaszcza w przypadku płyty wiórowej. Warstwy zewnętrzne tej płyty mają nieco niższe współczynniki wiążące kierunki w płaszczyźnie płyty i wyższe wiążące kierunki w płaszczyznach prostopadłych do płyty. Różnice względne między współczynnikami Poissona warstwy wewnętrznej i zewnętrznej płyty wiórowej na ogół nie przekraczają 8%. Dla płyty MDF różnice między współczynnikami warstw są większe, wynosząc średnio 9% dla współczynników Poissona w płaszczyźnie płyty i 23% dla współczynników w płaszczyznach prostopadłych do płyty.

Metoda pośredniego wyznaczania modułów warstw płyty

W III etapie badań zastosowano oryginalną pośrednią metodę wyznaczania modułów sprężystości warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej płyty wiórowej i MDF, nie wymagającą mechanicznego wyodrębniania tych warstw z płyty. Bazuje ona na regule dotyczącej układu warstwowego: sztywność obciążonego w określony sposób układu jest równa sumie sztywności jego warstw. Sztywność warstwy przy danym sposobie obciążenia układu jest przy tym proporcjonalna do odpowiedniego modułu sprężystości, np. przy zginaniu – do modułu Younga warstwy w kierunku określonym przez oś podłużną zginanego układu. Idea metody, w odniesieniu do warstw płyty wiórowej lub MDF, polega na wykonaniu dwóch eksperymentów na tej samej próbce płyty różniących się sposobem obciążenia próbki. Sztywność próbki wyznaczona w pierwszym eksperymencie jest liniową funkcją modułów sprężystości warstwy zewnętrznej i wewnętrznej płyty, sztywność próbki wyznaczona w drugim eksperymencie jest natomiast inną funkcją liniową tych modułów. Zestawienie tych dwóch funkcji pozwala na obliczenie modułów warstw płyty.

Ze względu na profil właściwości sprężystych płyty wiórowej i MDF można potraktować próbkę płyty jako układ trzywarstwowy z dwoma warstwami zewnętrznymi i jedną warstwą wewnętrzną. Poddając ją dwóm kolejnym próbom: zginaniu w płaszczyźnie xz (lub yz) siłami prostopadłymi do płaszczyzny płyty i zginaniu w płaszczyźnie xy (lub yx) siłami równoległymi do płaszczyzny płyty lub zginaniu w płaszczyźnie xz (lub yz) siłami prostopadłymi do płaszczyzny płyty i rozciąganiu w kierunku osi x (lub y) i zestawiając odpowiednie równania sztywności układów warstwowo-układów uzyskano wartości modułów Younga warstwy wewnętrznej oraz warstw zewnętrznych płyty.

Moduły sprężystości płyt wyznaczone przy zginaniu siłami prostopadłymi były znacząco, średnio o około 25%, wyższe od wyznaczonych przy zginaniu siłami równoległymi. Moduły płyt wyznaczone przy rozciąganiu miały zbliżone wartości do modułów wyznaczonych przy zginaniu siłami równoległymi, średnia różnica względna wartości tych modułów wynosiła około 5% dla płyty wiórowej i 2% dla płyty MDF. Moduły przy zginaniu i rozciąganiu próbek o osi podłużnej y były mniejsze, średnio o około 10% dla płyty wiórowej i 3% dla płyty MDF, niż moduły próbek o osi podłużnej x .

Moduły E_x i E_y warstw płyty określono dwukrotnie: na podstawie modułów przy zginaniu próbek płyt siłami prostopadłymi i równoległymi do płaszczyzny płyty i na podstawie modułów przy zginaniu próbek płyt siłami prostopadłymi do płaszczyzny płyty i przy ich rozciąganiu. Założono przy tym, że warstwy zewnętrzne mają stałą grubość równą 2 mm. Wartości modułów warstw wyznaczone dwoma sposobami były zbliżone, różniąc się

średnio o około 3%. Uśredniono je więc, co ułatwiło porównania poszczególnych modułów warstw przy uwzględnieniu kierunków x i y oraz grubości płyt. Wartości modułu E_y warstw były niższe niż wartości modułu E_x . Dla płyty wiórowej średnio o 11% i 12%, odpowiednio dla warstwy zewnętrznej i wewnętrznej. Dla płyty MDF różnice między wartościami modułów E_y i E_x były bardzo małe, wartości E_y były mniejsze średnio o 3% i 4%, odpowiednio dla warstwy zewnętrznej i wewnętrznej. Wartości modułów Younga warstwy wewnętrznej były znacznie mniejsze, osiągając średnio poziom 39% wartości modułów warstw zewnętrznych dla płyt wiórowych i 43% dla płyt MDF.

Podobnie wyznaczano moduły ścinania warstw, przy czym płytę poddano zginaniu metodą skręcania kwadratowej płyty i ścinaniu tarczowemu metodą trzyszynową. Wartość modułu wyznaczonego przy skręcaniu płyty była większa o 29% dla płyty wiórowej i o 26% dla płyty MDF. Moduły ścinania G_{xy} warstw płyt w płaszczyźnie płyty obliczono przy założeniu grubości warstwy zewnętrznej równej 2 mm. Wartości modułu warstwy wewnętrznej były dużo mniejsze, osiągając poziom 45% i 49% wartości modułu warstwy zewnętrznej, odpowiednio dla płyty wiórowej i MDF.

Modelowanie numeryczne elementów z płyty wiórowej i MDF

Jak stwierdzono wcześniej, modelowanie numeryczne elementów konstrukcyjnych z płyty wiórowej i MDF cechuje uznaniowość. Płyty te traktuje się jako ciała jednorodne lub warstwowe, i przypisuje się im lub ich warstwom izotropię lub anizotropię właściwości sprężystych. Nie zostało dotychczas wyjaśnione, jaki jest wpływ sposobu modelowania elementów konstrukcyjnych z tych płyt na wyniki analizy wytrzymałościowej, w tym analizy za pomocą MES. W celu określenia tego wpływu poddano analizie numerycznej: element zginany w postaci typowej próbki do wyznaczania właściwości mechanicznych płyty przy zginaniu i węzeł konstrukcyjny mebla skrzyniowego w postaci połączenia narożnikowego ze złączem kołkowym.

Model zginanej próbki, mający postać znormalizowanej próbki o szerokości 50 mm, długości 410 mm i grubości 18 mm, składał się z 17 warstewek: środkowej o grubości 10 mm oraz 8 górnych i dolnych o grubości 0,5 mm, podzielonych na 8-węzłowe bryłowe elementy skończone. Wybrany węzeł modelu odebrano odpowiednie stopnie swobody, symulując symetryczne podparcie próbki w rozstawie 360 mm. Do określonych węzłów modelu przyłożono, równomiernie rozłożone na jego szerokości, siły węzłowe, w taki sposób, aby odwzorować czteropunktowy schemat zginania próbki siłami o wartościach 50 N i rozstawie 200 mm.

Warstwom modelu przypisano odpowiednie właściwości materiałowe, stosując różne sposoby modelowania tych właściwości na grubości płyty:

- stały izotropowy – właściwości sprężyste są jednakowe na grubości płyty, cechuje je izotropia,
- stały ortotropowy – właściwości sprężyste są jednakowe na grubości płyty, cechuje je ortotropia,
- trzywarstwowy izotropowy – płyta składa się z trzech warstw, właściwości sprężyste warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej są różne, cechuje je izotropia,
- trzywarstwowy ortotropowy – płyta składa się z trzech warstw, właściwości sprężyste

- warstw zewnętrznych i warstwy wewnętrznej są różne, cechuje je ortotropia,
- zmienny izotropowy – rozkład właściwości sprężystych na grubości płyty jest zmienny, właściwości te cechuje izotropia,
 - zmienny ortotropowy – rozkład właściwości sprężystych na grubości płyty jest zmienny, właściwości te cechuje ortotropia.

Obliczenia numeryczne dla przyjętych modeli elementu zginanego wykonano za pomocą programu Autodesk Algor Simulation 2010. Z porównania maksymalnych wartości naprężeń w rozpatrywanych modelach elementu zginanego z płyty wiórowej i MDF wynika, że w modelach 1-warstwowych są one znacznie mniejsze niż w wielowarstwowych. Średnio dla 1-warstwowych modeli izotropowych i ortotropowych naprężenia maksymalne są mniejsze o 32% (płyta wiórowa) i o 26% (MDF) niż dla modeli 17-warstwowych. Różnice między naprężeniami w modelach 3-i 17-warstwowych są nieduże – około 7% w przypadku modeli płyty wiórowej i 1% w przypadku modeli płyty MDF. Naprężenia maksymalne w modelach warstwowych z izotropią i ortotropią właściwości sprężystych różnią się nieznacznie – średnio o około 4% w przypadku modeli płyty wiórowej i 1% w przypadku płyty MDF. Wynika to z faktu, że zgodnie z teorią czystego zginania, przy uwzględnieniu hipotezy płaskich przekrojów, naprężenia te są proporcjonalne do modułu E_x warstwy/warstewki zewnętrznej, mającego zbliżone wartości dla modeli warstwowych z izotropią i ortotropią właściwości sprężystych.

Można ostatecznie stwierdzić, że analiza wytrzymałościowa za pomocą MES, w tym wyznaczanie naprężeń w zginanych elementach z płyty wiórowej lub MDF, wymaga uwzględnienia warstwowej struktury tych płyt, nie jest natomiast konieczne przypisywanie warstwom/warstewkom płyty anizotropii ich właściwości sprężystych.

Analizie poddano następnie model połączenia, odzwierciedlając rzeczywiste połączenie narożnikowe elementów płytowych o złączu kołkowym. Podobnie jak w przypadku próbki poddanej zginaniu, przy modelowaniu łączonych elementów płytowych uwzględniono ich wielowarstwową budowę. Tworząc model dyskretny zastosowano elementy bryłowe cztero- i ośmiowęzłowe, co pozwoliło na zagęszczenie siatki elementów skończonych w miejscach oczekiwanych spiętrzeń naprężeń. W celu dokładnego odwzorowania pracy połączenia podczas działania sił zwierających jego ramiona, do powierzchni styku łączonych płyt wprowadzono elementy kontaktowe pozwalające na wywołanie nacisku elementu krawędziowego na element licowy. Rozpatrzono modele połączenia narożnikowego elementów z płyt wiórowych i MDF, z kołkiem z drewna bukowego i ze spoiną klejową z kleju polioctanowinyłowego. Uwzględniono, podobnie jak w przypadku płytowego elementu zginanego, trzy warianty warstwowej budowy płyt i dwa modele właściwości sprężystych warstw/warstewek płyt, przyjmując stałe sprężystości grup materiałowych dla poszczególnych modeli płyt jak w analizie zginanej płyty.

W celu określenia wpływu sposobu modelowania płyty wiórowej i MDF na stan naprężenia w analizowanym połączeniu, porównano wartości wyznaczonych naprężeń w istotnych, z wytrzymałościowego punktu widzenia, jego miejscach. Na podstawie analizy map naprężeń w płaszczyźnie symetrii połączenia, wybrano dwa punkty, w których dochodzi do znaczącego spiętrzenia naprężeń: punkt *A* w warstwie zewnętrznej elementu licowego, nad kołkiem oraz punkt *B* w warstwie wewnętrznej elementu krawędziowego, nad kołkiem.

Punkty te usytuowane są bardzo blisko siebie, należą jednak do różnych grup materiałowych płyt. Skutkuje to wpływem sposobu modelowania płyty na wartości naprężeń w tych punktach. Dodatkowo, wybrano jeszcze punkt *C*, położony w warstwie wewnętrznej elementu licowego, tuż przy końcu kołka, w miejscu, w którym najczęściej dochodzi do zniszczenia połączenia poprzez rozwarstwienie elementu licowego.

Niezależnie od rodzaju łączonych płyt oraz przyjętego modelu ich właściwości sprężystych, wartości naprężeń w połączeniu z 1-warstwowym modelem płyty różnią się, na ogół znacznie, od wartości naprężeń w połączeniach z 3 lub 17-warstwowym modelem płyty. Różnice względne wartości naprężeń w połączeniach z 1-warstwowym i 17-warstwowym modelem płyty wynoszą średnio 16 i 21%, odpowiednio dla połączeń płyty wiórowej i MDF. Największa różnica (54%) dotyczy naprężenia normalnego w punkcie *B* połączenia płyt wiórowych z przypisaną izotropią właściwości sprężystych. W przypadku punktu *C*, różnice wartości naprężeń w porównywanych połączeniach są jeszcze większe i wynoszą średnio 35 i 34%, odpowiednio dla połączeń płyty wiórowej i MDF, a w skrajnym przypadku aż 75% (naprężenie normalne w połączeniu płyt MDF z przypisaną izotropią właściwości sprężystych). Naprężenia w połączeniach, zarówno płyt wiórowych, jak i MDF, z 3-warstwowym i 17-warstwowym modelem płyt różnią się znacznie mniej, średnio o około 5%. Wyznaczając naprężenia w węzłach konstrukcyjnych płyt wiórowych i MDF za pomocą MES można więc posługiwać się modelem 3-warstwowym płyt. Niedopuszczalne jest natomiast modelowanie łączonych płyt jako 1-warstwowym (jednorodnym). Obliczone dla połączeń z 17-warstwowymi modelami płyt względne różnice pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonych dla połączeń płyt z izotropią i ortotropią właściwości sprężystych wahają się w zakresie od 11% do 198% dla połączeń płyty wiórowej i od 25% do 130% dla połączeń płyty MDF. Uproszczenie modelu anizotropii warstw płyty wiórowej i MDF do izotropii skutkuje uzyskaniem w połączeniach tych płyt wartości naprężeń znacząco różnych od rzeczywistych i nie powinno być stosowane w praktyce.

Określono także wpływ modelowania płyt na odkształcenie połączenia narożnikowego. Jako reprezentatywne przyjęto przemieszczenie dolnej krawędzi elementu krawędziowego w kierunku działania siły obciążającej połączenie. Dla połączeń z 1-warstwowym modelem płyty jest ono mniejsze, średnio o 13% niż dla połączeń z wielowarstwowymi modelami płyty. Różnice przemieszczenia dla połączeń z 3 i 17-warstwowym modelem płyty są nieduże, ich średnia jest równa około 3%. Duży wpływ na rozpatrywane przemieszczenie ma model sprężystości płyt tworzących połączenie. Dla połączeń płyt z założoną izotropią właściwości sprężystych jest ono mniejsze, średnio o prawie 40%, niż dla połączeń płyt z założoną ortotropią tych właściwości.

4.2.10. Wnioski

1. Płyty wiórowe i MDF cechują się nierównomiernym rozkładem właściwości sprężystych na grubości płyty. Dotyczy to modułów Younga w kierunkach związanych z płaszczyzną płyty oraz modułu ścinania w tej płaszczyźnie. Rozkłady te są podobne do rozkładów gęstości, przy czym są bardziej nierównomierne. Wyrażona stosunkiem największej i najmniejszej wartości nierównomierność rozkładu modułów, jest dla płyty wiórowej i MDF na poziomie odpowiednio 2,5 i 3, przy wartości tego stosunku dla rozkładu

gęstości równym odpowiednio 1,5 i 1,4.

2. Ze względu na wynikający z technologii prasowania płyt kształt profilu gęstości, a w przypadku płyt wiórowych także zróżnicowany surowiec do ich wytwarzania, mogą być one traktowane jako materiały warstwowe, złożone z dwóch warstw zewnętrznych oraz warstwy wewnętrznej. Uproszczone rozkłady modułów sprężystości na grubości płyty, o stałych uśrednionych wartościach modułu na grubości warstwy zewnętrznej i wewnętrznej płyty są dobrze dopasowane do rzeczywistych rozkładów tych modułów.
3. Warstwy płyty wiórowej i MDF charakteryzują się silną anizotropią właściwości sprężystych. Moduł Younga warstw w kierunku prostopadłym do płyty jest dla płyty wiórowej około 8 razy, a dla płyty MDF ponad 5 razy mniejszy niż moduł w kierunku stycznym do płyty. Dotyczy to również modułów ścinania warstw, które w płaszczyznach prostopadłych do płyty są kilka razy mniejsze niż w płaszczyźnie stycznej do płyty.
4. Moduły Younga warstw płyty dla dwóch głównych kierunków sprężystości w płaszczyźnie płyty, kierunku formowania kobierca płyty i kierunku prostopadłego do niego, różnią się średnio o 14% dla płyty wiórowej i 2% dla płyty MDF. Można zatem uznać warstwy płyty MDF jako izotropowe w swoich płaszczyznach, a warstwy płyty wiórowej jako izotropowe w przybliżeniu.
5. Moduły sprężystości warstwy wewnętrznej płyt są znacznie mniejsze od modułów warstw zewnętrznych. Wartości modułów warstwy wewnętrznej osiągają poziom od 41 do 55% wartości odpowiednich modułów warstw zewnętrznych w przypadku płyty wiórowej i od 43 do 75% w przypadku płyty MDF.
6. Moduły sprężystości warstw płyt wyznaczone za pomocą trzech metod, dwóch bezpośrednich i pośredniej, mają zbliżone wartości. Różnice względne tych wartości w większości przypadków nie przekraczają 10%. Potwierdza to poprawność zastosowanych metod badania właściwości sprężystych warstw płyt. Większe na ogół wartości modułów sprężystości warstw wyznaczone za pomocą metody pośredniej mogą wynikać z faktu kumulowania się błędów dwóch sposobów wyznaczania danego modułu składających się na metodę pośrednią.
7. Bezpośrednie metody wyznaczania stałych sprężystości warstw, polegające na badaniu próbek z mechanicznie wyodrębnionych warstw płyty, są mało efektywne. Znacznie prostsza jest oryginalna, po raz pierwszy zastosowana w badaniach, metoda pośrednia polegająca na użyciu kolejno dwóch sposobów obciążenia próbki płyty i obliczeniu modułu sprężystości warstw płyty na podstawie odkształceń próbki przy tych sposobach obciążenia. W celu wyznaczenia modułu Younga warstwy można to zrealizować w prosty sposób poprzez zginanie próbki płyty w płaszczyźnie prostopadłej a następnie równoległej do płyty. Co prawda do obliczenia modułów warstw konieczne jest założenie ich grubości, ale przyjęcie grubości warstwy zewnętrznej w zakresie od 2 do 3 mm w niewielkim stopniu wpływa na obliczone wartości modułów.
8. Modelowanie numeryczne elementów konstrukcyjnych z płyt wiórowych i MDF za pomocą metody elementów skończonych (MES) powinno uwzględniać różne właściwości sprężyste warstw płyty oraz ich anizotropię – ortotropię lub izotropię

poprzeczną. Przyjęcie jednowarstwowego modelu płyty, a w szczególności izotropii właściwości sprężystych, może skutkować uzyskaniem błędnych wartości naprężeń i odkształceń w obciążonych elementach. W celu prawidłowego modelowania elementów konstrukcyjnych z płyt wiórowych i MDF wystarczające jest przyjęcie trzywarstwowego modelu płyty, natomiast konieczne jest założenie ortotropii lub przynajmniej poprzecznej izotropii właściwości sprężystych warstw płyty.

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

Prowadzone przeze mnie prace obejmują pięć zasadniczych obszarów badawczych:

1. Właściwości mechaniczne płyt drewnopochodnych traktowanych jako materiały niejednorodne i anizotropowe.
2. Badania właściwości fizycznych i mechanicznych płyt wiórowych użytkowanych w różnych warunkach wilgotnościowych oraz poprawa tych właściwości poprzez poddanie płyt modyfikacji termicznej.
3. Analiza wytrzymałościowa konstrukcji meblowych.
4. Badania kompozytów drzewno-polimerowych (WPC) wytwarzanych metodą wtryskiwania.
5. Zwiększenie właściwości wytrzymałościowych klejonych warstwowo belek drewnianych poprzez wzmocnienie ich włóknem polimerowym.

Ad. 1.

Badania właściwości mechanicznych płyt drewnopochodnych jako materiałów anizotropowych rozpocząłem już w 1999 roku, opracowując jako współautor nową, opartą na radzieckich normach GOST, metodę wyznaczania stałych sprężystości tych płyt. Polega ona na poddaniu pryzmatycznej próbki obciążeniom ściskającym i pomiarze wywołanego tym obciążeniem odkształcenia. W przeciwieństwie do litego drewna, nie można z płyty drewnopochodnej wyciąć odpowiednio dużych próbek pozwalających na pomiar odkształceń w każdym z trzech głównych kierunków płyty. Dotyczy to przede wszystkim kierunku prostopadłego do płaszczyzn płyty, dla którego konieczne było wykonanie próbek wyciętych z bloków sklejonych płaszczyznami płyt. Wykorzystując tę metodę wyznaczono wartości stałych sprężystości płyty wiórowej i MDF jako ciał poprzecznie izotropowych (załącznik II.D poz. 5, 8) stwierdzając, że wartość modułu Younga w kierunku stycznym jest dla płyty MDF ok. 7 razy, a dla płyty wiórowej ok. 8 razy większa od modułu sprężystości w kierunku prostopadłym do płaszczyzn płyty.

Wyniki tych badań skłoniły mnie do podjęcia prac nad wyznaczeniem właściwości mechanicznych płyt przy zginaniu w zależności od przyjętej płaszczyzny obciążania. W badaniach tych, stosując odpowiednio wykonane próbki płyt, wyznaczono moduł sprężystości przy zginaniu i wytrzymałość na zginanie powszechnie stosowanych płyt drewnopochodnych (płyty wiórowej, MDF, HDF, płyty pilśniowej twardej) dla trzech głównych kierunków płyty. Uzyskane wyniki potwierdziły silną anizotropię właściwości mechanicznych płyt w ich płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni płyty (załącznik II.D poz. 17, 26). Dla szczególnego przypadku zginania w płaszczyźnie prostopadłej do płyty, gdy oś zginania jest prostopadła do płaszczyzny płyty, wartości modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie są bardzo małe. Stwierdzono także, że wartości modułu sprężystości i wytrzymałości przy zginaniu w płaszczyźnie płyty są mniejsze niż przy zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do płyty, co ma szczególnie ważne znaczenie w przypadku stosowania płyt drewnopochodnych jako środki belek dwuteowych, w których zginane są one w płaszczyźnie równoległej do szerokiej powierzchni płyty. Zauważono, że płyty

wiórowe charakteryzują się większym zróżnicowaniem swych właściwości przy zginaniu w porównywanych płaszczyznach niż płyty pilśniowe.

Badania te poszerzono następnie o analizę właściwości mechanicznych warstw płyty. W tym celu zaimplementowano stosowane wcześniej metody wyznaczania tych właściwości przy ściskaniu i zginaniu klejonych próbek, do badania próbek wykonanych z warstwy wewnętrznej i warstw zewnętrznych. Wyodrębnione mechanicznie warstwy płyty sklejano w bloki, z których następnie wycinano próbki o odpowiedniej wielkości. Dużym problemem było wytworzenie próbek do badania właściwości mechanicznych przy zginaniu warstw zewnętrznych płyty w kierunku prostopadłym do jej płaszczyzn. Składały się one bowiem ze 150 warstw o grubości 2 mm. Badania te prowadzono najpierw traktując warstwy płyty jako poprzecznie izotropowe w swojej płaszczyźnie (załącznik II.D poz. 21), a następnie założono ortotropowy model materiału, co wpłynęło na zwiększenie wymaganej liczby próbek (załącznik II.D poz. 25, 28, 29). Stwierdzono, że zarówno warstwa wewnętrzna, jak i warstwy zewnętrzne płyt charakteryzują się, podobnie jak lite płyty, silną anizotropią właściwości mechanicznych. Moduł sprężystości przy zginaniu oraz wytrzymałość na zginanie w kierunku stycznym do warstwy płyty mają wielokrotnie większą wartość od tych właściwości w kierunku prostopadłym. Ponadto, wykazano, że warstwy zewnętrzne mają wartości właściwości mechanicznych przy zginaniu blisko cztery razy, w przypadku płyty wiórowej i ponad dwa razy, w przypadku MDF większe niż warstwy wewnętrzne płyt (załącznik II.D poz. 46).

Ad. 2.

Wodoodporne płyty drewnopochodne od lat mają duże zastosowanie w przemyśle budowlanym, zwłaszcza w budownictwie domów drewnianych. Najbardziej popularna jest płyta OSB, która znalazła swoje miejsce jako materiał okładzinowy podłóg, ścian stropów czy dachów. Nadal jednak szuka się nowych materiałów, mogących być dla tej płyty alternatywą. Należą do nich m.in. produkowana w Polsce płyta budowlana MFP, czy sprowadzana do kraju płyta Durelis. Jako płyty budowlane są one narażone na zróżnicowane warunki wilgotnościowe. Dotychczasowe badania płyt drewnopochodnych pokazują, że wilgotność otoczenia, któremu poddana jest płyta ma znaczący wpływ na jej właściwości fizyczne i mechaniczne. Skłoniło mnie to do przeprowadzenia badań, nad wpływem wilgotności na właściwości mechaniczne stosowanych obecnie w Polsce płyt wiórowych, zwłaszcza nie badanych jeszcze pod tym kątem płyt MFP i Durelis. W efekcie badań określiłem zależności właściwości fizycznych i mechanicznych tych płyt od wilgotności otoczenia w której są przetrzymywane, a także od wilgotności samych płyt. Stwierdziłem, że wilgotność równoważna i spęcznienie na grubość badanych płyt zwiększają się nieliniowo, a moduł sprężystości oraz wytrzymałość na zginanie i rozciąganie poprzeczne nieliniowo obniżają się wraz ze wzrostem wilgotności otoczenia. Nowością tych badań było określenie wpływu wilgotności na moduł ścinania w płaszczyźnie płyt drewnopochodnych, a także na właściwości mechaniczne przy zginaniu siłami równoległymi do płaszczyzn płyt. Dotychczas opublikowano tylko część wyników badań dotyczącą płyty MFP (załącznik II.D.71, 75)

Prowadziłem także badania nad próbą poprawy odporności tych płyt na wilgoć poprzez poddanie ich modyfikacji termicznej. Podczas prowadzonych eksperymentów

nagrzewano próbki płyt w suszarce w zakresie temperatur 140-200C przez okres od 1 do 4 godzin. Stwierdzono, istotną zależność właściwości fizycznych i mechanicznych badanych płyt od uwzględnionych czynników zmiennych, zwłaszcza od temperatury nagrzewania. Wyniki tych badań są w trakcie publikacji (załącznik D.II.76)

Ad. 3.

Poprawnie zaprojektowany i skonstruowany wyrób meblowy musi posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne, pozwalające na jego bezpieczne użytkowanie. Właściwości te, zależą od wielu czynników: materiałowych, konstrukcyjnych i technologicznych. Badania wpływu wybranych czynników konstrukcyjnych były przedmiotem prowadzonych przeze mnie prac badawczych. Brałem m.in. udział w analizie sztywności regału bibliotecznego, którego elementy łączone były na wkręty typu konfirmat. W wyniku tych analiz określono wpływ sposobu mocowania ściany tylnej regału (załącznik II.D.55) oraz zastosowania kołków ustalających w złączach (załącznik II.D.58) na sztywność regału. Dodatkowo, zaproponowano polepszenie sztywności konstrukcji meblowej poprzez zastosowanie uźebrowanego cokołu o zwiększonej sztywności (załącznik II.D.3).

Właściwości mechaniczne mebla zależą w znacznej mierze od sztywności i wytrzymałości zastosowanych w jego konstrukcji połączeń. Na te właściwości połączenia największy wpływ mają czynniki konstrukcyjne, to znaczy te, które mają związek z zastosowanym w połączeniu typem złącza oraz jego wymiarami. Prowadzone przeze mnie badania miały charakter teoretyczny i eksperymentalny. Pierwsze przeprowadzono przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, uwzględniając anizotropię właściwości sprężystych łączonych materiałów. Ich efektem było określenie rozkładów najważniejszych składowych tensora naprężenia w najbardziej zagrożonych miejscach badanych złączy oraz ustalenie wpływu wymiarów złączy i grubości łączonych płyt na maksymalne wartości tych naprężeń. Drugie, pozwoliły na empiryczne określenie zależności sztywności i nośności połączenia od rodzaju i wymiarów zastosowanego złącza i grubości łączonych płyt. Wyniki badań zostały opublikowane na łamach czasopism naukowych oraz materiałach konferencyjnych (załącznik II.D poz. 9, 11, 14, 16, 18, 19, 22, 23, 30)

Ad. 4.

Innym obszarem moich zainteresowań badawczych są kompozyty drzewno-polimerowe (WPC), które przy stale wzrastającym zapotrzebowaniu przemysłu meblowego na surowiec drzewny, mogą być substytutem drogiego drewna litego, czy typowego tworzywa drzewnego. Kompozyt ten, będący mieszaniną tworzywa termoplastycznego i frakcji drzewnej w postaci „mączki” lub wiórów, wytwarza się różnymi metodami (wtryskiwanie, wytłaczanie, prasowanie) stosując maszyny przetwórcze typowe dla polimerów termoplastycznych. Zdecydowaną zaletą kompozytów drzewno-polimerowych, odróżniającą je od drewna czy tworzyw drzewnych, jest znacznie większa odporność na działanie czynników zewnętrznych, głównie wody i światła.

Badania, które realizowałem m.in. z pracownikami Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, koncentrowały się na dwóch głównych zagadnieniach: określeniu właściwości fizycznych i mechanicznych WPC z dużymi cząstkami drzewnymi oraz zbadaniu możliwości wykorzystania

produkcyjnych i użytkowych odpadów drzewnych do napełniania tworzyw polimerowych. Badania te prowadzone były w ramach projektu badawczego MNiSW „Wykorzystanie użytkowych płyt wiórowych do wytwarzania kompozytów drzewno-polimerowych”, w którym byłem jednym z głównych wykonawców.

Typowe kompozyty drzewno-polimerowe są wytwarzane przy użyciu małych cząstek lub krótkich włókien drzewnych. Jest to podyktowane przede wszystkim ograniczonymi możliwościami współcześnie stosowanych maszyn przetwórczych. W ramach prowadzonych badań wykonano kompozyty z cząstkami o znacznie większych rozmiarach, które stosowane są do przemysłowej produkcji płyt wiórowych. Stosując sита o znormalizowanych oczkach wykonano rozdział frakcyjnego wiórów na cztery grupy o rozmiarach 0,25-0,5 mm, 0,5-1,0 mm, 1,0-2,0 mm i 2,0-4,0 mm. Frakcje pylistą i cząstki, które nie przeszły przez sito o oczku 4,0 mm odrzucono. Uzyskanymi cząstkami o różnych rozmiarach napełniano najczęściej stosowane tworzywa polimerowe: polipropylen (PP), polietylen o niskiej gęstości (LDPE), polietylen o wysokiej gęstości (HDPE) oraz polichlorek winylu. Stwierdzono, że niezależnie od rodzaju polimeru właściwości fizyczne i mechaniczne WPC istotnie zależą od rozmiaru zastosowanych cząstek drzewnych, jednak najwyższe parametry wytrzymałościowe ma kompozyt z cząstkami o rozmiarach od 1 do 2 mm. Dodatkowo wykonano badania metodyczne, których celem było stwierdzenie, czy oznaczone właściwości mechaniczne zależą od wielkości próbki, na których są wyznaczane. Dotychczas w literaturze nie podnoszono tego zagadnienia, przyjmując zawsze normatywne rozmiary próbek o przekroju części roboczej 10 x 4 mm, jednak dla kompozytów z dużymi cząstkami, próbki o tym rozmiarze mogły być niewystarczające. Wyniki przeprowadzonych testów oraz wykonana na ich podstawie analiza wariancji wykazały znaczący wpływ rejestrowanych z eksperymentu wartości modułu sprężystości i wytrzymałości kompozytów od wielkości próbek badawczych. Istotnym wnioskiem z badań jest zalecenie proporcjonalnego zwiększenia rozmiaru próbki do oznaczania właściwości WPC z cząstkami większymi od tradycyjnej mączki drzewnej. Wyniki przeprowadzonych badań opublikowano w czasopiśmie naukowych oraz materiałach konferencyjnych (załącznik II.A poz. 2, 4, 6 i II.D poz. 52, 58, 62).

Drugi nurt podejmowanych przeze mnie badań związanych z WPC dotyczy wykorzystania odpadów drzewnych do wytwarzania tych kompozytów. Dzięki wysokiemu poziomowi produkcji płyt drewnopochodnych oraz mebli polski przemysł drzewny generuje znaczące ilości odpadów produkcyjnych w postaci wiórów, trocin, pyłów, itp. Ponadto, coraz krótszy okres życia konstrukcji meblowych sprawia, że coraz większa ich ilość trafia na wysypiska śmieci. Stąd tak ważnym zagadnieniem jest poszukiwanie nowych rozwiązań ich utylizacji, a jeszcze lepiej nowych kierunków ich powtórnego wykorzystania. Stąd prowadzone w ramach projektu badania w tym zakresie. W ich wyniku stwierdzono, że zarówno odpady z obróbki drewna litego (kora, wióry, trociny), jak również z produkcji płyt wiórowych (zaklejone wióry, ścinki po formatowaniu i pył po kalibracji płyt) mogą być z powodzeniem wykorzystane do wytwarzania WPC bez szkody dla ich właściwości fizycznych i mechanicznych. Ponadto wykazano, że WPC może być wykonany z przemiału użytkowych płyt wiórowych, co może być znakomitym rozwiązaniem na zwiększające się ilości użytkowych mebli skrzyniowych. Warty podkreślenia jest fakt, że zawarta w płycie żywica klejowa nie pogarsza właściwości kompozytu, a także nie wydziela szkodliwych substancji podczas jego wytwarzania, co potwierdziła analiza wykonana przez Wojewódzką

Stację Sanitarno-Epidemiologiczną. Wyniki tych badań przedstawiono w licznych publikacjach (załącznik II.A poz. 7 i II.D poz. 38, 40, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 61, 63, 65, 66, 73).

Ad. 5.

Zbudowanie wielkogabarytowej konstrukcji drewnianej wymaga stosowania belek wykonanych w technologii drewna klejonego warstwowego. Mimo tego, w pewnych sytuacjach, zastosowanie takiego materiału może nie być wystarczające. Dotyczy to na przykład dźwigarów o bardzo dużej rozpiętości lub belek o zewnętrznie ograniczonym polu przekroju. Dlatego stosuje się dodatkowe wzmocnienia z innych materiałów, które po zamocowaniu stanowią swego rodzaju zbrojenie, tworząc razem z konstrukcją drewnianą zbrojoną belkę. Tego typu belki były obiektem kierowanych przeze mnie badań, realizowanych przez pracowników Katedry Konstrukcji Drewnianych UKW na zlecenie Fabryki Konstrukcji Drewnianych w Paproci (załącznik I.4). Badania miały na celu opracowanie i wdrożenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych belek drewnianych wzmocnianych prętami kompozytowymi zawierającymi włókno szklane lub węglowe. W badaniach uwzględniono zmienny moduł sprężystości prętów, ich zmienną liczbę i średnicę, przy założeniu, że pręty są usytuowane wewnątrz belki.

Moje uczestnictwo w badaniach obejmowało wykonanie analizy teoretycznej wpływu wybranych czynników na stan odkształcenia i naprężenia w belce poddanej obciążeniom zginającym. Stosując metodę elementów skończonych określiłem wpływ zastosowanych włókien wzmocniających na sztywność i nośność belki oraz wyznaczyłem rozkłady naprężeń w jej przekroju poprzecznym. Ponadto koordynowałem badania eksperymentalne, mające na celu zweryfikowanie przeprowadzonych analiz teoretycznych oraz określenie wpływu sposobu osadzenia prętów w belce na jej właściwości mechaniczne. Efektem przeprowadzonych badań jest raport z projektu, który został przekazany prezesowi Fabryki Konstrukcji Drewnianych w Paproci.

6. PODSUMOWANIE

Mój dorobek naukowy obejmuje 84 prace naukowe, z których 75 ukazało się po uzyskaniu stopnia doktora. Spośród nich 7 opublikowano w czasopismach notowanych w Journal Citation Report (wszystkie po doktoracie), m.in. w European Journal of Wood and Wood Products, Holzforschung, Wood Research, Wood and Fiber Science. Sumaryczny Impact Factor publikacji wynosi 4.601. Łączna liczba punktów MNiSW uzyskana za publikacje wynosi 436, w tym 420 po doktoracie. Według bazy Web of Science publikacje, w których byłem współautorem były cytowane 58 razy, natomiast indeks Hirscha jest równy 5. Zgodnie z bazą Scholar Google liczba cytowań wynosi 163, a indeks Hirscha 8. Byłem też recenzentem kilku publikacji z czasopism o zasięgu światowym, w tym z Bioresources, Composite Part A i Wood Material Science and Engineering.

Brałem udział w 3 projektach badawczych finansowanych przez KBN i MNiSW, w tym habilitacyjnym pt. „Modelowanie właściwości sprężystych płyt wiórowych i pilśniowych”, w którym byłem kierownikiem i jedynym wykonawcą. Ponadto byłem

kierownikiem zespołu badawczego realizującego badania w ramach finansowanego przez PARP programu „Duży bon badawczy”. Obecnie, jako kierownik zespołu badawczego, koordynuję badania przemysłowe dla Fabryki Konstrukcji Drewnianych w Paproci k/Nowego Tomyśla, realizowane w ramach współfinansowanego przez NCBR projektu badawczo-rozwojowego pt: „Innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne klejonych warstwowo belek drewnianych wzmacnianych włóknami”.

Wyniki prowadzonych badań przedstawiałem wielokrotnie na konferencjach w kraju i za granicą. Brałem udział m.in. w:

- Vth International Symposium „Composite wood materials” – Technical University, Faculty of Wood Technology, Zvolen, Slovakia (2002, 2004)
- 7th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition. June 18 - 19, 2008, Kassel, Germany
- XX Symposium Adhesives In Woodworking Industry. 29 czerwca - 01 lipca 2011 r. Zvolen, Słowacja (2009, 2011)
- 5th International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products, ECOWOOD 2012, 5-7 September 2012, Porto, Portugal.
- Międzynarodowa Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW, Drewno – materiał XXI wieku (2001-2011, 2013-2014)
- XIX Sesja Naukowa „Badania dla Meblarstwa” - Katedra Meblarstwa AR Poznań - czerwiec (2001-2005, 2009)
- Sesja Naukowa „Mechanika Stosowana 2010”, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy (2002, 2004, 2006, 2010 r.)
- Konferencja Naukowej „Problemy adaptacji leśnictwa i drzewnictwa do zmieniających się uwarunkowań klimatycznych i środowiskowych”. Poznań, 27 listopada 2008 r.
- Środkowo-Europejska Konferencja „Recykling i Odzysk Materiałów Polimerowych. Nauka – Przemysł”, Ustroń Jaszowiec, 17-19 października 2007
- XIV ICMR 2006 „Recykulacja w budowie maszyn. Czyste technologie”. Bydgoszcz 22 maja 2006.

Pełny wykaz referatów konferencyjnych w załączniku 3A.

Za swoją pracę naukową zostałem trzykrotnie uhonorowany indywidualną nagrodą Rektora (2 razy II stopnia i raz III stopnia) oraz dwukrotnie nagrodą zespołową II stopnia.

Zajęcia dydaktyczne prowadzę obecnie na dwóch kierunkach studiów: edukacji techniczno-informatycznej oraz inżynierii materiałowej. Oba kierunki są prowadzone przez Instytut Techniki UKW w Bydgoszczy. Moja działalność dydaktyczna koncentruje się na dwóch, często związanych ze sobą, obszarach nauki: technologii drewna i mechanice technicznej. Prowadząc zajęcia z przedmiotów: tworzywa drzewne, konstrukcje drewniane, mechanika techniczna oraz wytrzymałość materiałów bardzo często korzystam z wiedzy obu tych obszarów. Od kilkunastu lat prowadzę zajęcia seminaryjne ze studentami, a także jestem promotorem prac licencjackich, inżynierskich i magisterskich. Od 2001 roku wypromowałem 40 licencjatów, 28 inżynierów oraz 29 magistrów. W ramach zajęć dydaktycznych organizuję dla studentów wycieczki m.in. do Sklejki Multi S.A. oraz na doroczne targi Drema i Furnica.

Prowadzę także działalność popularyzującą naukę, uczestnicząc m.in. w organizowanych przez bydgoskie uczelnie wyższe Dniach Nauki. W ramach tej imprezy od kilku lat przygotowuję, skierowany do dzieci z klas wczesnoszkolnych, pokaz promujący drewno jako materiał konstrukcyjny i ekologiczny. W czasie pokazu dzieci mają możliwość poznania podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych drewna, a także wpływu różnych czynników na te właściwości. Za udział w Dniach Nauki otrzymałem od rektora UKW podziękowanie w formie listu pochwalnego. Ponadto, wielokrotnie zapraszałem do kierowanego przez siebie laboratorium dzieci ze szkoły podstawowej, które w ramach wycieczki dydaktycznej zwiedzały pracownie Instytutu Techniki.

Udzielam się też w pracach organizacyjnych Wydziału i Instytutu Techniki. Przez dwie kadencje byłem członkiem Rady Wydziału Matematyki, Fizyki i Techniki, reprezentując w tym gronie niesamodzielnymi pracownikami nauki. Ponadto, od początku powstania Katedry Konstrukcji Drewnianych jestem kierownikiem Laboratorium Badania Materiałów Drzewnych. Byłem też współtwórcą siatek studiów na specjalnościach *techniki komputerowe w edukacji*, *projektowanie konstrukcji drewnianych wspomagane komputerowo* oraz *inżynieria biokompozytów*. Poza tym od 2014 roku jestem członkiem zwyczajnym Stowarzyszenia Producentów Płyt Drewnopochodnych w Polsce oraz przedstawicielem Instytutu Techniki w Platformie Technologicznej Sektora Leśno-Drzewnego.

Maciek Koisiewicz