Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Wydział Leśny i Technologii Drewna

Katedra Mechanicznej Technologii Drewna

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michał Słonina

Właściwości meblowych płyt komórkowych w zmiennych warunkach wilgotności i temperatury powietrza

Properties of light furniture boards in changing conditions humidity and air temperature

w formie spójnego tematycznie cyklu artykułów opublikowanych

w czasopismach naukowych

Promotor: prof. dr hab. Dorota Dziurka

Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Borysiuk, prof. SGGW
dr hab. inż. Cezary Gozdecki, prof. UKW

Poznań 2023

Spis treści

1. Wykaz publikacji stanowiących podstawę postępowania w sprawie o nadanie stopnia naukowego doktora 3
2. Wstęp i geneza pracy 5
3. Cel pracy 7
4. Omówienie prac wchodzących w skład cyklu publikacji 7
   - 4.1. Modelowanie gęstości periodycznych struktur rdzeni płyt komórkowych. (Publikacja A1) 7
   - 4.2. Właściwości mechaniczne struktur rdzenia periodycznego wielowarstwowych płyt meblowych. (Publikacja A2) 8
   - 4.3. Właściwości warstwowej płyty komórkowej z tworzyw drzewnych o heksagonalnych komórkach rdzenia. (Publikacja A3) 10
   - 4.4. Sztywność oraz mechanizm zniszczenia złącza meblowego na bazie płyty komórkowej w zmiennych warunkach klimatycznych. (Publikacja A4) 11
   - 4.5. Właściwości fizyczne i mechaniczne komórek oraz rdzeni heksagonalnych wykonanych z impregnowanego papieru makulaturowego. (Publikacja A5) 12
   - 4.6. Badania eksperymentalne i analiza numeryczna właściwości sprężystych papierowych rdzeni komórkowych przed i po impregnacji. (Publikacja A6) 13
   - 4.7. Wpływ impregnacji skrobią papieru typu Testliner na sztywność płyt warstwowych ze smukłymi komórkami rdzenia. (Publikacja A7) 14
   - 4.8. Mapy uszkodzeń dla zginanych płyt drewnopochodnych o strukturze heksagonalnaj z rdzeniem impregnowanym skrobią. (Publikacja A8) 15
   - 4.9. Wpływ impregnacji modyfikowaną skrobią rdzenia papierowego na zginanie płyt drewnopochodnych o strukturze heksagonalnej w zmieniających się warunkach klimatycznych. (Publikacja A9) 16
   - 4.10 Sposób wytwarzania impregnowanych rdzeni meblowych płyt komórkowych. PL.240666. (Publikacja A10) 17
5. Podsumowanie 18
6. Wnioski 20
7. Literatura 22

1. Wykaz publikacji stanowiących podstawę postępowania w sprawie o nadanie stopnia naukowego doktora

Rozprawa doktorska składa się z cyklu dziewięciu powiązanych tematycznie publikacji oraz jednego przyznanego patentu, pod wspólnym tytułem „Właściwości meblowych płyt komórkowych w zmiennych warunkach wilgotności i temperatury powietrza”:

A.1 Peliński K., Wojnowska M., Maslej M., Słonina M., Smardzewski J. (2017). Modeling of density of periodic structures cores of honeycomb panels. Research for Furniture Industry. The XXVIIIth International Conference Poznań 21st-22nd of September 2017. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, ISBN 978-83-7160-890-2: 127-138.

A.2 Wojnowska M., Peliński K., Maslej M., Słonina M., Smardzewski J. (2017). Elastic properties of periodic core's structures of multilayers furniture panels. Journal of Advanced Technology Sciences ISSN:2147-345: 1249-1263.

A.3 Słonina M., Smardzewski J. (2018). Właściwości warstwowej płyty komórkowej z tworzyw drzewnych o heksagonalnych komórkach rdzenia. Dokonania Naukowe Doktorantów, Poznań 15.04.2018, Materiały konferencyjne pt. Dokonania Naukowe Doktorantów, Edycja VI - streszczenia wystąpień. Zagadnienia aktualne poruszane przez młodych naukowców, CREATIVETIME Kraków 2018, Kraków 2018, ISBN 978-83-63058-83-8, pp: 145-150.

A.4 Smardzewski J., Słonina M., Maslej M. (2017). Stiffness and failure behaviour of wood based honeycomb sandwich corner joints in different climates. Composite Structures 168: 153–163, (40 p.) http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.047

A.5 Słonina, M., Smardzewski, J. (2019). Physical and mechanical properties of cells and hexagonal cores made of impregnated recycled paper. In The XXIXTH International Conference Research for Furniture Industry (p. 505), ISBN 978-605-031-748-0

A.6 Słonina, M., Dziurka, D., Smardzewski, J. (2020). Experimental research and numerical analysis of the elastic properties of paper cell cores before and after impregnation. Materials 13, no. 9: 2058. https://doi.org/10.3390/ma13092058

A.7 Słonina, M., Smardzewski, J. (2022). Starch Impregnation Effect of Testliner Paper on the Stiffness of Honeycomb Panels with Slender Cells. Drvna Industrija 73, no.3: 327 https://doi.org/10.5552/drvind.2022.0024

A.8 Słonina, M., Dziurka, D., Smardzewski, J. (2022). Failure mechanism map for bending wood-based honeycomb sandwich beams with starch-impregnated core. Composite Structures, 116749, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116749

A.9 Słonina, M., Dziurka, D., Molińska-Glura, M., Smardzewski, J. (2022). Influence of impregnation with modified starch of a paper core on bending of wood-based honeycomb panels in changing climatic conditions. Materials 15, no. 1: 395. https://doi.org/10.3390/ma15010395

A.10 Słonina M., Lewandowicz G., Smardzewski J. (2022). Sposób wytwarzania impregnowanych rdzeni meblowych płyt komórkowych. Patent PL.240666, 2022-05-16, WUP 20/2022

Badania zostały wykonane w ramach projektu UMO-2016/21/B/ST8/01016 *Modeling of the properties of new lightweight wood-based honeycomb panels with auxetic cores* finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki

2. Wstęp i geneza pracy

Współczesne społeczeństwo stanęło w punkcie zwrotnym trwającego od lat konsumpcjonizmu. Zmiany klimatyczne stały się faktem, a bez świadomych wyborów w obrębie wykorzystania zasobów Ziemi, kryzys będzie się pogłębiał. Naukowcy na całym Świecie poszukują rozwiązań wspierających zrównoważony rozwój. Dotyczy to zarówno przetwarzania czy ponownego wykorzystania surowców, jak i nowych materiałów, opartych na zasobach odnawialnych.

Nowoczesna inżynieria wykorzystuje szeroki wybór materiałów konstrukcyjnych, w tym kompozytów, które charakteryzują się satysfakcjonującymi właściwościami mechanicznymi w stosunku do masy własnej, co czyni je atrakcyjnymi w dziedzinach, w których stosunek gęstości do wytrzymałości odgrywa ważną rolę. W szczególności mowa tu o szeroko pojętym transporcie powietrznym, lądowym i morskim [1–5], ale również w obszarach bardziej przyziemnych jak sport, turystyka czy protetyka [6–8].

W kompozycie każda z warstw ma określoną funkcję do spełnienia, ograniczając tym samym do niezbędnego minimum zużycie cennych surowców Ziemi [9]. Powszechnie na okładziny stosuje się niemal każdy rodzaj cienkich płyt kompozytowych, metale oraz tworzywa sztuczne [10–14]. Jako rdzeń natomiast polimery, spienione metale czy drewno balsy [15–20].

Wiele prac poświęcono rdzeniom o ażurowej periodycznej strukturze, również tych o charakterze auksetycznym [21–26]. Jedną z pierwszych publikacji traktujących kompleksowo o podstawowych aspektach teorii konstrukcji warstwowych paneli z plastrem miodu, była książka Allen z 1969 roku [27]. Tematykę tę rozwijał dalej Reichard [28], Gibson i Ashby [29] oraz Bitzer [30]. Wielokrotnie podejmowano próby optymalizacji geometrycznej tych struktur, również numerycznie [31–39]. W wielu spośród tych opracowań wymiary zewnętrzne komórek zapisywano równaniami, pomijającymi grubość ściany komórki, traktując ją jako integralną, ale nie autonomiczną, składową długości ściany. Takie podejście istotnie ogranicza jednoznaczną analizę wpływu grubości ściany na gęstość względną komórki.

Wielowarstwowe struktury o ażurowym rdzeniu doskonale sprawdzają się jako absorbery energii kinetycznej [40–47]. Publikacje dotyczące płyt warstwowych z rdzeniem pod postacią papierowego plastra miodu najczęściej opisują rdzeń wykonany z papieru typu Kraft [42,48–53]. Stosowano również modyfikowany papier Nomex czy włókna aramidowe Kevlar [30,54–58]. Właściwości tych kompozytów z zastosowaniem różnych materiałów okładzin zostały szeroko zbadane [23,59–62].

Warto zaznaczyć, iż konstrukcje warstwowe przyczyniają się do racjonalnego wykorzystania surowców naturalnych, przy zachowaniu dużego współczynnika jakościowego w relacji wytrzymałość oraz sztywność do gęstości [22,63,64]. Rzadko jednak kompozycja materiałów składowych dobierana jest pod względem przyszłego przetwórstwa i recyklingu. Przegląd publikacji dokonany przez Rani et al. 2021 [65] przekonuje, że recykling kompozytów na bazie włókien węglowych czy szklanych jest co najmniej na mało zadowalającym poziomie, pomimo iż na masową skalę są obecne w przemyśle od co najmniej lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Środowiskowe dyrektywy Unijne nie pozostawiają wątpliwości co do konieczności zmiany trendu w tym zakresie [66–68]. Wymaganym jest, aby już na etapie projektowym uwzględnić możliwość dalszego przerobu i odzysku surowców pod względem ponownego ich wykorzystania [69]. Stąd rosnące zainteresowanie bio-tworzywami na bazie włókien naturalnych. Dzięki możliwości dalszego wielokrotnego wykorzystania, a ostatecznie spalenia i odzysk energii na potrzeby zasilenia procesu produkcyjnego, tworzywa drzewne są stawiane na piedestale materiałów ekologicznych. Potwierdzają to również analizy życia produktu LCA (Life Cycle

Assessment) [70–73]. Z tych powodów dalszy rozwój w zakresie tworzyw drzewnych jest niezbędny. W szczególności dotyczy to kompozytów warstwowych z heksagonalnym papierowym rdzeniem. Dają one niezrównane możliwości optymalizacji materiałowej, jak również dalszego przetworzenia, z racji wykorzystania jednego surowca bazowego jakim jest włókno drzewne. Pomimo iż lekka warstwowa płyta meblowa jest również obiektem zainteresowania branży meblarskiej, brakuje doniesień naukowych w tym zakresie [37,50,74–79], a w szczególności tych dotyczących zastosowania papieru typu Testliner czyli makulaturowego, jako rdzenia tych płyt [74,80,81]. Odwiecznym problemem przy wytwarzaniu komórkowych tworzyw drzewnych jest ich niska odporność na zmienne warunki atmosferyczne, a szczególnie dużą wilgotność powietrza. Podejmowano już próby przezwyciężenie tej niedogodności, jednak są one niewystarczające. Często prowadziły też do nasączenia rdzenia substancjami chemicznymi, które ograniczały lub wykluczały taki kompozyt warstwowy z możliwości dalszego przerobu i ponownego wykorzystania [53,82–84].

Lekka warstwowa płyta meblowa z papierowym rdzeniem nie dorównuje sztywnością odpowiednikom, o grubości mniejszej niż 25 mm, wykonanym z płyty wiórowej czy pilśniowej MDF [36,74,85–87]. Pomimo to jest powszechnie stosowana w meblarstwie, a oczekiwaną sztywność uzyskuje się stosując dodatkowe ramiaki z tworzyw drzewnych. Polska, jako lider europejski i światowy w produkcji oraz eksporcie mebli [88,89], nie może pozwolić sobie na ignorowanie problemu zachowania sztywności konstrukcji w klimacie tropikalnym, gdzie średnia wilgotność względna powietrza oscyluje w okolicach 85%, a temperatura 28°C [53,78,90–95]. Koniecznym jest zatem poszerzanie wiedzy w tym zakresie. Szczególnie interesujący jest wpływ zmiany geometrii komórek rdzenia na sztywność i wytrzymałość takich płyt. Nie można przy tym pomijać wpływu warunków klimatycznych. Znajduje to potwierdzenie w zmieniającej się strukturze demograficznej Świata. Przed 2050 rokiem bowiem połowa ludzkości będzie zamieszkiwać strefę klimatu tropikalnego [96]. Niezbędnym jest zatem poszukiwanie środków i sposobów zabezpieczenia lekkich warstwowych płyt meblowych, przed niekorzystnym wpływem warunków klimatycznych na ich sztywność i wytrzymałość.

Mając powyższe na uwadze, sformułowano następujące hipotezy badawcze:

1. dla stałej gęstości względnej heksagonalnych komórek papierowego rdzenia, długość i kąt pochylenia ścian komórek mają znaczący wpływ na ich właściwości mechaniczne oraz sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych,
2. nasycanie ścian papierowego rdzenia płyt komórkowych wybranymi środkami impregnacyjnymi (skrobia modyfikowana, krzemian sodu, żywica epoksydowa LiquidWood®) ma znaczący wpływ na ich właściwości mechaniczne oraz sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych,
3. rodzaj okładzin, geometria komórek rdzenia i sposób ich impregnacji mają znaczący wpływ na właściwości mechaniczne warstwowych płyt meblowych w zmiennych warunkach wilgotności względnej i temperatury powietrza.

3. Cel pracy

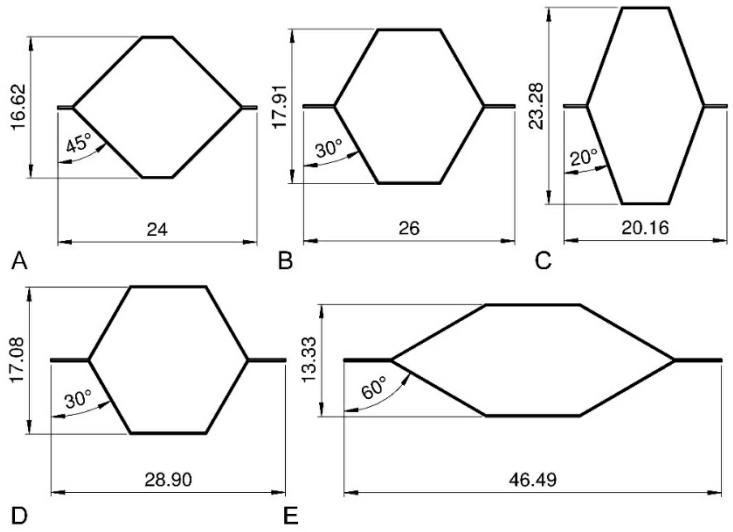
Zasadniczym celem badań było określenie jak nasycenie papieru wybranymi środkami impregnacyjnymi (skrobia modyfikowana, krzemian sodu, żywica epoksydowa LiquidWood®) oraz kształt i wymiary otrzymanych z tego papieru heksagonalnych komórek rdzeni, wpłynie na sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych, w zmiennych warunkach wilgotności względnej i temperatury powietrza.

Ponadto celem pracy było ustalenie, czy zmiana właściwości mechanicznych okładzin ma istotny wpływ na właściwości płyt komórkowych w zmiennych warunkach wilgotności względnej i temperatury powietrza. Natomiast celem utylitarnym pracy było wykazanie możliwości zwiększenia sztywności meblowych płyt komórkowych możliwych do zastosowania w krajach strefy tropikalnej.

4. Omówienie prac wchodzących w skład cyklu publikacji

4.1. Modelowanie gęstości periodycznych struktur rdzeni płyt komórkowych. (Publikacja A1)

Celem badania było zaprojektowanie optymalnych kształtów komórek heksagonalnych charakteryzujących się najniższą gęstością względną. W szczególności postanowiono zaprojektować różne geometrie komórek do zastosowania w lekkich warstwowych płytach meblowych. Opracowano modele matematyczne, opisujące zależność między gęstością względną komórki heksagonalnej a długością i grubością ściany komórki oraz jej kątem pochylenia. Wykazano, że komórki heksagonalne mogą być silnie ortotropowe, dzięki czemu będą bardzo przydatne do projektowania statycznie obciążonych półek i przegród. W szczególności podczas produkcji mebli na indywidualne zamówienie. Komórki o izotropowych właściwościach znajdą zastosowanie w produkcji masowej mebli, zwłaszcza z uwagi na optymalizację procesu cięcia dużych płyt meblowych.



Ryc. 1. Komórki rdzeni: A - komórka referencyjna o gęstości względnej ρ' =0.0249, B-E wytypowane komórki heksagonalne (wymiary podano w [mm]).

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Gęstość względna komórki rdzenia jest ściśle związana z geometrią komórki, a w szczególności z grubością jej ściany t.
- Możliwe jest zachowanie stałej gęstości względnej komórki rdzenia o różnych wymiarach liniowych.
- Właściwości mechaniczne komórki można swobodnie regulować w zależności od potrzeb, zmieniając jej geometrię.

Zebrane wnioski potwierdzają pierwszą hipotezę badawczą, w zakresie dotyczącym możliwości zachowania stałej gęstości względnej heksagonalnych komórek papierowego rdzenia, przy jednoczesnej zmianie długości i kąta pochylenia ścian komórek, co ma bezpośrednie przełożenie na zmianę ich właściwości mechanicznych. W dalszej części pracy wytypowane komórki zostały wykorzystane do przeprowadzenia badań w kierunku optymalizacji ich parametrów mechanicznych, metodami numerycznymi.

4.2. Właściwości mechaniczne struktur rdzenia periodycznego wielowarstwowych płyt meblowych. (Publikacja A2)

Celem podjętych badań było opracowanie modeli matematycznych, opisujących gęstość względną komórki heksagonalnej w funkcji jej właściwości sprężystych. Wykorzystano metodę numerycznej optymalizacji statycznej Monte-Carlo. W tym przypadku za naturalne kryterium optymalizacji uznano minimalizację gęstości względnej komórek rdzenia oraz maksymalizację ich modułów sprężystości liniowej E_x, E_y. Znając zależności wynikające z poprzedniej pracy, możliwe było wyselekcjonowanie komórek o różnej geometrii i podobnej lub identycznej gęstości względnej ρ' =0.0249 (Tabela 1).

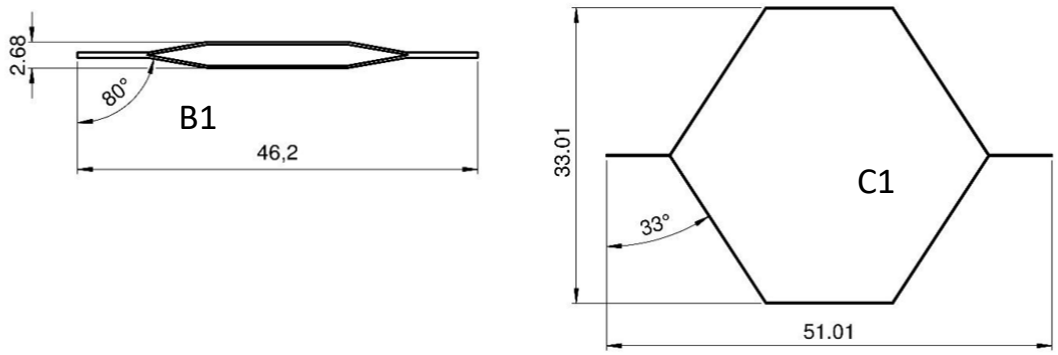
Tabela 1. Właściwości fizyko-mechaniczne determinujące każdą z wybranych komórek rdzenia.

Typ komórki	E_s	t	h	l	φ	L_x	S_y	ρ'	E_x	E_y	ϑ_{xy}	ϑ_{yx}	G_{xy}
	MPa	mm			°	mm		-	MPa		-		MPa
A	6000	0.15	3.9	11.5	45	23.99	16.62	0.02493	0.0389	0.0178	0.1017	1.48	0.68
B	6000	0.15	8.0	10.2	30	25.99	17.91	0.02493	0.0381	0.0518	0.0179	0.86	1.17
C	6000	0.15	6.0	12.2	20	20.15	23.28	0.02493	0.0111	0.1068	0.0206	0.32	3.10
D	6000	0.15	9.7	9.7	30	28.89	17.08	0.02492	0.0513	0.0514	0.0129	1.00	1.00
E	6000	0.15	12.0	13.0	60	46.48	13.33	0.02493	0.1308	0.0034	0.0136	6.19	0.16

Zastosowanie metody Monte-Carlo, polegającej na losowym przeszukiwaniu obszaru dopuszczalnego i na podstawie otrzymanych wyników oszacowanie wartości optymalnej, pozwoliło na zdefiniowanie kolejnych dwóch, unikalnych pod względem fizyko-mechanicznym komórek (ryc. 2, tabela 2). Komórka *B1* to teoretycznie najkorzystniejsza struktura heksagonalna, o największej wartości modułów sprężystości liniowej, przy zachowaniu jak najniższej gęstości. Komórka *C1* stanowi natomiast strukturę o minimalnej gęstości względnej 0.00875 możliwej do uzyskania, bez maksymalizacji wartości modułów sprężystości liniowej.

Tabela 2. Właściwości fizyko-mechaniczne komórek wybranych metodą numerycznej optymalizacji statycznej Monte-Carlo.

Typ komórki	E_s	t	h	l	φ	L_x	S_y	ρ'	E_x	E_y	ϑ_{xy}	ϑ_{yx}	G_{xy}
	MPa	mm			°	mm		-	MPa		-		MPa
B1	6000	0.30	16.2	6.04	80	44.15	2.68	0.22260	503.78	0.0348	120.19	0.008	0.33
C1	6000	0.10	14.9	19.6	33	51.01	33.01	0.00875	0.0017	0.0017	1.0133	0.99	0.00



Ryc. 2. Graficzna prezentacja komórek po optymalizacji numerycznej Monte-Carlo.

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Względną gęstość komórkowego rdzenia określają: grubość ściany komórkowej t, kąt nachylenia ścianek φ, długość ścianki l i wysokość rdzenia h.
- Nie jest możliwe uzyskanie wysokich modułów sprężystości liniowej komórek, przy jednoczesnej najniższej możliwej gęstości względnej, ponieważ kluczową wartością jest grubość papieru t.
- Zastosowana w badaniach metoda statycznej optymalizacji numerycznej Monte-Carlo pozwoliła na uzyskanie optymalnych właściwości komórek rdzenia, sterując jednocześnie kilkoma przeciwstawnymi parametrami zmiennych decyzyjnych.

Powyższe wnioski uzupełniają wiedzę z zakresu pierwszej hipotezy badawczej, dotyczącej możliwości zachowania stałej gęstości względnej heksagonalnych komórek papierowego rdzenia, przy jednoczesnym sterowaniu stałymi sprężystymi. Komórki wybrane w opisany powyżej sposób, umożliwiły stworzenie periodycznych heksagonalnych rdzeni i rozpoczęcie etapu ich analizy metodą elementów skończonych (MES) z uwzględnieniem okładzin, w celu poszukiwania najkorzystniejszej struktury.

4.3. Właściwości warstwowej płyty komórkowej z tworzyw drzewnych o heksagonalnych komórkach rdzenia. (Publikacja A3)

Celem badania było określenie właściwości mechanicznych warstwowej płyty komórkowej z tworzyw drzewnych o zmiennej geometrii heksagonalnych komórek rdzenia i stałej gęstości względnej. W ramach tej pracy wykorzystano trzy różne rodzaje okładzin z tworzyw drzewnych, które zespolono z wcześniej opracowanymi rdzeniami (publikacje A1-A2), tworząc tym samym lekkie trójwarstwowe struktury, możliwe do wykorzystania przy numerycznej symulacji trzypunktowego zginania w środowisku programu Abaqus v.6.13. Analiza naprężeń stycznych i normalnych w przekroju środkowym struktur pozwoliła na ustalenie zależności między geometrią pojedynczej komórki rdzenia a właściwościami mechanicznymi płyty komórkowej. Na tej podstawie zaproponowano najkorzystniejszy wariant układu rdzeń - okładzina.

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Spośród rdzeni optymalnych, rdzeń na bazie komórki *F* w kierunku *X* wykonany z najgrubszego papieru (t=0.25 mm) powodował najmniejsze ugięcia płyt komórkowych. Dla okładzin PW (3 mm), HDF (2 mm) i HPL (1 mm), ugięcie belki było równe odpowiednio U_z=- 1,765; -1,967; -2,765 mm.
- Wraz ze spadkiem grubości okładziny wzrasta ugięcie belki U_z. Wzrost ugięcia belki z okładziną PW wynosi średnio ponad 40% w porównaniu do belki z HDF. Natomiast wzrost ugięcia belki z okładziną HDF jest równy około 65% w stosunku do okładzin z HPL.
- Dla próbki referencyjnej (HAXBP), belki z okładziną HPL charakteryzują się największymi naprężeniami normalnymi. Wynika to z ich najmniejszej grubości równej 19 mm. Porównując je z naprężeniami w belkach o całkowitej grubości 23 mm, z okładzinami z płyty wiórowej, są one mniejsze aż o 250%.
- Wykazano, iż naprężenia styczne, niezależnie od geometrii rdzenia, rosną wraz ze spadkiem grubości okładzin. Porównując naprężenia styczne w belkach z okładzinami z płyty wiórowej PW oraz HDF, wykazano wzrost tych naprężeń o 18% w belkach z okładzinami HDF oraz o 25% w belkach z okładzinami z HPL w stosunku do HDF.
- Zestawiając ze sobą te same rdzenie z różnymi okładzinami wykazano, że maksymalny przyrost naprężeń był równy około 350%.

Wyniki badań zebrane w publikacjach A1-A3 ostatecznie potwierdzają pierwszą hipotezę badawczą, że dla stałej gęstości względnej heksagonalnych komórek papierowego rdzenia długość i kąt pochylenia ścian komórek mają znaczący wpływ na ich właściwości mechaniczne oraz sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych. Biorąc pod uwagę konieczność wykonania lekkich meblowych płyt warstwowych, najlepszą kombinacją materiałów wynikającą z przeprowadzonej analizy numerycznej jest struktura złożona z okładziny PW oraz HDF, dla rdzeni na bazie komórki *D* oraz *E*.

4.4. Sztywność oraz mechanizm zniszczenia złącza meblowego na bazie płyty komórkowej w zmiennych warunkach klimatycznych. (Publikacja A4)

W pracy określono wpływ zmian warunków klimatycznych otoczenia na sztywność i wytrzymałość złączy kątowych, wykonanych z płyt o strukturze plastra miodu. Opracowano również nową metodę numerycznego modelowania sztywności i wytrzymałości złączy poddawanych zmianom wilgotności względnej i temperatury powietrza. Wykazano, że zmienne warunki klimatyczne wywierają niekorzystny wpływ na higroskopijne kompozyty drewnopochodne, z których produkowane są płyty warstwowe o strukturze plastra miodu. Procesy sorpcji i desorpcji wody przez kompozyty drewnopochodne wywołują utratę ich sztywności i wytrzymałości połączeń mebli skrzyniowych.

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Wzrost wilgotności względnej i temperatury powietrza pogarsza sztywność połączeń nawet o 25 %, zaś ich wytrzymałość nawet o 40%.
- Z tego powodu meble wytwarzane i pakowane w klimacie suchym, a użytkowane w klimacie tropikalnym charakteryzować się będą znacząco obniżoną jakością, niższą sztywnością i wytrzymałością.
- Wysuszenie połączeń (mebli) w warunkach klimatycznych zbliżonych do początkowych istotnie poprawi ich sztywność i wytrzymałość. Właściwości te będą jednak niższe w odniesieniu do wyrobów referencyjnych.
- Wyroby z kompozytów drzewnych transportowane przez strefę tropikalną do krajów o klimacie suchym, powinny być szczególnie zabezpieczone przed wilgocią.
- W ujęciu ilościowym wytrzymałość połączeń zwieranych jest od około 2.5 do 3 razy mniejsza od wytrzymałości połączeń rozwieranych.
- Opracowana metodyka numerycznego modelowania sztywności i wytrzymałości połączeń jest poprawna. Może być ona wykorzystywana do wirtualnego symulowania jakości wyrobów wykonanych z warstwowych tworzyw drzewnych, poddanych zmiennym parametrom temperatury i wilgotności względnej powietrza.

Powyższe wnioski i spostrzeżenia dowodzą, iż zasadnym jest poszukiwanie sposobów zabezpieczania lekkich meblowych płyt warstwowych z heksagonalnym papierowym rdzeniem, przed wpływem zewnętrznych warunków klimatycznych. W szczególności w przypadku wysokiej wilgotności względnej i temperatury powietrza, która istotnie oddziałuje na właściwości mechaniczne takich płyt. Rozpoczęto tym samym prace nad drugą hipotezą badawczą. Wykonano pierwsze rdzenie z wykorzystaniem impregnowanego papieru. Jego właściwości mechaniczne określono w próbie ściskania, wykorzystując dodatkowo cyfrową analizę obrazu (DIC), co opisano w kolejnej publikacji.

4.5. Właściwości fizyczne i mechaniczne komórek oraz rdzeni heksagonalnych wykonanych z impregnowanego papieru makulaturowego. (Publikacja A5)

W celu poprawy właściwości mechanicznych papieru prowadzono w przeszłości badania, impregnując go elastomerami w fazie ciekłej, powszechnie dostępnymi środkami do zabezpieczania drewna na bazie silanów, żywicami syntetycznymi (fenolowymi, mocznikowymi, epoksydowymi), polioctanem winylu, lakierami nitrocelulozowymi, roztworami polistyrenu z octanem etylu, olejem lnianym, octanem glinu. Celem tej pracy było określenie, w jakim stopniu impregnacja papieru skrobią modyfikowaną wpływa na właściwości mechaniczne rdzenia płyty komórkowej. Badania eksperymentalne obejmowały określenie właściwości sprężystych papieru i rdzeni przed i po impregnacji skrobią modyfikowaną. Zastosowano metodę cyfrowej analizy obrazu (DIC). Wykazano, że geometria pojedynczych komórek ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne sześciokątnego rdzenia papierowego. Skrobia modyfikowana jako neutralna dla środowiska substancja organiczna, jest obiecującym środkiem do impregnacji papieru i wskazane są dalsze badania.

Na podstawie wykonanych badań i dyskusji przeprowadzonej nad otrzymanymi wynikami sformułowano kilka wniosków:

- Geometria pojedynczej komórki ma znaczący wpływ na własności mechaniczne heksagonalnego papierowego rdzenia. Szczególnie istotnym okazała się być grubość zastosowanego papieru.
- Wybrany środek impregnujący korzystnie wpływa na poprawę stałych sprężystych badanych rdzeni.
- Skrobia modyfikowana jako obojętna dla środowiska naturalnego substancja organiczna, jest dobrze rokującym do dalszych badań środkiem impregnującym. Ponadto charakteryzuje się doskonałym stosunkiem jakości do ceny oraz łatwym procesem impregnacji.

Przedstawione powyżej wnioski pozwalają na częściową weryfikację drugiej hipotezy badawczej, w zakresie dotyczącym istnienia zależności pomiędzy impregnacją papierowego rdzenia a jego właściwościami mechanicznymi. Wzrost właściwości mechanicznych rdzenia był na tyle obiecujący, iż postanowiono rozszerzyć zakres badań. Wykorzystując przedstawioną powyżej metodologię w dalszej części prac eksperymentalnych użyto trzech środków impregnujących oraz rdzeni o różnej geometrii. Otrzymane wyniki opublikowano w kolejnym z cyklu artykule naukowym.

4.6. Badania eksperymentalne i analiza numeryczna właściwości sprężystych papierowych rdzeni komórkowych przed i po impregnacji. (Publikacja A6)

Sformułowano hipotezę badawczą, że impregnacja ścian papierowego rdzenia płyt komórkowych skrobią modyfikowaną, krzemianem sodu oraz żywicą epoksydową LiquidWood® ma znaczący wpływ na właściwości mechaniczne rdzenia. Do badań zastosowano papier makulaturowy w trzech grubościach, siedem kształtów komórek, w tym dwa po optymalizacji numerycznej Monte-Carlo oraz trzy rodzaje środków impregnujących. Metodą cyfrowej analizy obrazu (DIC) oznaczono właściwości mechaniczne wytworzonych papierowych rdzeni, które poddano osiowemu ściskaniu w dwóch kierunkach. Wykazano, że każdy z zastosowanych roztworów impregnujących poprawia sztywność papierowego rdzenia. Najlepsze wyniki otrzymano dla żywicy epoksydowej LiquidWood® oraz modyfikowanej skrobi. Istotnym parametrem geometrii komórek wpływającym na ich sztywność jest kąt pochylenia ściany komórki φ, a także ułożenie wspólnej ściany komórkowej względem kierunku obciążenia. Pozytywnie również zweryfikowano opracowane modele numeryczne.

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Impregnacja ścian papierowego rdzenia płyt komórkowych wybranymi środkami (żywica epoksydowa, skrobia modyfikowana, krzemian sodu) ma znaczący wpływ na właściwości mechaniczne rdzenia.
- Modyfikowana skrobia stanowi doskonały preparat do impregnacji rdzeni meblowych płyt komórkowych, ze względu na powszechną dostępność, nietoksyczność, niską cenę oraz możliwość dalszego przerobu.
- Najkorzystniejsze izotropowe właściwości mechaniczne wykazuje komórka typu *C*, zaś najkorzystniejsze właściwości ortotropowe komórka typu *F*.
- Imperfekcje geometryczne są kluczowym czynnikiem, który wpłynął na wyniki obliczeń analitycznych, wykazując znaczące różnice w zestawieniu z badaniami eksperymentalnymi.
- Pozytywnie zweryfikowano opracowane modele numeryczne. Zatem możliwym jest analizowanie numerycznie właściwości nowych konstrukcji rdzeni i płyt komórkowych.
- Optymalizacja kształtu komórki metodą Monte-Carlo przyniosła zamierzony skutek. Moduł sprężystości liniowej rdzenia typu *F* jest znacząco większy od jakiejkolwiek innej badanej struktury, także po impregnacji.

W ramach szeroko zakrojonych badań opisanych w publikacjach A4-A6 niezaprzeczalnie potwierdzono, iż impregnacja papierowego rdzenia wybranymi środkami (skrobia modyfikowana, krzemian sodu, żywica epoksydowa LiquidWood®) ma wpływ na jego właściwości mechaniczne, prowadząc do wzrostu sztywności rdzenia oraz wytrzymałości na zrywanie makulaturowego papieru typu Testliner, z którego został on wykonany. Tym samym częściowo potwierdzono drugą hipotezę badawczą. Mając powyższe na uwadze w dalszym etapie prac eksperymentalnych stworzono belki, składające się z jednego rodzaju okładziny P_{30} ze smukłymi komórkami rdzenia typu *E*. Następnie poddano je trzypunkowemu zginaniu, aby poznać ich właściwości mechaniczne. Postanowiono również zweryfikować możliwość oszacowania wartości stałych sprężystych takich belek, wykorzystując znane metody analityczne.

4.7. Wpływ impregnacji skrobią papieru typu Testliner na sztywność płyt warstwowych ze smukłymi komórkami rdzenia. (Publikacja A7)

Celem badań było określenie wpływu impregnacji skrobią modyfikowaną papieru makulaturowego (Testliner) na właściwości mechaniczne rdzeni o smukłych komórkach. Jak również jej oddziaływania na moduł sprężystości liniowej oraz wytrzymałości lekkich płyt warstwowych z okładzinami z cienkiej płyty wiórowej. Eksperyment przeprowadzono na belkach poddanych trzypunktowemu zginaniu. Wykazano, że smukłe komórki sześciokątne istotnie różnicują właściwości mechaniczne zarówno swoje, jak i paneli o strukturze plastra miodu w głównych kierunkach ortotropii. Impregnacja papieru Testliner skrobią modyfikowaną zmniejszyła wartości modułu sprężystości komórek o około 8.8%, a belek na ich bazie o co najmniej 6.9%. Ponadto wykazano, że równania analityczne, które nie uwzględniają strukturalnej postaci rdzenia, nie mogą być wykorzystywane do obliczenia modułu sprężystości płyt warstwowych z sześciokątnymi komórkami rdzenia.

Analiza otrzymanych wyników badań eksperymentalnych obliczeń analitycznych pozwala na sformułowanie kilku istotnych wniosków:

- Smukłe komórki o kształcie heksagonalnym znacząco różnicują ich właściwości mechaniczne w głównych kierunkach ortotropii. W kierunku osi (X) moduły sprężystości są około 3.7 razy większe niż w kierunku osi (Y).
- Impregnacja papieru Testliner skrobią modyfikowaną zmniejsza wartości modułów sprężystości liniowej komórek o około 8.8%.
- Smukłe komórki rdzenia różnicują właściwości mechaniczne płyt komórkowych w głównych kierunkach ortotropii. W kierunku osi (X) moduły sprężystości są około 355% większe niż w kierunku osi (Y).
- Impregnacja papieru Testliner skrobią modyfikowaną zmniejsza wartości modułów sprężystości liniowej płyt komórkowych, co najmniej o 6.9%.
- Rozwiązania analityczne, nieobejmujące strukturalnej formy rdzenia, nie mogą być stosowane do obliczeń modułów sprężystości płyt warstwowych z heksagonalnymi komórkami rdzenia.

Sztywność i wytrzymałość belek z okładzinami z cienkiej płyty wiórowej P_{30} z papierowym rdzeniem impregnowanym skrobią modyfikowaną jest znacząco inna od tych nieimpregnowanych, nieoczekiwanie prowadząc do ich obniżenia. Weryfikuje to drugą hipotezę badawczą, w zakresie istotności wypływu impregnacji na sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych. W kolejnym artykule z cyklu publikacji zbadano wpływ impregnacji rdzenia skrobią modyfikowaną na rodzaj oraz sposób uszkodzenia belek podczas trzypunktowego zginania. Poszerzając tym samym badania nad drugą hipotezą badawczą o dodatkowe okładziny wykonane z płyty pilśniowej typu HDF o różnych grubościach (H_{25}, H_{20}). Wygenerowane mapy zniszczeń mogą posłużyć do projektowania drewnopochodnych płyt warstwowych z heksagonalnym rdzeniem.

4.8. Mapy uszkodzeń dla zginanych płyt drewnopochodnych o strukturze heksagonalnej z rdzeniem impregnowanym skrobią. (Publikacja A8)

Celem badań było opracowanie map uszkodzeń dla cienkościennych paneli warstwowych, składających się z drewnopochodnych okładzin rozdzielonych plastrem miodu, wykonanym z papieru impregnowanego modyfikowaną skrobią. W tym celu poddano trzypunktowemu zginaniu belki z trzema różnymi okładzinami i dwoma rodzajami rdzenia w dwóch kierunkach ortotropii. Ustalono, że grubość okładzin decyduje o wytrzymałości i sztywności belek z płyt komórkowych, impregnacja rdzenia skrobią modyfikowaną powoduje nieznaczne pogorszenie wytrzymałości i sztywności belek oraz, że dominującym rodzajem zniszczenia belek jest uszkodzenie cienkościennego rdzenia przez ścinanie. Nie zaobserwowano przypadków uszkodzenia belek w wyniku zniszczenia okładzin (face yielding – pęknięcie okładziny oraz face indentantion – wgniecenie okładziny). Dotychczas nie napotkano na wyniki badań opisujących uszkodzenia drewnopochodnych płyt komórkowych, których smukłe komórki rdzenia wykonano z papieru impregnowanego skrobią modyfikowaną. Rozwiązania takie mogą być bardzo przydatne w gospodarce cyrkularnej, a zwłaszcza w branży motoryzacyjnej oraz meblarstwie.

Przeprowadzony eksperyment wraz z analizą zebranych danych pozwolił na sformułowanie poniższych wniosków. Dotyczą one wpływu impregnacji rdzenia modyfikowaną skrobią na rodzaj oraz sposób uszkodzenia belek podczas trzypunktowego zginania:

- Grubość okładzin decyduje o wytrzymałości i sztywności belek z płyt komórkowych.
- Impregnacja rdzenia skrobią modyfikowaną, powoduje nieznaczne pogorszenie wytrzymałości i sztywności belek.
- Dominującym rodzajem zniszczenia belek jest uszkodzenie cienkościennego rdzenia przez ścinanie.
- Nie zaobserwowano przypadków uszkodzenia belek w wyniku face yielding – uszkodzenie okładziny oraz face indentantion – wgniecenie okładziny.
- Mapy zniszczenia mogą służyć do projektowania drewnopochodnych paneli z rdzeniami papierowymi przed i po ich impregnacji modyfikowaną skrobią.

Powyższe badania kończą cykl publikacji (A4-A8), weryfikujących drugą hipotezę badawczą. Potwierdzono, iż nasycanie ścian papierowego rdzenia płyt komórkowych wybranymi środkami impregnacyjnymi (skrobia modyfikowana, krzemian sodu, żywica epoksydowa LiquidWood®) ma znaczący wpływ na ich właściwości mechaniczne oraz sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych. Wykorzystując zdobytą wiedzę, w dalszej części prac eksperymentalnych wykonano płyty meblowe z impregnowanym skrobią modyfikowaną rdzeniem o geometrii komórki *C*, *E*, *F*, zachowując przy tym trzy warianty okładzin (P_{30}, H_{25}, H_{20}). Próbę trzypunktowego zginania przeprowadzono zarówno w klimacie hali produkcyjnej, jak i w warunkach wysokiej wilgotności względnej i temperatury powietrza. Otrzymane wyniki opublikowano w ostatnim z cyklu artykule naukowym.

4.9. Wpływ impregnacji modyfikowaną skrobią rdzenia papierowego na zginanie płyt drewnopochodnych o strukturze heksagonalnej w zmieniających się warunkach klimatycznych. (Publikacja A9)

Jednym z celów pracy było określenie wpływu jaki wywiera impregnacja papierowego rdzenia skrobią modyfikowaną na właściwości mechaniczne oraz zaabsorbowaną energię, w próbie trzypunktowego zginania drewnopochodnych płyt komórkowych, w zmiennych warunkach temperatury i względnej wilgotności powietrza. W dwóch klimatach przebadano blisko sześćset belek w różnych kombinacjach: trzech typach okładzin, trzech geometriach rdzenia i dwóch grubościach papieru, z rdzeniem impregnowanym i nieimpregnowanym. Wyniki eksperymentu oraz ich analiza statystyczna dowodzą istotnego powiązania między impregnacją papieru modyfikowaną skrobią a właściwościami mechanicznymi. Najskuteczniejsza w pochłanianiu energii płyta komórkowa składała się z rdzenia o grubości ściany 0.25mm i okładzin z płyty wiórowej. Przeprowadzony eksperyment oraz dokonana analiza wyników pozwoliły ustalić, jak wymienione czynniki zmienne oddziałują na wytrzymałość trójwarstwowych płyt komórkowych (*MOR*), moduł sprężystości liniowej (*MOE*) oraz zdolność do pochłaniania energii (E_a).

Istnieje statystycznie udowodniony istotny związek między impregnacją papieru modyfikowaną skrobią a właściwościami mechanicznymi wytworzonych płyt komórkowych o zmiennej geometrii komórek i różnych rodzajach okładzin, w zmiennych warunkach temperatury i wilgotności względnej powietrza.

- W warunkach suchych (*T*=25ºC / *H*=45%) impregnacja zwiększa wytrzymałość płyt komórkowych na zginanie (*MOR*) średnio o 18%, a moduł sprężystości liniowej (*MOE*) o 7%. Średnia zdolność do pochłaniania energii po impregnacji skrobią wzrosła o 6%.
- W warunkach tropikalnych (*T*=28ºC / *H*=85%) impregnacja zwiększa wytrzymałość na zginanie płyt komórkowych średnio o 22%, a moduł sprężystości liniowej o 14%. Średnia zdolność do pochłaniania energii po impregnacji skrobią wzrosła o 6%.
- Najwięcej energii w warunkach suchych i tropikalnych absorbują odpowiednio płyty komórkowa FSH25XD oraz FSP30XW.
- Komórki o kształcie typu *F* oraz okładziny H_{25} najkorzystniej wpływają na właściwości mechaniczne płyt komórkowych.
- Komórki o kształcie typu *F* oraz okładziny P_{30} najkorzystniej wpływają na zdolności pochłaniania energii przez płyty komórkowe.

Trzecia hipoteza badawcza wymagała dowodu czy rodzaj okładzin, geometria komórek rdzenia i sposób ich impregnacji mają znaczący wpływ na właściwości mechaniczne warstwowych płyt meblowych w zmiennych warunkach wilgotności względnej i temperatury powietrza. Powyższy artykuł oparty na badaniach eksperymentalnych potwierdza ją w całości, a istotny związek pomiędzy wymienionymi czynnikami został również udowodniony analizą statystyczną.

4.10. Sposób wytwarzania impregnowanych rdzeni meblowych płyt komórkowych. PL.240666. (Publikacja A10)

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania impregnowanych rdzeni meblowych płyt komórkowych.

Sposób wytwarzania impregnowanych rdzeni meblowych płyt komórkowych według wynalazku zawiera kroki, w których kolejno: co najmniej raz modyfikuje się skrobię, korzystnie z wykorzystaniem kwasu wybranego spośród kwasów nieorganicznych: solnego, siarkowego, azotowego lub fosforowego w ilości 0,01–0,8 mola na 1 kg skrobi, lub w innym przypadku czynnego chloru, w postaci chloranu sodu w ilości 1,5–2,5% Cl w stosunku do masy skrobi. Z tak zmodyfikowanej skrobi sporządza się 6% roztwór z wodą, a następnie zrasza się nim arkusze papieru przeznaczone do wykonania rdzeni.

Proponowane w zgłoszeniu patentowym rozwiązanie dotyczy technologii wytwarzania rdzeni meblowych płyt komórkowych z papieru poddanego impregnacji modyfikowaną skrobią. Nieoczekiwanie okazało się bowiem, że impregnacja skrobią modyfikowaną papieru użytego do wytwarzania rdzeni poprawia znacząco ich właściwości mechaniczne, podobnie jak przy zastosowaniu żywic polimerowych. Zaletą jest naturalne źródło pochodzenia skrobi i jej korzystne oddziaływanie na środowisko naturalne. Impregnowany modyfikowaną skrobią papier charakteryzuje się: większą wytrzymałością na zerwanie, większymi modułami sprężystości liniowej oraz dobrą odpornością na działanie warunków klimatycznych, odpowiadających krajom strefy tropikalnej. Zwiększa ona zdolność ścian komórek do przenoszenia obciążeń krytycznych wywołujących ich wyboczenie. Ponieważ impregnacja dotyczy papieru, z którego uformowane zostaną komórki rdzenia, proces ten nie wpływa na deformację rdzeni, poprawia stabilność wymiarową komórek, ułatwia formowanie rdzeni i nie zakłóca procesu klejenia wspólnych ścian komórkowych. Otrzymane rdzenie są bezpośrednio używane do uformowania płyty warstwowej z zewnętrznymi okładzinami.

5. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszej pracy doktorskiej cykl publikacji naukowych umożliwił pozytywną weryfikację wszystkich trzech hipotez badawczych. Każdy z przytoczonych artykułów rozwiązuje wcześniej zdefiniowany problem badawczy, umożliwiając tym samym zebranie odpowiedniej wiedzy i zgromadzenie dowodów naukowych, niezbędnych do potwierdzenia założonych hipotez. Prace badawcze rozpoczyna publikacja dotycząca najmniejszej składowej lekkich płyt warstwowych z heksagonalnym papierowym rdzeniem, jaką jest pojedyncza komórka rdzenia. Ustalono zależność gęstości względnej od geometrii komórki oraz jak oddziałują one na właściwości mechaniczne. Udowodniono, że statyczna metoda numeryczna Monte Carlo jest skutecznym narzędziem optymalizacji właściwości fizyko-mechanicznych komórek. Na podstawie tych badań dobrano geometrie komórek i stworzono ich wirtualne periodyczne modele. Na dalszym etapie prac numerycznych posłużyły one do wytypowania najbardziej obiecujących kombinacji okładzin i rdzeni dla przyszłych lekkich warstwowych kompozytów drewnopochodnych, udowadniając, że grubość okładzin oraz geometria rdzenia to kluczowe czynniki sterujące ostateczną sztywnością i wytrzymałością lekkich płyt meblowych.

W dalszej części prac podjęto próbę zmierzenia się z istotnym problemem jakim jest wpływ warunków klimatycznych otoczenia na lekkie warstwowe kompozyty drewnopochodne z cienkościennym papierowym rdzeniem, jak również samych konstrukcji meblowych stworzonych na ich bazie. Ponadto oceniono możliwość ograniczenia destrukcyjnego wpływu wysokiej wilgotności względnej i temperatury powietrza poprzez impregnację rdzenia. W tym celu eksperymentalnie porównano właściwości mechaniczne papierowych rdzeni przed i po impregnacji. Osiągnięto zadowalające i bardzo obiecujące wyniki badawcze w tym zakresie. W efekcie jeden ze środków impregnujących, skrobia modyfikowana, został opatentowany (PL.240666). Otworzyło to drogę do produkcji lekkich warstwowych kompozytów drewnopochodnych z impregnowanym cienkościennym papierowym rdzeniem. W toku badań wykazano, iż impregnacja rdzenia niekorzystnie wpływa na właściwości mechaniczne takich kompozytów, nieznacznie obniżając ich sztywność i wytrzymałość w stosunku do struktur referencyjnych. Należy jednak zaznaczyć, że takie wyniki uzyskano tylko w klimacie hali produkcyjnej (T=25ºC / H=45%). W warunkach wysokiej wilgotności względnej i temperatury powietrza (T=28ºC / H=85%) impregnacja, zgodnie z oczekiwaniami, nie tylko zwiększa wytrzymałość i sztywność na zginanie płyt komórkowych, ale również zdolność do pochłaniania energii.

Wiedza ta może posłużyć nie tylko rozwojowi branży meblarskiej i zdobyciu nowych kierunków zbytu w strefie krajów o wysokiej wilgotności względnej i temperaturze powietrza, ale również szeroko rozumianej branży transportowej. Przemysł samochodowy coraz częściej sięga po kompozyty z heksagonalnym papierowym rdzeniem. Wykorzystywane są między innymi na poszycia dachów lub przegrody poziome części bagażowej. Branża logistyczna stosuje papierowe wypełnienia na bazie heksagonalnych komórek, jako absorbery energii podczas transportu szczególnie wrażliwych towarów. Globalnie wzrasta presja na stosowanie odnawialnych i łatwo przetwarzalnych zasobów naturalnych.

Cyfrowo wspomagane projektowanie konstrukcji meblowych jest dzisiaj w powszechnym użyciu. W wyniku przeprowadzonych badań i eksperymentów zweryfikowano, że metoda elementów skończonych (MES) może być skutecznym narzędziem wspomagającym projektowanie lekkich warstwowych kompozytów drewnopochodnych z cienkościennym papierowym rdzeniem. Należy przy tym zwrócić szczególną uwagę na różnice geometryczne pomiędzy wyidealizowanymi komórkami rdzenia a rzeczywistymi, oraz na rozwiązania

analityczne, nieobejmujące ich strukturalnej formy. Ponieważ jak udowodniono prowadzą one do błędnych wyników obliczeń. Kluczowym jest tutaj uwzględnienie imperfekcji geometrycznych w modelach MES, co gwarantuje zadowalającą zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Natomiast stworzona mapa uszkodzeń płyt komórkowych jest gotowym, uniwersalnym i czytelnym źródłem informacji w zakresie sposobu oraz rodzaju zniszczeń, jakie będziemy obserwować w zależności od kompozycji lekkiej płyty warstwowej. Tym sposobem inżynierowie różnych branż otrzymują szeroki wachlarz narzędzi, pozwalających na racjonalizację konstrukcji lekkich warstwowych kompozytów drewnopochodnych z cienkościennym papierowym rdzeniem, jeszcze przed ich fizycznym wyprodukowaniem.

Dalsze prace powinny skupić się na pozyskaniu papieru makulaturowego impregnowanego na końcowym etapie formowania kobierca w papierni. Umożliwi to skrobi modyfikowanej na stworzenie jednorodnego hydrofobowego filmu na całej powierzchni papieru. Tak przygotowany surowiec zapewni pożądaną powtarzalność wyników badanych rdzeni. Dodatkowo poszerzenie gamy środków adhezyjnych spośród klasy D3/D4 (podwyższona odporność na wilgoć i temperaturę), na styku rdzenia z okładzinami będzie miało swoje odzwierciedlenie w wytrzymałości i sztywności płyt warstwowych. Dodatkowo powinno ostatecznie rozwiać wątpliwość co do wpływu impregnacji na właściwości mechaniczne lekkich płyt warstwowych, znacząco poszerzając wiedzę w tym zakresie. Nade wszystko odwzorowanie mechanizmów zniszczenia takich struktur w analizie MES dopełni całości, oferując kompleksowe narzędzie do projektowania warstwowych płyt meblowych z heksagonalnym rdzeniem na bazie papieru makulaturowego.

6. Wnioski

Poniżej przedstawiono syntezę wniosków płynących z publikacji naukowych, zebranych w ramach rozprawy doktorskiej:

1. Wzrost wilgotności względnej i temperatury powietrza pogarsza sztywność meblowych połączeń mimośrodowych nawet o 25 %, zaś ich wytrzymałość nawet o 40%. Przywrócenie pierwotnej wilgotności połączenia poprawia istotnie ich sztywność i wytrzymałość. Właściwości te pozostają jednak niższe w odniesieniu do wyrobów referencyjnych.

2. W warunkach podwyższonej temperatury i wilgotności względnej powietrza (T=28ºC / H=85%), impregnacja zwiększa wytrzymałość na zginanie płyt komórkowych średnio o 22%, a moduł sprężystości liniowej o 14%. Średnia zdolność do pochłaniania energii po impregnacji skrobią wzrosła o 6%.

3. Impregnacja ścian papierowego rdzenia wybranymi środkami (żywica epoksydowa LiquidWood®, skrobia modyfikowana PL.240666, krzemian sodu) ma znaczący wpływ na jego właściwości mechaniczne.

4. Żywica epoksydowa LiquidWood® na tle pozostałych środków impregnujących wyróżnia się ponadprzeciętną poprawą właściwości mechanicznych. Jednak to skrobia modyfikowana (patent numer PL.240666) stanowi doskonały preparat do impregnacji rdzeni meblowych płyt komórkowych, ze względu na powszechną dostępność, nietoksyczność, niską cenę oraz możliwość dalszego przerobu.

5. Istnieje statystycznie udowodniony istotny związek pomiędzy impregnacją papieru modyfikowaną skrobią a właściwościami mechanicznymi wytworzonych płyt komórkowych o zmiennej geometrii komórek i różnych rodzajach okładzin, w zmiennych warunkach temperatury i wilgotności względnej powietrza

6. Gęstość względna oraz właściwości mechaniczne pojedynczej komórki papierowego rdzenia są zależne od jej geometrii. Możliwe jest utrzymanie stałej gęstości względnej przy różnych wymiarach liniowych komórek rdzenia oraz grubości papieru, z którego został on wykonany.

7. Zwiększona grubość ścian komórkowych rdzenia oraz okładzin, korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne, jak również na zdolność pochłaniania energii przez płyty komórkowe, niezależnie od warunków klimatycznych.

8. Metoda statycznej optymalizacji numerycznej Monte Carlo pozwala sterować jednocześnie kilkoma przeciwstawnymi zmiennymi decyzyjnymi, definiując tym samym w określonym zakresie właściwości fizyko-mechaniczne pojedynczej komórki papierowego rdzenia.

9. Niezależnie od geometrii rdzenia, wraz ze spadkiem grubości okładziny, wzrasta ugięcie oraz rosną naprężenia styczne lekkich warstwowych płyt meblowych. Kierunek ułożenia oraz grubość ściany wspólnej komórek rdzenia względem głównych osi ortotropii, mają istotny wpływ na wartość ugięcia tych płyt.

10. Opracowana metodyka numerycznego modelowania sztywności i wytrzymałości meblowych połączeń mimośrodowych jest poprawna. Może być ona wykorzystywana do wirtualnego symulowania jakości wyrobów wykonanych z warstwowych tworzyw drzewnych, poddanych zmiennym parametrom temperatury i wilgotności względnej powietrza.

11. Imperfekcje geometryczne są kluczowym czynnikiem, który oddziałuje na wyniki obliczeń analitycznych, wykazując znaczące różnice w zestawieniu z badaniami eksperymentalnymi. Również modele numeryczne użyte do analizy MES, które uwzględniały imperfekcje zostały pozytywnie zweryfikowane, oferując tym samym uniwersalne narzędzie do projektowania nowych warstwowych kompozytów.

12. Równania analityczne nieobejmujące strukturalnej formy rdzenia, nie mogą być stosowane do obliczeń modułów sprężystości płyt warstwowych z heksagonalnymi komórkami rdzenia.

13. Lekkie meblowe płyty warstwowe z heksagonalnym papierowym rdzeniem impregnowanym skrobią modyfikowaną, charakteryzują się zmniejszoną sztywnością i wytrzymałością w klimacie hali produkcyjnej.

14. Opracowane mapy uszkodzeń mogą służyć do projektowania drewnopochodnych paneli z papierowymi rdzeniami przed i po impregnacji modyfikowaną skrobią. Dominującym rodzajem zniszczenia takich kompozytów warstwowych jest uszkodzenie cienkościennego rdzenia przez ścinanie.

15. Zwiększona grubość ścian komórkowych rdzenia oraz okładzin korzystnie wpływa zarówno na właściwości mechaniczne, jak również na zdolność pochłaniania energii przez płyty komórkowe, niezależnie od warunków klimatycznych.

7. Literatura

[1] Wakekar AD, Patil SH, Deshmukh S, Thakar CM. The Review of Carbon Fiber Materials in Automotive Industry. ECS Trans 2022;107:16595–603. https://doi.org/10.1149/10701.16595ECST/XML.

[2] Mohammadi H, Ahmad Z, Mazlan SA, Faizal Johari MA, Siebert G, Petrů M, et al. Lightweight Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite for Automotive Bumper Applications: A Review. Polymers 2023, Vol 15, Page 193 2022;15:193. https://doi.org/10.3390/POLYM15010193.

[3] Blazy J, Blazy R, Drobiec Ł. Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City—A Review. Materials 2022, Vol 15, Page 2754 2022;15:2754. https://doi.org/10.3390/MA15082754.

[4] White RG. Developments in the acoustic fatigue design process for composite aircraft structures. Compos Struct 1990;16:171–92. https://doi.org/10.1016/0263-8223(90)90071-L.

[5] Njuguna J. Lightweight composite structures in transport: design, manufacturing, analysis and performance. Woodhead publishing; 2016.

[6] Sehar B, Waris A, Gilani SO, Ansari U, Mushtaq S, Khan NB, et al. The Impact of Laminations on the Mechanical Strength of Carbon-Fiber Composites for Prosthetic Foot Fabrication. Crystals 2022, Vol 12, Page 1429 2022;12:1429. https://doi.org/10.3390/CRYST12101429.

[7] Park S-J. Carbon Fibers 2018;210. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0538-2.

[8] Hiremath N, Mays J, Bhat G. Recent Developments in Carbon Fibers and Carbon Nanotube-Based Fibers: A Review. Http://DxDoiOrg/101080/1558372420161169546 2016;57:339–68. https://doi.org/10.1080/15583724.2016.1169546.

[9] Achtelik T, Tiwari R. Ecological lightweight design for sustainable composites: Need for application of frugal engineering principles 2022. https://doi.org/10.15480/882.4772.

[10] Paik JK, Thayamballi AK, Kim GS. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. Thin-Walled Structures 1999;35:205–31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-8231(99)00026-9.

[11] Xue Z, Hutchinson JW. Crush dynamics of square honeycomb sandwich cores. Int J Numer Methods Eng 2006;65:2221–45. https://doi.org/10.1002/nme.1535.

[12] Wadley HNG, Dharmasena KP, O'Masta MR, Wetzel JJ. Impact response of aluminum corrugated core sandwich panels. Int J Impact Eng 2013;62:114–28. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.06.005.

[13] Herup EJ, Palazotto AN. Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/Nomex honeycomb-sandwich plates. Compos Sci Technol 1998;57:1581–98. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00089-4.

[14] NILSSON E, NILSSON AC. PREDICTION AND MEASUREMENT OF SOME DYNAMIC PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES WITH HONEYCOMB AND FOAM CORES. J Sound Vib 2002;251:409–30. https://doi.org/10.1006/JSVI.2001.4007.

[15] Sayahlatifi S, Rahimi GH, Bokaei A. The quasi-static behavior of hybrid corrugated composite/balsa core sandwich structures in four-point bending: Experimental study and numerical simulation. Eng Struct 2020;210:110361. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110361.

[16] Dogan A. Low-velocity impact, bending, and compression response of carbon fiber/epoxy-based sandwich composites with different types of core materials. Https://DoiOrg/101177/1099636220908862 2020;23:1956–71. https://doi.org/10.1177/1099636220908862.

[17] Steeves CA, Fleck NA. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. Int J Mech Sci 2004;46:561–83. https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2004.04.003.

[18] Gupta N, Woldesenbet E, Hore K, Sankaran S. Response of Syntactic Foam Core Sandwich Structured Composites to Three-Point Bending. Http://DxDoiOrg/101177/1099636202004003140 2016;4:249–72. https://doi.org/10.1177/1099636202004003140.

[19] Omar MY, Xiang C, Gupta N, Strbik OM, Cho K. Syntactic foam core metal matrix sandwich composite under bending conditions. Mater Des 2015;86:536–44. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.07.127.

[20] Brown JA, Vendra LJ, Rabiei A. Bending properties of Al-steel and steel-steel composite metal foams. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 2010;41:2784–93. https://doi.org/10.1007/S11661-010-0343-Y/METRICS.

[21] Smardzewski J, Maslej M, Wojciechowski KW. Compression and low velocity impact response of wood-based sandwich panels with auxetic lattice core. European Journal of Wood and Wood Products 2021;79:797–810. https://doi.org/10.1007/S00107-021-01677-3/TABLES/6.

[22] Peliński K, Smardzewski J. Bending behavior of lightweight wood-based sandwich beams with auxetic cellular core. Polymers (Basel) 2020;12:1723.

[23] Gibson LJ. Biomechanics of cellular solids. J Biomech 2005;38:377–99. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.09.027.

[24] Yin S, Wu L, Nutt S. Stretch-bend-hybrid hierarchical composite pyramidal lattice cores. Compos Struct 2013;98:153–9. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.004.

[25] Jen Y, Chang L. Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters. Int J Fatigue 2008;30:1103–14. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.08.006.

[26] Mrówczyński D, Knitter-Piątkowska A, Garbowski T. Optimal Design of Double-Walled Corrugated Board Packaging. Materials 2022, Vol 15, Page 2149 2022;15:2149. https://doi.org/10.3390/MA15062149.

[27] Allen HG. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels. Elsevier; 1969. https://doi.org/10.1016/C2013-0-02134-2.

[28] Reichard TW. Paper honeycomb sandwich panels as lightweight structural components, 1972.

[29] Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids: structure and properties. Pergamon Press; 1988.

[30] Bitzer T. Honeycomb Technology. Dordrecht: Springer Netherlands; 1997. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5856-5.

[31] Sun G, Li G, Stone M, Li Q. A two-stage multi-fidelity optimization procedure for honeycomb-type cellular materials. Comput Mater Sci 2010;49:500–11. https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2010.05.041.

[32] Hu L, You F, Yu T. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs. Mater Des 2013;46:511–23. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.050.

[33] Burton WS, Noor AK. Assessment of computational models for sandwich panels and shells. Comput Methods Appl Mech Eng 1995;124:125–51. https://doi.org/10.1016/0045-7825(94)00750-H.

[34] Majewski A, Smardzewski J. Thin purenit honeycomb panels 2013.

[35] Majewski A, Smardzewski J. Models for elastic deformation of auxetic honeycomb with triangular cells 2015.

[36] Smardzewski J. Elastic properties of cellular wood panels with hexagonal and auxetic cores. Holzforschung 2013;67. https://doi.org/10.1515/hf-2012-0055.

[37] Smardzewski J, Prekrat S. Modelling of thin paper honeycomb panels for furniture. 2012.

[38] Voth C, Yadama V. Sustainable Lightweight Wood-Strand Panels for Building Construction. Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe - Timber Committee 2010:1–7.

[39] Staszak N, Gajewski T, Garbowski T. Shell-to-Beam Numerical Homogenization of 3D Thin-Walled Perforated Beams. Materials 2022, Vol 15, Page 1827 2022;15:1827. https://doi.org/10.3390/MA15051827.

[40] Schneider C, Zenkert D, Deshpande VS, Kazemahvazi S. Bending energy absorption of self-reinforced poly(ethylene terephthalate) composite sandwich beams. Compos Struct 2016;140:582–9. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.043.

[41] Foo CC, Seah LK, Chai GB. Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels. Compos Struct 2008;85:20–8. https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2007.10.016.

[42] Wang D. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels. Int J Impact Eng 2009;36:110–4. https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2008.03.002.

[43] Abd Kadir N, Aminanda Y, Ibrahim MS, Mokhtar H. Experimental study of low-velocity impact on foam-filled Kraft paper honeycomb structure. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2018;290:012082. https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012082.

[44] Wang DM, Wang ZW, Liao QH. Energy absorption diagrams of paper honeycomb sandwich structures. Packaging Technology and Science 2009;22:63–7. https://doi.org/10.1002/PTS.818.

[45] Xing Y, Yang S, Lu S, An Y, Zhao E, Zhai J. Energy absorption and optimization of Bi-directional corrugated honeycomb aluminum. Compos B Eng 2021;219:108914. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108914.

[46] Wang H, Ramakrishnan KR, Shankar K. Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores n.d. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.048.

[47] Gajewski T, Garbowski T, Staszak N, Kuca M. Crushing of Double-Walled Corrugated Board and Its Influence on the Load Capacity of Various Boxes. Energies 2021, Vol 14, Page 4321 2021;14:4321. https://doi.org/10.3390/EN14144321.

[48] Wei Z, Zhang X, Zheng Y, Kadir NA, Aminanda Y, Sultan M, et al. Numerical Analysis of Kraft Paper Honeycomb subjected to uniform compression loading. J Phys Conf Ser 2017;914:012004. https://doi.org/10.1088/1742-6596/914/1/012004.

[49] Abd Kadir N, Aminanda Y, Ibrahim MS, Mokhtar H. Experimental study of low-velocity impact on foam-filled Kraft paper honeycomb structure. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2018;290:012082. https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012082.

[50] Semple KE, Sam-Brew S, Deng J, Cote F, Yan N, Chen Z, et al. Properties of Commercial Kraft Paper Honeycomb Furniture Stock Panels Conditioned under 65 and 95 Percent Relative Humidity. For Prod J 2015;65:106–22. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00088.

[51] Chen Z, Yan N, Deng J, Smith G. Flexural creep behavior of sandwich panels containing Kraft paper honeycomb core and wood composite skins. Materials Science and Engineering: A 2011;528:5621–6. https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2011.03.092.

[52] Chen Z, Yan N. Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. Compos B Eng 2012;43:2107–14. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.03.008.

[53] Pohl A. Strengthened corrugated paper honeycomb for application in structural elements, 2009, p. 126–9. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-006060041.

[54] Giglio M, Gilioli A, Manes A. Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core. Comput Mater Sci 2012;56:69–78. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.01.007.

[55] Gilioli A, Sbarufatti C, Manes A, Giglio M. Compression after impact test (CAI) on NOMEX ™ honeycomb sandwich panels with thin aluminum skins. Compos B Eng 2014;67:313–25. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.015.

[56] Zhou Y, Wang Q, Guo Y, Xu Y, Yi X, Jia Y. Effect of phenolic resin thickness on frequency-dependent dynamic mechanical properties of Nomex honeycomb cores. Compos B Eng 2018;154:285–91. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.126.

[57] Panowicz R, Barnat W, NIezgoda T, Dybcio P. Numeryczno-doświadczalne badanie właściwości mechanicznych materiałów typu aramidowy plaster miodu. Modelowanie Inżynierskie 2011;0:319–24.

[58] Baranger E, Cluzel C, Guidault PA. Modelling of the behaviour of aramid folded cores up to global crushing. Strain 2011;47:170–8. https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2010.00753.x.

[59] Murthy O, Munirudrappa N, Srikanth L, Rao RMVGK. Strength and stiffness optimization studies on honeycomb core sandwich panels. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2006;25:663–71. https://doi.org/10.1177/0731684406058288.

[60] He M, Hu W. A study on composite honeycomb sandwich panel structure. Mater Des 2008;29:709–13. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2007.03.003.

[61] Sam-brew S, Semple K, Smith GD. Preliminary Experiments on the Manufacture of Hollow Core Composite Panels 2011;61:381–9.

[62] Librescu L, Hause T. Recent developments in the modeling and behavior of advanced sandwich constructions: A survey. Compos Struct 2000;48:1–17. https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00068-9.

[63] Barbu MC. Evolution of Lightweight wood composites. Pro Ligno 2015;11:21–6.

[64] Khojasteh-Khosro S, Shalbafan A, Thoemen H. Preferences of furniture manufacturers for using lightweight wood-based panels as eco-friendly products. European Journal of Wood and Wood Products 2020;78:593–603. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01519-8.

[65] Rani M, Choudhary P, Krishnan V, Zafar S. A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. Compos B Eng 2021;215:108768. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108768.

[66] European Commission. Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste 1994.

[67] Union European Parliament and the Council of the European. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste. Off J Eur Union 2018;61:109–40.

[68] Aus R, Moora H, Vihma M, Unt R, Kiisa M, Kapur S. Designing for circular fashion: integrating upcycling into conventional garment manufacturing processes. Fashion and Textiles 2021;8. https://doi.org/10.1186/S40691-021-00262-9.

[69] European Circular Economy Stakeholder Platform. Circular Economy in the Furniture Sector: Overview of Current Challenges and Competence Needs 2018. https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/circular-economy-furniture-sector-overview-current-challenges-and-competence-needs (accessed February 3, 2023).

[70] Piekarski CM, de Francisco AC, da Luz LM, Kovaleski JL, Silva DAL. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. Science of The Total Environment 2017;575:103–11. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.10.007.

[71] Nakano K, Ando K, Takigawa M, Hattori N. Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. International Journal of Life Cycle Assessment 2018;23:957–69. https://doi.org/10.1007/S11367-017-1343-6/METRICS.

[72] Puettmann ME, Associate R, Wilson JB. Life-cycle Analysis of Wood Products: Cradle-to-gate Lci of Residential Wood Building Materials. Wood and Fiber Science 2005:18–29.

[73] Foroughi F, Ghomi ER, Dehaghi FM, Borayek R, Ramakrishna S. A Review on the Life Cycle Assessment of Cellulose: From Properties to the Potential of Making It a Low Carbon Material. Materials 2021, Vol 14, Page 714 2021;14:714. https://doi.org/10.3390/MA14040714.

[74] Barboutis I, Vassiliou V. Strength Properties Of Lightweight Paper Honeycomb Panels For The Furniture. 10th International Scientific Conference of Engineering Design (Interior and Furniture Design) 2005:17–8.

[75] Pflug J, Vangrimde B, Verpoest I, Vandepitte D, Britzke M, Wagenführ A. Continuously Produced Paper Honeycomb Sandwich Panels for Furniture Applications. 5th Global Wood and Natural Fibre COmposites Symosium 2004:1–9.

[76] Smardzewski J, Gajecki A, Wojnowska M. Investigation of elastic properties of paper honeycomb panels with rectangular cells. Bioresources 2019;14:1435–51. https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1435-1451.

[77] Petutschnigg AJ, Ebner M. Lightweight paper materials for furniture - A design study to develop and evaluate materials and joints. Mater Des 2007;28:408–13. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.017.

[78] Smardzewski J, Kramski D. Modelling stiffness of furniture manufactured from honeycomb panels depending on changing climate conditions. Thin-Walled Structures 2019;137:295–302. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.019.

[79] Jivkov V, Simeonova R, Kamenov P, Marinova A. Strength properties of new lightweight panels for furniture and interiors. Wood Is Good–With Knowledge and Technology to a Competitive Forestry and Wood Technology Sector 2012:49–58.

[80] Masters IG, Evans KE. Models for the elastic deformation of honeycombs. Compos Struct 1996;35:403–22. https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2.

[81] Nguyen TBH, Nguyen HT. Lightweight Panel for Building Construction Based on Honeycomb Paper Composite/Core-Fiberglass Composite/Face Materials. Nano Hybrids and Composites 2021;32:15–23. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/NHC.32.15.

[82] Roberts JC. The chemistry of paper. Royal Society of Chemistry; 2007.

[83] Alava M, Niskanen K. The physics of paper. Reports on Progress in Physics 2006;69:669–723. https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/R03.

[84] Besserer A, Troilo S, Girods P, Rogaume Y, Brosse N. Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. Polymers 2021, Vol 13, Page 1752 2021;13:1752. https://doi.org/10.3390/POLYM13111752.

[85] Smardzewski J. Mechanical properties of wood-based sandwich panels with a wavy core 2015.

[86] Smardzewski J, Jasińska D. Mathematical models and experimental data for HDF based sandwich panels with dual corrugated lightweight core. Holzforschung 2016;0:265–73. https://doi.org/10.1515/hf-2016-0146.

[87] Wisdom BB. Think "Better" – lightweight panel advantages drive its momentum | Stiles Machinery 2005. https://www.stilesmachinery.com/articles/think-better-lightweight-panel-advantages-drive-its-momentum (accessed August 3, 2017).

[88] Statista. Top exporters of furniture globally 2021 2021. https://www.statista.com/statistics/1053231/furniture-leading-exporters-worldwide/ (accessed February 3, 2023).

[89] Ratajczak E. Polish furniture industry in the light of the concept of smart specialisation. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Forestry and Wood Technology 2014;86:193–203.

[90] Ozarska B, Harris G. Effect of cyclic humidity on creep behaviour of wood-based furniture panels. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities Series Wood Technology 2007;10.

[91] Zauscher S, Caulfield DF, Nissan AH. The influence of water on the elastic modulus of paper Part 1: Extension of the H-Bond theory. 1996.

[92] Smardzewski J, Słonina M, Maslej M. Stiffness and failure behaviour of wood based honeycomb sandwich corner joints in different climates. Compos Struct 2017;168:153–63. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.047.

[93] Yeh KC, Considine JM, Suhling JC. The influence of moisture content on the nonlinear constitutive behavior of cellulosic materials. Tappi Proceedings: 1991 International Paper Physics Conference, 1991.

[94] Östlund S, Niskanen K. Mechanics of Paper Products. Walter de Gruyter GmbH & Co KG; 2021.

[95] Kirwan MJ. Handbook of Paper and Paperboard, 2013, p. 351.

[96] Jasechko S, Taylor RG. Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. Environmental Research Letters 2015;10:124015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015.