Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Wydział Leśny i Technologii Drewna

Katedra Meblarstwa

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Krzysztof Peliński

Właściwości płyt meblowych o powierzchni synklastycznej i auksetycznym rdzeniu

Properties of furniture panels with a synclastic surface and the auxetic core

w formie spójnego tematycznie cyklu artykułów opublikowanych

w czasopismach naukowych

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Smardzewski

Poznań 2022

Podziękowania

Dziękuję Panu Prof. Dr hab. inż. Jerzemu Smardzewskiemu za poświęcony czas i doradztwo w trakcie powstawania niniejszej pracy.

Dziękuję moim dzieciom, za nieustającą inspirację do dalszych poszukiwań.

Słowa kluczowe:

- auksetyk, (auxetic),
- absorbcja energii, (energy absorption),
- MES, (FEM),
- symulacja, (simulation),
- synklastyczna powierzchnia, (synclastic surface),
- geometria wklęsła, (re-entrant geometry),
- panel drewnopochodny, (woodbased panel).

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

Wykaz stosowanych skrótów

- t_A (mm) – grubość ściany komórkowej,
- l_A, h_A (mm) – długości ściany komórkowej, odpowiednio swobodnej i podwójnej,
- φ_A, ε_A(˚) – wewnętrzne kąty komórki,
- S_y, L_x (mm) – wymiary gabarytowe komórki, odpowiednio wysokość i szerokość,
- L_z (mm) – grubość rdzenia
- ρ_A (-) – gęstość względna komórki,
- ρ (kg/m^3) – gęstość materiału okładziny lub rdzenia,
- σ_y , τ_{yz} (MPa) – naprężenie normalne i styczne,
- σ_{max}, τ_{max} (MPa) – maksymalne naprężenia, odpowiednio normalne i styczne,
- U_z (mm) – maksymalne ugięcia,
- dX (mm), dY (mm) – przemieszczenia odpowiednio w kierunku X i Y,
- Fx,y (N) – obciążenie odpowiednio w kierunku X i Y
- X (mm) – szerokość rdzenia,
- Y (mm) – długość rdzenia,
- H (mm) – wysokość rdzenia,
- E_x, E_y, MOE_Y, MOE_X (MPa) – moduły sprężystości liniowej, odpowiednio w kierunku osi X i Y,
- G_{xy} (MPa) – moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie XY,
- MOR_Y, MOR_X (MPa) - wytrzymałość na zginanie odpowiednio w kierunku osi X, Y,
- E_i (MPa) – moduł sprężystości pojedynczej warstwy,
- ϑ_{yx}, ϑ_{xy} – współczynnik Poissona odpowiednio XY oraz YX,
- ϑ_{yx}^R ,ϑ_{xy}^R – współczynniki Poissona odpowiednio XY oraz YX, wyznaczone na drodze eksperymentu,
- I (mm^4) – moment bezwładności przekroju belki,
- I_i (mm^4) – moment bezwładności przekroju pojedynczej warstwy,
- Q_E, Q_{MOR} (Nm/kg) – współczynnik sztywności względnej i wytrzymałości względnej,
- K (N/mm) – współczynnik sztywności,
- MC (%) – wilgotność bezwzględna,
- SFD (kN/(m kg) – Specific Force-Deflection – właściwa siła-odkształcenie,
- SEa (J/kg) – Specific Energy absorption – właściwa absorpcja energii.

Spis treści

1. Wykaz publikacji……...(str. 6)
2. Aktywność naukowa i zawodowa…….(str. 7)
3. Przedmiot badań
3.1. Wstęp i geneza pracy…….…(str. 9)
3.2. Cel pracy……..(str. 12)
3.3. Omówienie prac wchodzących w skład cyklu
3.3.1. Wyniki publikacji A1. Modelowanie gęstości periodycznych struktur rdzeni płyt komórkowych…...……...……..(str. 13)
3.3.2. Wyniki publikacji A2. Właściwości sprężyste struktur rdzenia periodycznego wielowarstwowych płyt meblowych…….....(str. 15)
3.3.3. Wyniki publikacji A3. Badania eksperymentalne właściwości sprężystych papierowych i WoodEpox rdzeni płyt komórkowych……...(str. 16)
3.3.4. Wyniki publikacji A4. Wpływ gęstości względnej auksetycznych komórek z tworzyw drzewnych na właściwości mechaniczne warstwowej płyty komórkowej…….....(str. 22)
3.3.5. Wyniki publikacji A5. Charakterystyka zginania lekkich drewnopochodnych belek warstwowych z auksetycznym rdzeniem komórkowym…….……(str. 26)
3.3.6. Wyniki publikacji A6. Sztywność mebli skrzyniowych wykonanych z warstwowych paneli auksetycznych……...(str. 30)
3.3.7. Wyniki publikacji A7. Sztywność synklastycznych, auksetycznych, drewnopochodnych płyt warstwowych…….....(str. 32)
3.3.8. Wyniki publikacji A8. Reakcja statyczna synklastycznego panelu warstwowego z auksetycznymi rdzeniami drewnopochodnymi poddawanego ściskaniu…….(str. 34)

4. Literatura…….....(str. 44)
5. Streszczenia……..(str. 46)
6. Kopia artykułów stanowiących cykl publikacji……(str. 49)
7. Oświadczenia współautorów prac……..(str. 50)

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

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z cyklu osmiu publikacji na temat *"Właściwości płyt meblowych o powierzchni synklastycznej i auksetycznym rdzeniu":*

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 Smardzewski J., **Peliński K**. (2019) Experimental testing of elastic properties of paper and WoodEpox® in honeycomb panels. Bioresources, 14(2), 2977-2994. DOI: 10.15376/biores.14.2.2977-2994

A.4 **Peliński K.**, Smardzewski J. (2018) Wpływ gęstości właściwej auksetycznych komórek z tworzyw drzewnych na właściwości mechaniczne warstwowej płyty komórkowej. 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, ISBN 978-83-63058-83-8: 128-133.

A.5 Smardzewski J., **Peliński K**. (2020) Bending behavior of lightweight wood-based sandwich beams with auxetic cellular core. Polymers, 12(8), 1723. DOI: 10.3390/polym12081723

A.6 **Peliński K.**, Smardzewski J. (2019) Stiffness of cabinet furniture made from auxetic sandwich panels. Proceedings of the XXIX-th International Conference Research for Furniture Industry, pp. 72-79. Gazi University, Technology Faculty Wood Products Industrial Engineering Department, Poznan University of Life Sciences, Faculty of Wood Technology, Department of Furniture Design, 19-20 September 2019 Ankara, Turkey. https://www.furnituredesign.org.tr/publication/

A.7 Smardzewski J., **Peliński K.**, Narojczyk J. (2020) Stiffness of synclastic wood-based auxetic sandwich panels, Physica Status Solidi (b), 257(10) 1900749. DOI: 10.1002/pssb.201900749

A.8 **Peliński K**., Smardzewski J. (2022) Static response of synclastic sandwich panel with auxetic wood-based honeycomb cores subject to compression. Elsevier, Thin-Walled Structures, *article under review*

2. Aktywność naukowa i zawodowa

Urodziłem się 15. maja 1991 r. w Poznaniu. W 2010 r. ukończyłem III Liceum Ogólnokształcące im. św. Jana Kantego w Poznaniu. W tym samym roku rozpocząłem studia na Wydziale Technologii Drewna, specjalność Meblarstwo. W lutym 2015 uzyskałem wyróżnienie srebrnym medalem „Za osiągnięcia w studiach", przyznawany absolwentom studiów pierwszego stopnia przez Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. W czerwcu 2015 roku uzyskałem tytuł magistra inżyniera Technologii Drewna specjalność Meblarstwo, broniąc pracę pt. "Wpływ procesu starzenia na wybrane właściwości pianek niskosprężystych". Promotorem mojej pracy był dr inż. Łukasz Matwiej. W 2015 roku rozpocząłem studia doktoranckie na Wydziale Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w Katedrze Meblarstwa.

W styczniu 2014 roku rozpocząłem pracę na stanowisku Inżyniera Działu Rozwoju w Vox, gdzie realizowałem wdrożenia z zakresu nowych produktów meblowych, drzwiowych oraz profilowych. W 2020 roku objąłem stanowisko Head of R&D w Lab150, gdzie pracuję do dnia dzisiejszego, realizując projekty badawczo-rozwojowe, odpowiadam za program inkubacji młodych przedsiębiorstw oraz pracę działów projektowego i prototypowni. Jestem również wykładowcą na kierunku Aranżacji Wnętrz Uniwersytetu SWPS, gdzie zajmuję się materiałoznawstwem. Prowadzę również działalność doradczą oraz z zakresu B+R.

Jestem współautorem zgłoszeń patentowych UP 418983 (22) 2016 10 03, *Płyta meblowa, warstwowa o grubości do 25 mm* oraz 425760 (22) 2018 05 28 *Mechanizm przesuwno-obrotowy drzwi, zwłaszcza do mebli skrzyniowych i szkieletowych*.

Prócz wymienionego cyklu publikacji stanowiących rozprawę doktorską jestem współautorem dwóch publikacji w pracach pokonferencyjnych, które dotyczą materiałów auksetycznych wykazanych w zestawieniu poniżej:

A.9 **Peliński K.**, Smardzewski J. (2018) Badania eksperymentalne właściwości sprężystych papierowych i Woodepox rdzeni płyt komórkowych. Dokonania Naukowe Doktorantów, Poznań 01.12.2018, Materiały konferencyjne pt. NOWE WYZWANIA DLA POLSKIEJ NAUKI Edycja IV.

A.10 **Peliński K.**, Smardzewski J. (2019) Usability of wood based auxetic sandwich panels to form synclastic shapes. Abstract Book, Institute of Molecular Physics Polish Academy of Science, ISBN 978-83-933663-8-5: 77.

Byłem współwykonawcą grantu badawczego „Modeling of the properties of new lightweight wood-based honeycomb panels with auxetic cores" 2016/21/B/ST8/01016 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Moje zadania naukowe w zrealizowanym projekcie dotyczyły opracowania eksperymentalnie i numerycznie auksetycznych synklastycznych struktur komórkowych. Brałem udział w dwóch konferencjach międzynarodowych oraz trzech konferencjach krajowych, których treści zebrano w zestawieniu poniżej:

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.

2. Wojnowska M., **Peliński K**., Maslej M., Słonina M., Smardzewski J. (2017) Elastic Properties of Periodic Core's Structures of Multilayers Furniture Panels. 4th International Furniture and Decoration Congress, 19-21 October 2017, Düzce University, Department of Furniture and Decoration, Düzce, Turkey.

3. **Peliński K.**, Smardzewski J. (2018) Wpływ gęstości właściwej auksetycznych komórek z tworzyw drzewnych na właściwości mechaniczne warstwowej płyty komórkowej. Dokonania Naukowe Doktorantów, Poznań 15.04.2018.

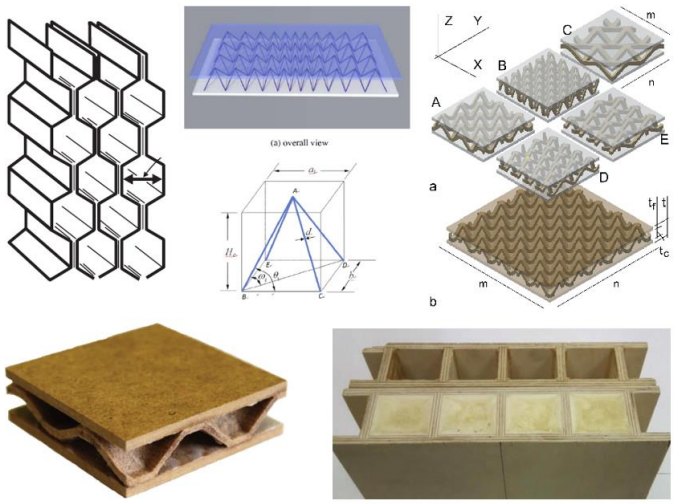
4. **Peliński K.**, Smardzewski J. (2018) Badania eksperymentalne właściwości sprężystych papierowych i WoodEpox rdzeni płyt komórkowych. Dokonania Naukowe Doktorantów, Poznań 01.12.2018.

5. **Peliński K**., Smardzewski J. (2019) Stiffness of cabinet furniture made from auxetic sandwich panels. Proceedings of the XXIX-th International Conference Research for Furniture Industry. Gazi University, Technology Faculty Wood Products Industrial Engineering Department, Poznan University of Life Sciences, Faculty of Wood Technology, Department of Furniture Design, 19-20 September, Ankara.

3. Przedmiot badań

3.1. Wstęp i geneza pracy

Kompozyty drewnopochodne cenione są za łatwą obrabialność, elastyczność modyfikacji estetycznej i wysoki stosunek wytrzymałości do ich gęstości. Ich właściwości fizyko-mechaniczne wypadają bardzo korzystnie wśród innych materiałów kompozytowych. W celu uzyskania małej gęstości bez istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych, opracowywane są nowe generacje drewnopochodnych płyt warstwowych. Prowadzone badania dotyczą rozwoju nowatorskich materiałów wielowarstwowych, w których geometria rdzenia jest modyfikowana lub wykonywana przy użyciu nowego surowca. Wykorzystując znane materiały drewnopochodne jako okładziny, uzyskane w ten sposób panele o budowie warstwowej, mogą wykazywać lepsze właściwości w porównaniu z konwencjonalnymi materiałami. Panele z rdzeniem o strukturze plastra miodu z powodzeniem stosowane w wielu gałęziach przemysłu. Materiały te są powszechnie stosowane w lotnictwie i przemyśle stoczniowym (Rupani *i in.* 2017; Marsh and Jacob 2007; Cunningham i White 1999; Negro *i in.* 2011) przemyśle samochodowym (Prucz *i in.* 2013), materiałach budowlanych i przemyśle meblarskim (Aydincak 2007; Pan *i in.* 2008, Jen i Chang 2008; Chang i Ebcioglu 1961; Smardzewski 2013,2015). Rdzenie płyt komórkowych są ulepszane w zakresie ich geometrii i rodzaju zastosowanego materiału (Wadley *i in.* 2003). Zwykle mają strukturę periodyczną złożoną z komórek heksagonalnych, strzałkowych, chiralnych, pryzmatycznych, piramidalnych, kratowych lub skorupowych (ryc. 1).

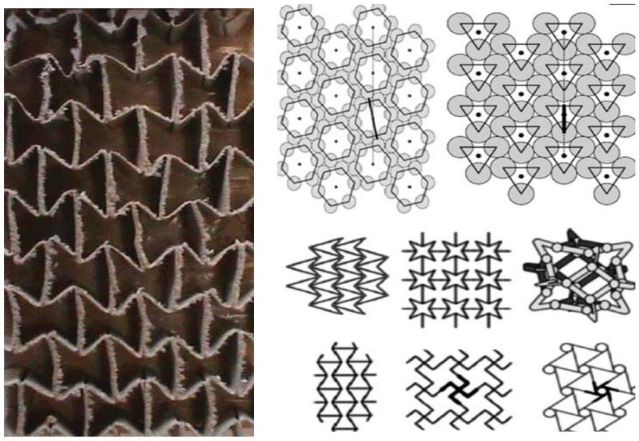


Ryc. 1. Przykłady płyt warstwowych i rdzeni o komórkach: heksagonalnych, piramidalnych, kratowych lub skorupowych.

Powszechnie wykonuje się je z aluminium, tytanu, stali nierdzewnej (Paik *i in.* 1999; Xue and Hutchinson 2006; Dharmasena *i in.* 2008; Wadley *i in.* 2013), tworzyw sztucznych (Herup i Palazotto 1998; Nilsson i Nilsson 2002). Prowadzone były również badana nad wzmacnianiem rdzeni wykonanych ze stopu metalu z dodatkowymi wtrąceniami włókien szklanych oraz włókien węglowych wzmacnianych tworzywami sztucznymi (Rejab i Cantwell 2013). Dzięki periodycznej strukturze rdzenia o budowie plastra miodu, kompozyty takie wykazują zadowalające właściwości mechaniczne ze względu na doskonały stosunek sztywności i wytrzymałości do gęstości względnej (Bitzer 1997, Pour *i in.* 2006, Alderson i Alderson 2007, Gibson i Ashby 1999). Poszukuje się również nowych, trwałych kompozytów biologicznych, które mogłyby być stosowane

jako zamiennik konwencjonalnego plastra miodu (Smardzewski 2019a, 2019b; Peliński and Smardzewski 2019). Płyty komórkowe mają szeroki zakres wykorzystania do produkcji mebli i stolarki budowlanej (Pflug *i in.* 2004). Podejmowane były również udane próby modyfikacji geometrii komórek rdzenia na skorupową (Smardzewski i Jasińska 2016; Smardzewski i Majewski 2015) lub kratową z wykorzystaniem sklejki lub HDF (Klimek *i in.* 2016).

W celu poprawienia właściwości mechanicznych lekkich kompozytów warstwowych, komórkom rdzenia nadaje się właściwości auksetyczne (tj. ujemny współczynnik Poissona). Modele o anomalnym (ujemnym) współczynniku Poissona (Landau i Lifshitz 1986) badano ponad 30 lat temu (Kolpakov 1985, Almgren 1985, Wojciechowski 1987), a materiały o takiej własności zostały po raz pierwszy wyprodukowane przez Lakes w 1987 roku, a nazwane auksetykami przez Evansa (1991). Od tego czasu opublikowano wiele prac naukowych i przeglądów prezentujących właściwości i zalety auksetyków w odniesieniu do konwencjonalnych materiałów (o dodatnim współczynniku Poissona). Współczesne pozycje autorstwa Wojciechowskiego i in. (2017), artykuły Lakes (2017), Lim (2017), Yu i in. (2018) oraz książka Lim (2015) nawiązują i sięgają do szerokiej gamy prac przeglądowych, zagadnień tematycznych czy oryginalnych publikacji na temat auksetyków i powiązanych układów. Wprowadzenie sześciokątnej komórki typu re-entrant o ujemnych współczynnikach Poissona w miejsce konwencjonalnej, przyczynia się do polepszenia właściwości mechanicznych płyt warstwowych, w tym wytrzymałości na ścinanie, odporności na wgniatanie i pękanie w porównaniu z płytami o konwencjonalnych plastrach miodu (Zhang i in. 2015, Li i Wang 2017).

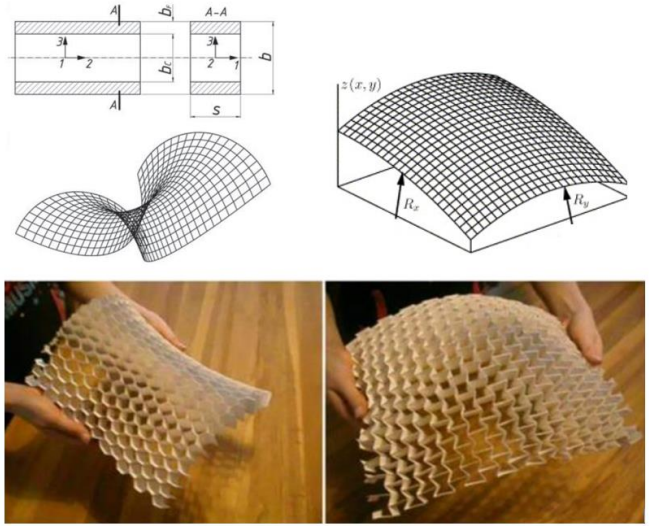


Ryc. 2. Przykłady komórek rdzeni o właściwościach auksetycznych.

Płyty komórkowe z auksetycznymi rdzeniami (ryc.2) mogą znaleźć szersze zastosowania w lekkich strukturach inżynierskich w porównaniu do struktur o konwencjonalnych właściwościach (Wang *i in.* 2018). Badania nad auksetycznością rdzeni komórkowych prowadzone były między innymi przez (Imbalzano *i in.* 2017, 2018). Autorzy wykazali interesujące zachowanie auksetyków podczas obciążenia dynamicznego. Rdzenie skutecznie dostosowywały odkształcenia przez stopniowe zagęszczanie materiału w strefie obciążonej. W ten sposób zwiększały odporność na uderzenia (Wang *i in.* 2014). Odmiennie od nich rdzenie o klasycznej strukturze plastra miodu z heksagonalnymi komórkami odkształcają się plastycznie, bez miejscowej poprawy sztywności. Wu *i in.* (2017) wskazali kierunki projektowania kompozytów warstwowych celem uniknięcia niedoskonałości wynikających z niepełnej struktury rdzeni. Yang *i in.* (2015) analitycznie modelowali struktury auksetyczne, nie uzyskali jednak satysfakcjonującej korelacji między obliczeniami teoretycznymi a badaniami eksperymentalnymi.

Niewiele jest jednak doniesień literaturowych nad zastosowaniem struktur auksetycznych w płytach drewnopochodnych. Istotne wyniki badań w zakresie modyfikacji kształtu struktur rdzeni komórkowych uzyskali Majewski i Smardzewski (2014, 2016). Autorzy skupili się na analitycznym modelowaniu auksetycznego rdzenia z komórkami w kształcie delta. Smardzewski (2013) zaprojektował i opisał korzystne właściwości mechaniczne trzywarstwowej płyty komórkowej z auksetycznym rdzeniem o komórkach typu re-entrant. W pracy wykazano, że rdzeń auksetyczny zwiększa wytrzymałość i sztywność płyt meblowych. Pozwala także na zastąpienie tradycyjnych w meblarstwie płyt wiórowych oraz płyt pilśniowych.

Dalsze badania płyt warstwowych z komórkami heksagonalnymi, cylindrycznymi, owalnymi, kagome itp. które charakteryzują się dodatnimi wartościami współczynników Poissona wykazały, że w próbie zginania w dwóch płaszczyznach jednocześnie tworzą powierzchnie antyklastyczne (siodłowe). To sprawia, że struktury te mają ograniczone zastosowanie do formowania powierzchni synklastycznych (ryc.3) stanowiących część powierzchni kuli. Ogranicza to także ich zastosowanie w przemyśle meblarskim (Smardzewski 2013).



a) b)

Ryc. 3. Przykład powierzchni: a) antyklastyczne, b) synklastyczne.

Nieliczne doniesienia literaturowe wskazują na korzystne technologicznie właściwości struktur warstwowych z auksetycznymi rdzeniami do tworzenia układów synklastycznych (Hu i in. 2016, Truxel i in. 2009). W pracy Librescu i Hause (2000), omówiono technologie wytwarzania i metody projektowania struktur o powierzchniach synklastycznych i budowie typu sandwich, skupiając się na zjawiskach wyboczenia podczas obciążeń użytkowych. W pracy Hohe i Librescu (1991) skupiono się nad nieliniową teorią analizy ugięć wielokrzywiznowych kopuł o strukturze typu sandwich. Z kolei Drake (2006) przedstawił analityczne podejście do wyznaczenia ugięć podpartych na obwodzie struktur kopułowych. Burton i Noor (1996) stworzyli i porównali kilka dwuwymiarowych modeli płyt o powierzchni synklastycznej, analizując obciążenia związane ze zmianami temperaturowymi. W pracy O'Sullivan i Slocum (2003) skupiono się na poszukiwaniu alternatywnych rozwiązań dla rdzenia heksagonalnego oraz falistego wykorzystywanego w konstrukcjach o powierzchniach synklastycznych. Z kolei MacDonald i Chen (1977) w sposób analityczny przestudiowali zakrzywione panele o budowie typu sandwich poddane obciążeniu użytkowemu. W pracy Cunningham i in. (2000),

przestudiowano wpływ różnych czynników, w tym orientacji włókien, szeregu warunków technologicznych oraz wielkości krzywizny powierzchni komórkowych na swobodne drgania takich kompozytów o budowie komórkowej. Analiza numeryczna potwierdziła, że wykorzystanie materiałów płytowych typu sandwich na elementy o powierzchni synklastycznej niesie ze sobą wiele korzyści, jednak technologia ich otrzymywania związana z termoformowaniem płaskich materiałów płytowych może być uciążliwa technologicznie i ekonomicznie.

Syntetyczny przegląd literatury wykazał, że dotychczas nie podnoszono kwestii wpływu imperfekcji kształtu komórek na ich stałe sprężystości w kontekście obliczeń analitycznych i numerycznych. Brakuje także oznaczeń stałych sprężystości auksetycznych komórek typu re-entrant dla rdzeni wykonanych z materiałów drzewnych. Ponad to nie przedstawiono dotychczas efektów wzajemnego oddziaływania warstw rdzenia i okładzin drewnopochodnych płyt o powierzchni synklastycznej.

Mając powyższe na uwadze, sformułowano następujące hipotezy badawcze:

- Imperfekcje kształtu komórek mają wpływ na ich stałe sprężystości w kontekście obliczeń analitycznych.
- Dla stałej gęstości względnej, geometria auksetycznych komórek typu re-entrant ma znaczący wpływ na sztywność oraz wytrzymałość warstwowych płyt meblowych.
- Dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re-entrant okładziny o powierzchni płaskiej decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej.
- Dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re-entrant okładziny o synklastycznej powierzchni decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej.

3.2. Cel pracy

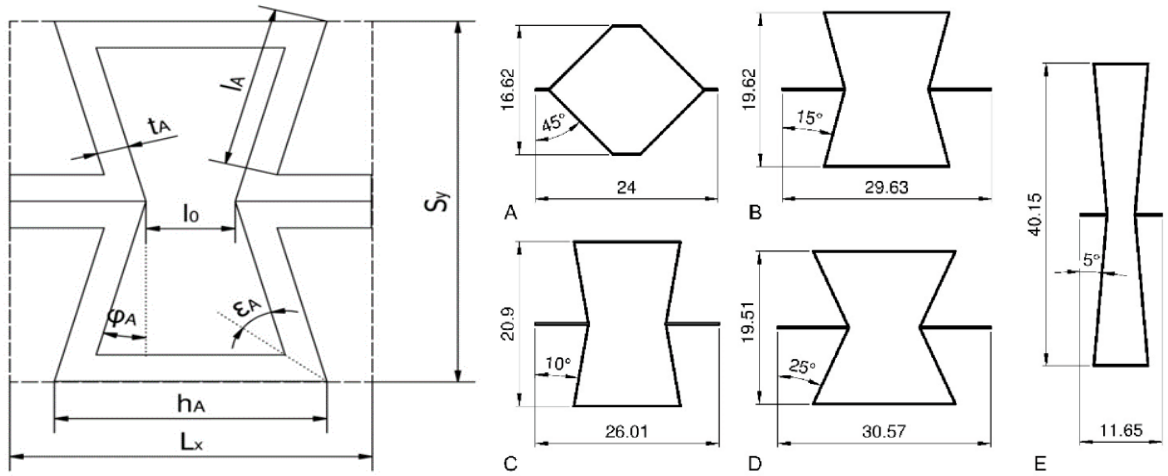
Celem pracy było określenie wpływu okładzin na sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych o powierzchni synklastycznej i z auksetycznym rdzeniem.

Ponadto celem pracy było określenie wpływu długości i kąta pochylenia ścian auksetycznych komórek typu re-entrant o stałej gęstości względnej na ich stałe sprężystości, a także ich wpływ na stałe sprężyste płaskich warstwowych płyt meblowych. Dalszym poznawczym celem badań było określenie wpływu jaki wywiera zmiana gęstości oraz sztywności okładzin na wytrzymałość oraz sztywność warstwowych płyt meblowych. Celem pracy było także wyjaśnienie wpływu imperfekcji geometrycznych na jakości wyników obliczeń analitycznych stałych sprężystości komórek typu re-entrant.

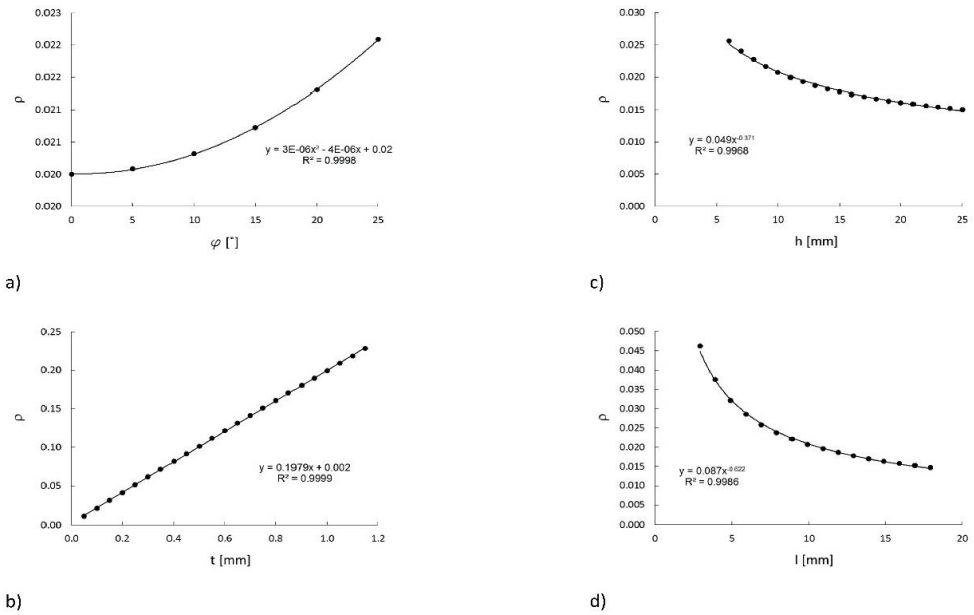
3.3. Omówienie prac wchodzących w skład cyklu

Wyniki publikacji A.1. ***Modelowanie gęstości periodycznych struktur rdzeni płyt komórkowych***

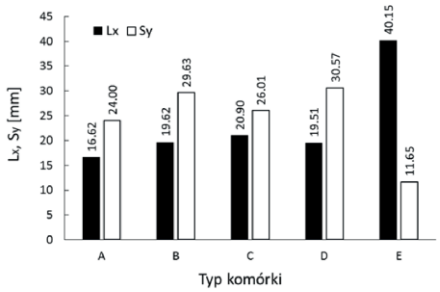
Wpływ parametrów wymiarowych komórek o kształcie kokardkowym na jej gęstość względną. Na ryc. 4 przedstawiono geometrię dla auksetycznej komórki w kształcie kokardki, gdzie: t_A (mm) grubość ściany komórkowej, l_A,h_A (mm) – długości ramion ściany komórkowej, φ_A, ε_A(˚) - wewnętrzne kąty komórki, S_y, L_x (mm) – wymiary gabarytowe komórki. Wraz ze wzrostem grubości ściany komórkowej i kąta nachylenia ścian komórkowych, względna gęstość komórek wzrasta, a maleje wraz ze wzrostem parametrów l_A i h_A. Współczynnik determinacji powyżej 0,9 wskazuje na bardzo dobre dopasowanie modelu regresji. Do dalszej analizy kilka wybrano komórki auksetyczne o identycznej gęstości pozornej (ryc. 4). Komórka referencyjna to komórka izotropowa A. Komórka E wykazuje zatem najbardziej ortotropowy charakter, a jej wymiary liniowe wykazują wyraźną dysproporcję między długością a szerokością, również wymiar długości ma najwyższą wartość spośród wszystkich wytypowanych komórek. Komórki B-D są nieco mniejsze, a także wymiary liniowe opisują geometrie o bardziej regularnym kształcie. Cyfrowa analiza obrazu geometrii elementarnych komórek rdzeni pozwoliła na ustalenie ich wymiarów rzeczywistych z uwzględnieniem imperfekcji. Ryc. 5 przedstawia zmienność gęstości względnej wraz ze zmianą wymiaru liniowego komórki. Ryc. 6 przedstawia wpływ typu komórki na jej wymiary liniowe.



Ryc. 4. Komórki rdzeni. A - komórka referencyjna o gęstości względnej ρ_A =0.0249, B-E komórki auksetyczne typu re-entrant.



Ryc. 5. Gęstość względna ρ jako funkcja: a) kąta ściany komórkowej φ ; b) grubości ściany komórki *t*; c) długości wspólnego boku komórki *h*; d) długości wolnego boku komórki *l*.



Ryc. 6. Wpływ typu komórki na jej wymiary liniowe.

W wyniku przeprowadzonych badań, sformułowano następujące wnioski:

- Możliwe jest wyszukiwanie komórek o różnej geometrii i podobnej lub tej samej gęstości względnej względna w ramach jednego typu komórki, jednocześnie dążąc do uzyskania optymalnie najniższej możliwej gęstości względnej.
- Istnieje ścisła korelacja między zmiennością wymiarów komórki, a jej gęstością względną.
- Możliwe jest tworzenie komórek o zaprojektowanych właściwościach jak gęstość względna, zmieniając ich wymiary liniowe. W celu zachowania technicznej wykonalności, geometria komórki może mieć kształt regularny lub nieproporcjonalny, co prowadzi do izo- lub ortotropowego charakteru.

Wytypowane komórki zostały użyte do przeprowadzenia dalszych badań, a w szczególności optymalizacji ich parametrów metodami numerycznymi.

Wyniki publikacji A.2. ***Właściwości sprężyste struktur rdzenia periodycznego wielowarstwowych płyt meblowych***

Celem badań było określenie wpływu długości i kąta pochylenia ścian auksetycznych komórek typu re-entrant o stałej gęstości względnej na ich stałe sprężystości. Celem badań było także uzyskanie optymalnych kształtów komórek auksetycznych typu re-entrant charakteryzujących się najmniejszą gęstością względną. W szczególności postanowiono zaprojektować różne modele komórek do zastosowania w warstwowych płytach meblowych. Stosując modele matematyczne opisujące gęstość względną, moduły sprężystości i współczynniki Poissona zaprojektowanych komórek, a także algorytm Monte-Carlo numerycznej optymalizacji statycznej wybrano komórki auksetyczne o identycznej gęstości względnej ρ_A =0.0249 (ryc. 4).

Wykazano, że wraz ze wzrostem grubości ściany komórkowej i kąta nachylenia ścian komórkowych, względna gęstość komórek wzrasta, a maleje wraz ze wzrostem parametrów l_A i h_A. Możliwe było wyszukiwanie komórek o różnej geometrii i podobnej lub identycznej gęstości względnej. W tabeli 1 wykazano, że długość i kąt pochylenia ścian komórek typu re-entrant o stałej gęstości względnej istotnie wpływa na ich stałe sprężystości. Wykazano także, że tworzenie komórek o zaprojektowanych właściwościach sprężystych prowadzi do wyselekcjonowania struktur o cechach izotropowych lub ortotropowych. Mogą mieć one fundamentalne znaczenie dla formowania meblowych płyt komórkowych.

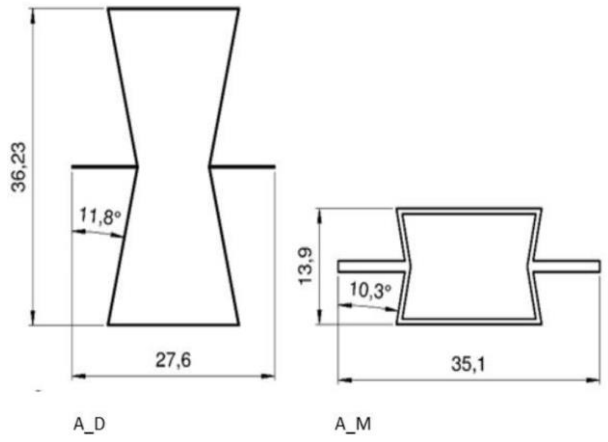
Tabela 1. Charakterystyczne właściwości optymalnych komórek auksetycznych typu re- entrant

Cell type	t_A	h_A	l_A	f_A	L_x	S_y	ρ	E_x	E_y	ν_{xy}	ν_{yx}	G_{xy}
	mm			°	mm		-	MPa		-		MPa
A	0.15	3.9	11.5	45	23.99	16.62	0.0249	0.038	0.017	0.11	1.48	0.68
B	0.15	17.6	10.0	15	29.63	19.62	0.0249	0.033	0.194	-0.42	-2.40	0.002
C	0.15	15.0	10.5	10	26.01	20.90	0.0249	0.023	0.458	-0.23	-4.43	0.002
D	0.15	20.0	10.6	25	30.57	19.51	0.0249	0.033	0.058	-0.75	-1.32	0.002
E	0.15	7.7	20.0	5	11.65	40.15	0.0249	0.000	1.109	-0.03	-38.00	0.003

W dalszych obliczeniach optymalizacyjnych wytypowano dwie komórki typu re-entrant charakteryzujące się skrajnymi gęstościami względnymi i właściwościami sprężystymi (tab. 2, ryc.7).

Tabela 2. Charakterystyczne właściwości optymalnych komórek auksetycznych typu re- entrant

Cell type	E_s	t_A	h_A	l_A	f_A	L_x	S_y	ρ	E_x	E_y	ν_{xy}	ν_{yx}	G_{xy}
		mm			°	mm		-	MPa		-		MPa
A_D	6000	0.10	17.67	18.40	11.75	27.60	36.23	0.0116	0.0008	0.0329	-0.1608	-6.2206	0.0003
A_E	6000	0.66	19.49	5.42	10.26	35.47	13.90	0.1452	38.32	97.07	-0.6284	-1.5914	0.3505



Ryc. 7. Geometria optymalnych komórek auksetycznych typu re- entrant.

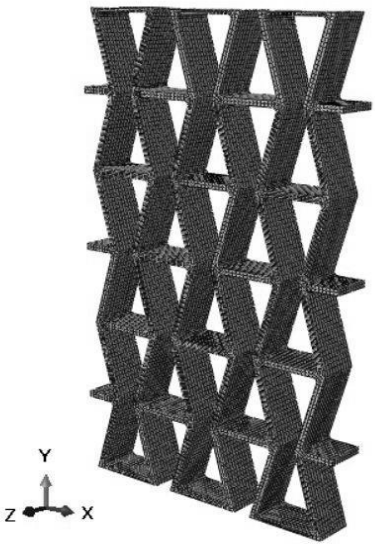
Zoptymalizowane modele komórek przedstawione na rycinie 7 umożliwiły przygotowanie modeli rdzeni do płyt komórkowych oraz badania właściwości sprężystych tych rdzeni. Posłużyły także do wykonania obliczeń numerycznych warstwowych płyt komórkowych, których wyniki przedstawiono w dalszej części pracy.

Wyniki publikacji A.3. ***Badania eksperymentalne właściwości sprężystych papierowych i WoodEpox rdzeni płyt komórkowych***

Celem badań było wyjaśnienie wpływu imperfekcji geometrycznych na jakości wyników obliczeń analitycznych stałych sprężystości komórek typu re-entrant. Ponad to efektem badań było określenie wpływu geometrii komórek oraz rodzaju materiału użytego do ich wykonania na właściwości sprężyste auksetycznych rdzeni dla płyt komórkowych. Modele geometryczne oraz obliczenia numeryczne wykonano z użyciem programu Abaqus v6.13 oraz zasobów klastra obliczeniowego EAGLE, Poznańskiego Centrum Superkomputerowo Sieciowego. Model obliczeniowy przedstawiono na rycinie 8. Zastosowano siatkę elementów skończonych typu HEX, oraz algorytm odkształceń elastyczno-plastycznych dla wybranych materiałów z których wykonano rdzenie (tab.3.).

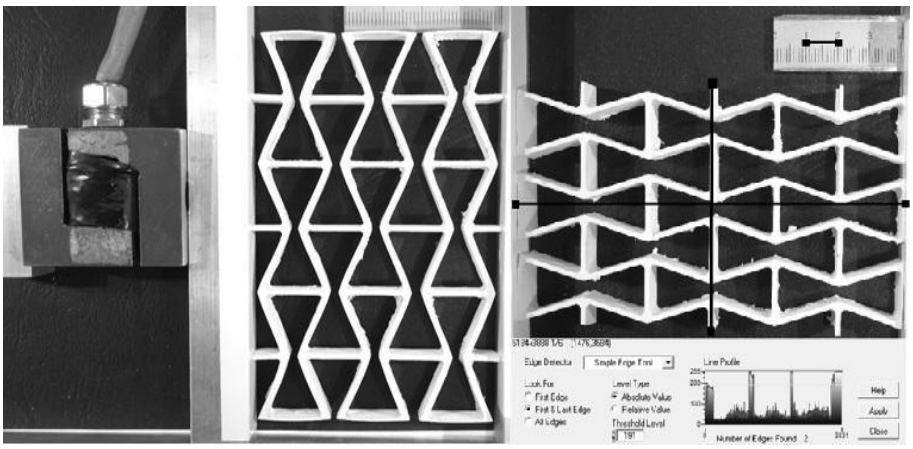
Tabela 3. Właściwości sprężyste wybranych materiałów rdzenia

Materiał	MOE_Y	MOE_X	MOR_Y	MOR_X	ϑ_{xy}	ϑ_{yx}
	(MPa)				(-)	
Papier makulaturowy	5142	1350	43	12,5	0,550	0,170
WoodEpox®	1029	-	5	-	0,3	



Ryc. 8. Przykładowy model rdzenia użyty do obliczeń numerycznych.

W dalszej kolejności zaprojektowano formy do wytworzenia rdzeni papierowych. Formy drukowano na drukarce 3D, z wykorzystaniem filamentu FDM Nylon-12™. Arkusze papieru zaginano, a następnie pocięto na paski o szerokości 10 mm. Kolejnym krokiem było klejenie pojedynczych pasków w zestawy z wykorzystaniem kleju PVAC Woodmax FF 12.47 D2. Tak przygotowane zestawy naciągano na formę. Proces utrwalania kształtu rdzenia realizowano z wykorzystaniem suszarki laboratoryjnej w temperaturze 180±1°C, przez 300 s. Dla materiału WoodEpox uformowano płyty o grubości 10±0,2 mm. Płyty poddano wyrównaniu powierzchni na szlifierce szerokotaśmowej, a następnie frezowaniu z wykorzystaniem frezu trzpieniowego prostego HM o średnicy 3mm. Rdzenie poddano jednoosiowemu ściskaniu (ryc. 9) i zgodnie z metodyką jaką zastosowano w obliczeniach numerycznych. Dla każdego zastosowanego obciążenia wstępnego i obciążeń narastających wykonywano zdjęcie monochromatyczne. Następnie pomiar odkształceń rdzenia dokonano analizując zdjęcia z użyciem oprogramowania do cyfrowej analizy obrazu (ryc. 9).



Ryc.9. Badanie z wykorzystaniem kamery i oprogramowania IMAQ Vision do cyfrowej analizy obrazu.

Stosując metodę detekcji krawędzi w cyfrowej analizie obrazu odpowiednie współczynniki Poissona i moduły sprężystości liniowej obliczono z zależności:

$$\vartheta_{yx} = \frac{dX \cdot Y}{X \cdot dY} \text{ dla kierunku Y}$$

$$\vartheta_{xy} = \frac{dY \cdot X}{Y \cdot dX} \text{ dla kierunku X}$$

oraz

$$E_y = \frac{Fy \cdot Y}{H \cdot X \cdot dY} \text{ dla kierunku Y}$$

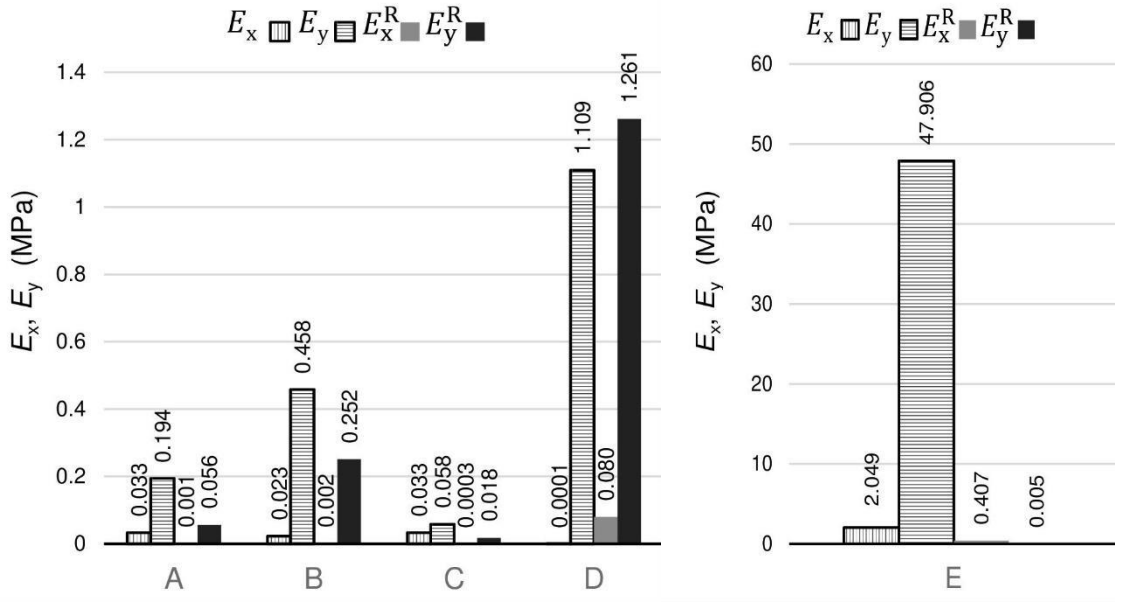
$$E_x = \frac{Fx \cdot X}{H \cdot Y \cdot dX} \text{ dla kierunku X}$$

Cyfrowa analiza obrazu geometrii elementarnych komórek rdzeni pozwoliła na ustalenie ich wymiarów rzeczywistych z imperfekcjami. W tabeli 4 zestawiono ważniejsze parametry geometrii komórek rzeczywistych oraz komórek teoretycznych (wyidealizowanych).

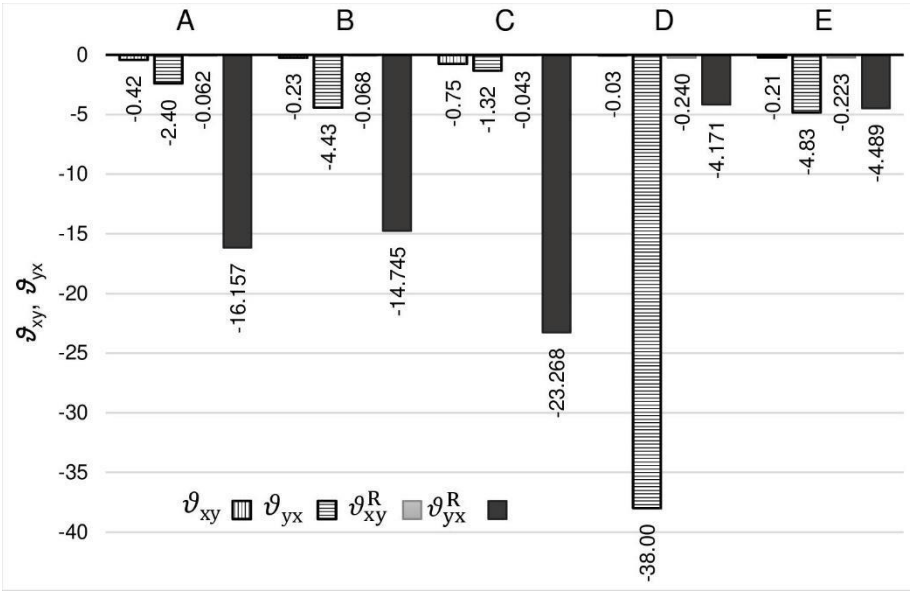
Tabela 4. Wymiary komórek rzeczywistych (R) i teoretycznych (T)

Wymiar komórki	Typ komórki									
	A		B		C		D		E	
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T
l_A [mm]	19,96	17,40	16,23	14,82	19,86	19,75	8,04	7,57	19,15	19,29
h_A [mm]	9,64	10,01	9,46	10,46	9,46	10,60	17,97	20,00	19,31	20,69
φ_A [°]	-13,9	-15,0	-8,9	-10,0	-22,3	-25,0	-6,4	-5,0	-16,4	-16,0
H [mm]	9,99	10,00	10,03	10,00	10,00	10,00	10,01	10,00	10,04	10,00

Z tabeli 4 można zauważyć, że główne imperfekcje geometrii są spowodowane zmianą wymiarów liniowych długości ścian oraz kątów pomiędzy nimi. W przypadku rdzeni papierowych dodatkowo także zmianą kształtu ścian z trapezowych na baryłkowe i wklęsłe. Najmniejsze zmiany dotyczą komórek E, o najbardziej dokładnej technologii wytworzenia. Zmiany geometrii wynikają zarówno z nierównomiernej struktury materiału jak i technologicznych możliwości i tolerancji wytworzenia. Wymiary komórek z imperfekcjami użyto do ponownego matematycznego zamodelowania właściwości sprężystych rdzeni stosując wzory matematyczne. Na rycinie 10 przedstawiono porównanie wartości modułów sprężystości liniowej E_x (MPa), E_y (MPa) teoretycznych komórek A, B, C, D, E, oraz modułów sprężystości liniowej E_x^R (MPa), E_y^R (MPa) analogicznych komórek rzeczywistych. Na rycinie 11 przedstawiono natomiast porównanie wartości współczynników Poissona ϑ_{xy}, ϑ_{yx} teoretycznych komórek A, B, C, D, E, oraz współczynników Poissona ϑ_{xy}^R, ϑ_{yx}^R analogicznych komórek rzeczywistych (eksperymentalnych).



Ryc. 10. Wartości analityczne modułów sprężystości liniowej dla modeli teoretycznych i rzeczywistych (eksperymentalnych).

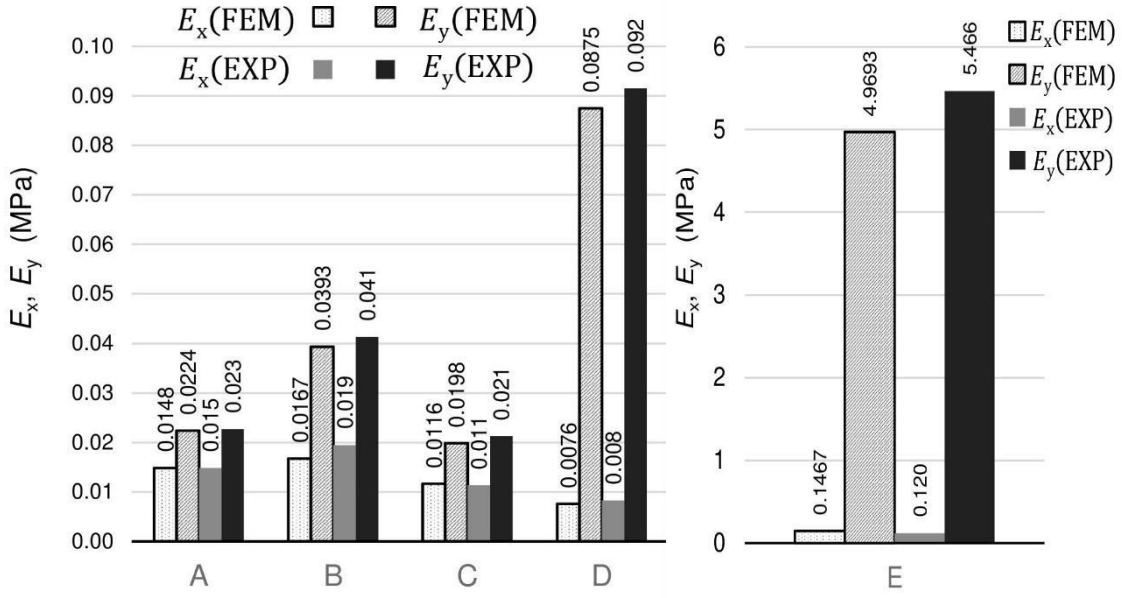


Ryc. 11. Wartości analityczne współczynników Poissona dla modeli teoretycznych i rzeczywistych (eksperymentalnych).

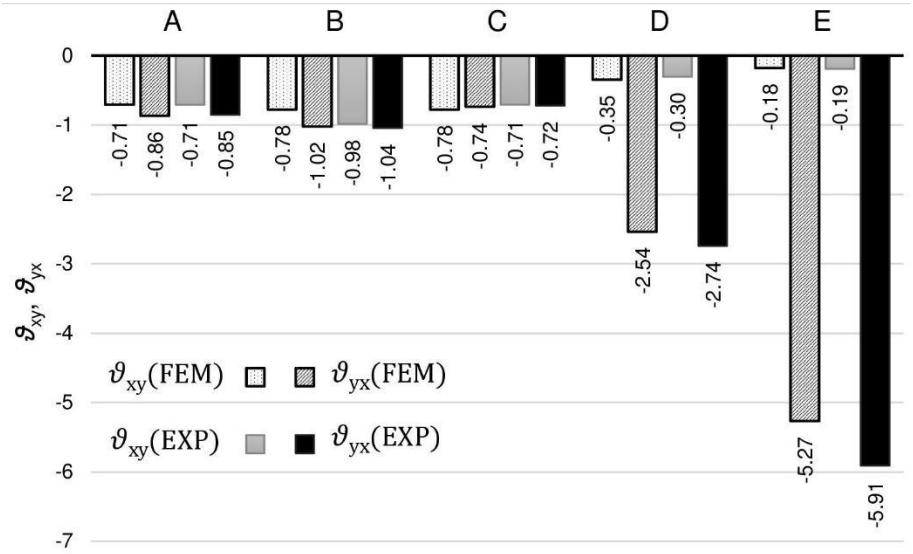
Jak wynika z rycin 10 i 11, geometria komórki silnie wpływa na jej własności sprężyste. Szczególnie istotnym jest wpływ kąta nachylenia ściany komórkowej φ_A, który w wyniku technologii wytwarzania rdzeni papierowych jest podatny na zmiany. Dla rdzeni papierowych o komórkach A-C, uzyskano kąty φ_A o rozwarciu większym niż założono analitycznie, a dla komórki D mniejszym od założonego. Komórki E, których technologia wytwarzania jest bardzo precyzyjną obróbką numeryczną, wiernie odpowiadają geometrii komórek teoretycznych. W tym przypadku różnice wartości współczynnika Poissona są niewielkie i mieszczą się w przedziale 6-7%. Zupełnie odmienną sytuację zaobserwowano w wypadku modułów

sprężystości liniowej tej komórki – moduł E_x zmniejszył się ponad 400-krotnie w stosunku do wartości wynikających z obliczeń komórek teoretycznych, moduł E_y ponad 100-krotnie. Tak znaczna różnica drugiej iteracji, jest wynikiem zarówno rzeczywistej geometrii komórki, jak i użyciem właściwego – rzeczywistego modułu materiału ustalonego na podstawie badań eksperymentalnych. Analizując wytwory papierowe, w odniesieniu do wyliczonych współczynników Poissona, największą różnicę zaobserwowano dla komórki typu C, gdzie współczynnik Poissona ϑ_{yx}^{R} wzrósł ponad 17-krotnie w stosunku do pierwszej iteracji, ze względu na zmianę kąta nachylenia ściany komórkowej. Dla komórek A i B, zmiana była już mniejsza. W wypadku komórki A, zaobserwowano prawie 7- krotne zwiększenie ϑ_{yx}^{R} w stosunku do ϑ_{yx}, co wynika ze zmiany kąta nachylenia ścian φ_A. Dla komórki B analogiczna różnica jest równa 300%. Z kolei komórka D, na skutek większego rzeczywistego kąta rozwarcia, zmniejszyła współczynnik ϑ_{yx}^{R} ponad 9 – krotnie w stosunku do ϑ_{yx}. Analogicznie, dla komórek A-C, współczynniki ϑ_{xy}^{R} uległy zmniejszeniu w stosunku do ϑ_{xy}. Odwrotną sytuację odnotowano dla komórki D. Wartości modułów E_x dla komórek A-C okazały się zawyżone nawet 11-krotnie w stosunku do E_x^R. Natomiast w wypadku komórki D, o silnie ortotropowych właściwościach, przekroczyły 800% na korzyść drugiej iteracji. Symulacja wartości modułów sprężystości, była zadowalająca dla komórki D, gdzie błąd nie przekroczył 7%. W wypadku komórek A-C, wartości E_y były zawyżone 2-4 krotnie w stosunku do analizy opartej na rzeczywistych wymiarach.

Na rycinie 12 przedstawiono porównanie wartości modułów sprężystości liniowej E_x (MPa), E_y (MPa) komórek A, B, C, D, E ustalonych na podstawie obliczeń numerycznych (FEM) i badań eksperymentalnych (EXP), zaś na rycinie 13 analogicznie wartości współczynników Poissona ϑ_{xy}, ϑ_{yx}.



Ryc. 12. Moduły sprężystości liniowej E_x, E_y wyznaczone numerycznie i eksperymentalnie.



Ryc. 13. Współczynniki Poissona wyznaczone numerycznie i eksperymentalnie.

Porównując wyniki analizy FEM i badań eksperymentalnych rdzeni papierowych, największe różnice odnotowano, dla modułu E_x rdzenia B. Na podstawie symulacji numerycznej otrzymano wynik o 14% mniejszy od eksperymentalnego. Z kolei dla symulacji modułu E_y najistotniejszą różnicę, odnotowano dla rdzenia C, gdzie zasymulowany wynik, był prawie 7% mniejszy od eksperymentalnego. W przypadku rdzenia WoodEpox®, symulacja pozwoliła na oszacowanie modułu E_x o 22% większego w stosunku do wyniku otrzymanego z badań eksperymentalnych. Obliczony numerycznie moduł sprężystości liniowej E_y jest mniejszy o ok. 9% w odniesieniu do wyników eksperymentalnych. Pozostałe symulacje rdzeni papierowych, w relacji do wyników eksperymentu, dostarczają wyników, które nie różną się więcej niż 9%.

Analizując jakość symulacji współczynników Poissona należy stwierdzić, że największą różnicę otrzymano pomiędzy obliczonym numerycznie i wyznaczonym eksperymentalnie współczynnikiem Poissona ϑ_{xy} dla rdzenia B. Wynik numeryczny jest większy o około 21% w odniesieniu do wyniku eksperymentalnego. Analogiczna różnica rysuje się dla ϑ_{yx} rdzenia typu D, i jest ona równa 8%. W przypadku rdzenia E, symulacja numeryczna dostarczyła mniejsze wartości współczynników ϑ_{xy} oraz ϑ_{yx} w przedziale od 8% do 11%. Wyniki obliczeń współczynników Poissona pozostałych komórek nie przekroczyły różnicy 13% zwykle na korzyść metody obliczeń numerycznych. Różnice uzyskanych wyników, wynikają w dużym stopniu z jakości geometrycznej wygenerowanego modelu numerycznego. Potwierdzono także poprawność zastosowania algorytmu odkształceń elastoplastycznych dla wybranych materiałów umożliwiającego poprawne odwzorowanie odkształceń badanej grupy próbek.

Wyniki badań wykazały, że istotne różnice stałych sprężystości występują między wynikami badań eksperymentalnych i obliczeń analitycznych. Jak wykazano, obliczenia matematyczne są bardzo wrażliwe na imperfekcje geometrii komórek. Biorąc pod uwagę wyidealizowany model matematyczny, pozbawiony rzeczywistych imperfekcji, wyniki obliczeń dla rdzeni papierowych są dalece mniejsze od wyników eksperymentalnych.

Jakkolwiek bliskie satysfakcjonującym były wyniki symulacji numerycznej stałych sprężystości rdzeni z różnymi komórkami, uznano za konieczne aby w dalszych badaniach

zagęszczać siatki elementów skończonych i stosować odpowiednie interakcje między powierzchniami konstrukcji modelowanych komórkowych płyt meblowych.

Wyniki publikacji A.4. ***Wpływ gęstości względnej auksetycznych komórek z tworzyw drzewnych na właściwości mechaniczne warstwowej płyty komórkowej***

Celem kolejnego etapu badań było numeryczne określenie wpływu długości i kąta pochylenia ścian komórek typu re-entrant, o stałej gęstości względnej, na stałe sprężystości płaskich warstwowych płyt meblowych. Zbadano także wpływ jaki wywiera zmiana gęstości oraz sztywności okładzin na wytrzymałość oraz sztywność warstwowych płyt meblowych o płaskich powierzchniach.

Do analizy numerycznej przygotowano modele bryłowe złożone z trzech osobnych części stanowiących okładziny zewnętrzne oraz rdzeń (ryc. 14). Okładziny płyt komórkowych zaprojektowano z tworzyw drzewnych których właściwości sprężyste zestawiono w tabeli 5. Grubość modelowanych płyt komórkowych wynikała z sumy grubości okładzin oraz stałej grubości rdzeni (10 mm) o wcześniej zaprojektowanych komórkach B,C,D,E (tab. 1), a także komórkach X,Y,Z, których wymiary zestawiono w tabeli 6.

Ryc. 14. Przykładowy model bryłowy płyty komórkowej przygotowany do obliczeń numerycznych.

Tabela 5. Właściwości sprężyste i grubości materiałów okładzin i rdzenia

Materiał okładzin i rdzeni	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Grubość [mm]	Oznaczenie
Okładzina sklejka Superform	10270	0.30	3	S
HDF	4400	0.33	2	D
Tektura introligatorska	3560	0.35	1	C
Papier	3560	0.35	0.1; 0.15; 0.66	P
WoodEpox	1120	0.35	1.5	E

Tabela 6. Właściwości charakterystyczne komórek auksetycznych X,Y,Z

Typ komórki	t_A	h_A	l_A	f_A	L_x	S_y	ρ	E_x	E_y	ν_{xy}	ν_{yx}	G_{xy}
	mm			°	mm		-	MPa		-		MPa
X	0.66	19.49	5.42	10.26	35.47	13.90	0.1452	38.32	97.07	-0.6284	-1.5914	0.3505
Y	0.10	17.67	18.40	11.75	27.60	36.23	0.0116	0.0008	0.0329	-0.1608	-6.2206	0.0003
Z	1.50	19.29	19.90	15.99	23.61	41.27	0.1547	2.049	47.906	-0.21	-4.83	0.6857

Próbki poddano trzypunktowemu zginaniu zgodnie z wymaganiami EN-310. Wybrano stałą wartość obciążenia 100 N dla każdej próbki. Przygotowane do obliczeń numerycznych warianty płyt komórkowych zestawiono w tabeli 7. Obliczenia numeryczne wykonano w programie Abaqus 6.13 na klastrze obliczeniowym Eagle w PCSS. Podczas modelowania płyt komórkowych wykorzystano zarówno komórki o omówionych wcześniej kształtach, ale także wskazówki dotyczące dokładności tworzenia siatek elementów skończonych.

Dla ułatwienia oznaczenia kolejnych wariantów formatek, ich nazwy kodowane były zgodnie z następującym kluczem ABCDE, gdzie:

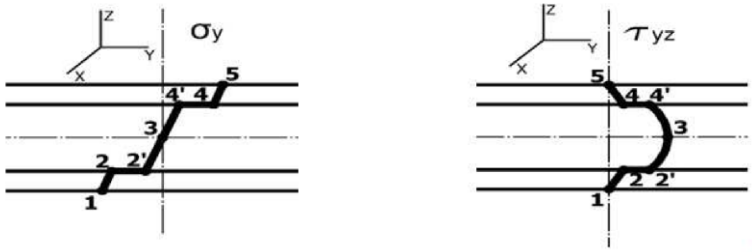
· (A) – rdzeń auksetyczny,
· (B) – wariant kształtu rdzenia, oznaczany kolejnymi literami alfabetu,
· (C) – X/Y – kierunek ortotropii zgodny z dłuższą krawędzią próbki,
· (D) – materiał okładzin: S – sklejka Superform; D – HDF; C – tektura,
· (E) – materiał rdzenia: P – papier; E – WoodEpox.

Tabela 7. Oznaczenia płyt komórkowych zastosowanych do obliczeń numerycznych

Typ próbki	Typ komórki	Materiał okładzin	Materiał rdzenia	Wymiary komórek rdzenia		Grubość okładzin	Grubość rdzenia	Liczba węzłów	Liczba elementów
				S_x	L_y		L_z		
		-	-	mm	mm	mm	mm	-	-
ABYSP	B	Superform (S)	Papier (P)	29.63	19.62	3	10	1275869	999400
ACYSP	C			26.01	20.90			1263269	993240
ADYSP	D			30.57	19.51			1287797	1003620
AEYSP	E			11.65	40.15			1356257	1040520
AXYSP	X			23.99	16.62			1339667	1083720
AYYSP	Y			35.47	11.98			1237565	980040
AZYSE	Z		Woodepox (E)	23.61	41.27			1416905	1154680
ABYDP	B	HDF (D)	Papier (P)	29.63	19.62	2		870891	627200
ACYDP	C			26.01	20.90			858879	621320
ADYDP	D			30.57	19.51			886935	634820
AEYDP	E			11.65	40.15			943719	664880
AXYDP	X			23.99	16.62			923853	699600
AYYDP	Y			35.47	11.98			837207	837207
AZYDE	Z		Woodepox (E)	23.61	41.27			991179	761160
ABYCP	B	Tektura (C)	Papier (P)	29.63	19.62	1		530889	319160
ACYCP	C			26.01	20.90			519465	313560
ADYCP	D			30.57	19.51			544665	325700
AEYCP	E			11.65	40.15			596073	353320
AXYCP	X			23.99	16.62			578727	383720
AYYCP	Y			35.47	11.98			502161	304640
AZYCE	Z		Woodepox (E)	23.61	41.27			642189	441440

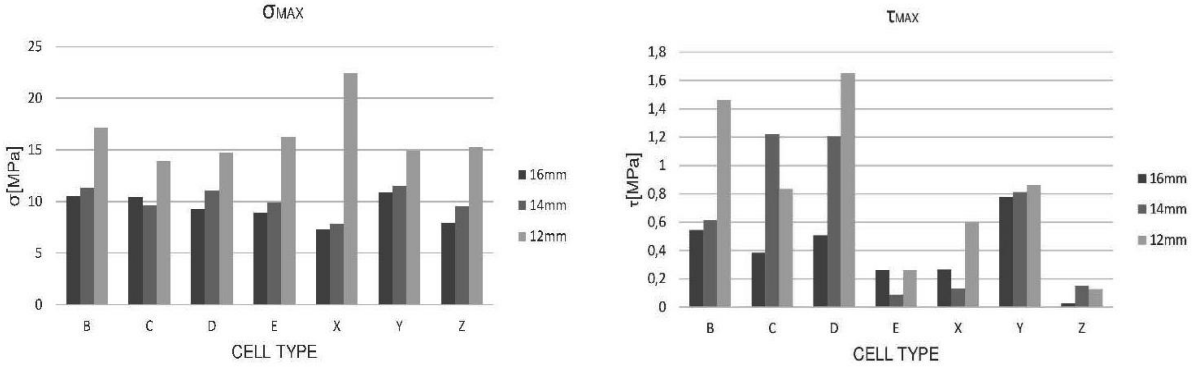
Celem kolejnego etapu badań było określenie wpływu geometrii komórek typu re- entrant, o stałej gęstości względnej, na wielkość naprężeń w zginanych płaskich warstwowych płytach meblowych. Zbadano także wpływ jaki wywiera zmiana sztywności okładzin na wytrzymałość oraz sztywność warstwowych płyt meblowych o płaskich powierzchniach.

Na podstawie obliczeń numerycznych określono wartość naprężeń normalnych σ_y, stycznych τ_{yz}, a także ugięcia belki na kierunku działania obciążenia. Węzłami, z których pozyskiwano wartości liczbowe naprężeń σ_y oraz τ_{yz} były odpowiednio miejsca oznaczone punktami 1,2,2’,3,4,4’,5 (ryc.15).

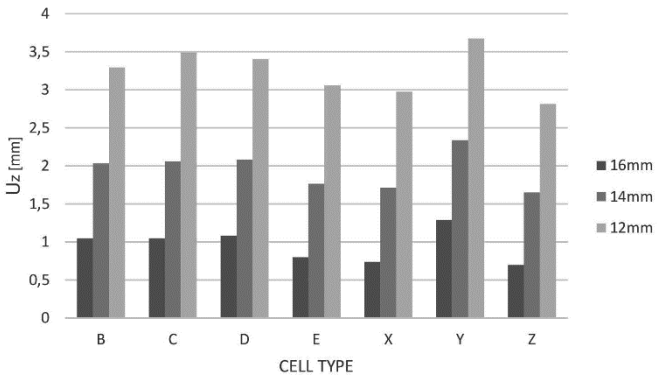


Ryc. 15. Przykład rozkładu naprężeń normalnych σ_y i stycznych τ_{yz} w przekroju płyty komórkowej wraz z wskazaniem punktów pomiarowych.

Analiza otrzymanych wyników dostarczyła informacji o asymetrycznym rozkładzie wartości naprężeń normalnych i stycznych pomiędzy górną a dolną okładziną (ryc. 15). Najwyższe naprężenia normalne, odnotowane zostały w próbkach o najmniejszej grubości 12 mm (okładzina z tektury technicznej, ryc. 16). Dla rozkładu naprężeń normalnych w układzie okładzina – rdzeń – okładzina, najwyższe wartości naprężeń (od -22.4 do 13.5 MPa) odnotowane zostały w najbardziej skrajnych punktach okładzin. W środku przekroju, wartości naprężeń normalnych były bliskie zeru. Odnotowano także dość dużą różnicę wartości naprężeń w punktach 1-2-2' oraz 4'-4-5. Spowodowane jest to ażurową strukturą rdzenia oraz w przypadku płyt o grubości 16 i 14 mm (odpowiednio okładziny sklejka i HDF) dysproporcją wartości modułów sprężystości liniowej pomiędzy materiałem okładzin i rdzenia. Analizując wyniki naprężeń stycznych (ryc. 16), zauważono, że najwyższe wartości naprężeń stycznych zostały odnotowane dla belek o całkowitej grubości 12 mm. Największe wartości mierzone były w środkowej części przekroju – punkcie 3. Odnotowano asymetryczny rozkład naprężeń stycznych po stronie ściskanej, w stosunku do strony rozciąganej próbki. Występujące tam naprężenia były wyższe lub różne od zera – zestawiając porównawczo punkty 4,5 w stosunku do punktów 1,2 (od 0.0 MPa do 0.4 MPa).



Ryc. 16. Maksymalne naprężenia normalne σ_{max} i styczne τ_{max} dla wszystkich analizowanych płyt komórkowych o grubości odpowiednio 12 mm, 14 mm, 16 mm.



Ryc. 17. Maksymalne ugięcia U_z dla wszystkich analizowanych płyt komórkowych o grubości odpowiednio 12 mm, 14 mm, 16 mm.

Zaobserwowano także, że najmniejsze ugięcia (ryc. 17) zaobserwowano w przypadku płyt komórkowych oznaczonych jako Z w których zastosowano komórki typu D, odpowiednio 0.80 mm, 1.76 mm, 3.06 mm. Jest to związane z relatywnie wysokim modułem sprężystości tych komórek E_y = 1.109 MPa, silną ortotropią, przy jednakowych parametrach grubości ściany komórkowej i gęstości względnej. Wśród rdzeni o komórkach optymalnych, najmniejsze ugięcia odnotowano dla belek z komórką typu Z o największej grubości ściany t_A = 1.5 mm i gęstości względnej ρ = 0.1547 kg/m^3. Nieznacznie większe wartości ugięcia uzyskano również dla płyt o grubości 16 mm, 14 mm, 12 mm z komórkami typu X, odpowiednio 0.74 mm, 1.71 mm, 2.98 mm. Komórki te charakteryzują się najwyższym wśród wszystkich komórek modułem sprężystości liniowej E_y = 97.07 MPa i średnimi wartościami t_A = 0.66 mm oraz ρ = 0.1452 kg/m^3. Zestawiając modelowane płyty komórkowe według malejącej ich grubości, wykazano także dość wysokie ugięcia belek z komórkami typu B, odpowiednio U_z = 1.05 mm, 2.06 mm, 3.49 mm, a wśród optymalnych rozwiązań, płyty z rdzeniem typu Y, odpowiednio U_z = 1.28 mm, 2.33 mm, 3.67 mm. Największe ugięcia uzyskano w przypadku płyt komórkowych o komórkach typu Y. Rezultat ten jest związany z małymi wartościami modułu sprężystości komórki E_x=0.0008 MPa, E_y=0.0329 MPa oraz najmniejszą grubością ściany komórkowej rdzenia t_A=0.1 mm.

Wyniki obliczeń numerycznych dostarczyły informacji, że w stosunku do referencyjnej płyty komórkowej o grubości 16 mm, wielkości ugięć płyt komórkowych o mniejszej grubości wrastają średnio 2-krotnie dla płyt o grubości 14 mm oraz ponad 3-krotnie dla płyt o grubości 12 mm. Najlepszą okładziną pod względem sztywności jest sklejka Superform o grubości 3 mm. Komórki X oraz Z charakteryzujące się relatywnie dużymi gęstościami względnymi, otrzymane na drodze optymalizacji metodą Monte-Carlo, wykazują najkorzystniejsze tendencje obniżenia naprężeń i zmniejszenia ugięć wybranych płyt komórkowych. Naprężenia normalne wzrastają ze zmniejszeniem grubości okładzin, naprężenia styczne natomiast, są silnie związane z geometrią komórek rdzenia. Lekkie, sztywne płyty meblowe z auksetycznym rdzeniem powinny być zatem wykonane z okładzinami ze sklejki oraz rdzeniem typu E. Kombinacja okładziny tekturowej oraz rdzenia z komórkami typu B lub Y pozwoliłaby natomiast stworzyć płyty na elementy o charakterze synklastycznym. Ze względu jednak na małą grubość ścian komórek typu Y, nie jest niemożliwa jej aplikacja przy obecnych warunkach technologicznych możliwych do zastosowania w przemyśle.

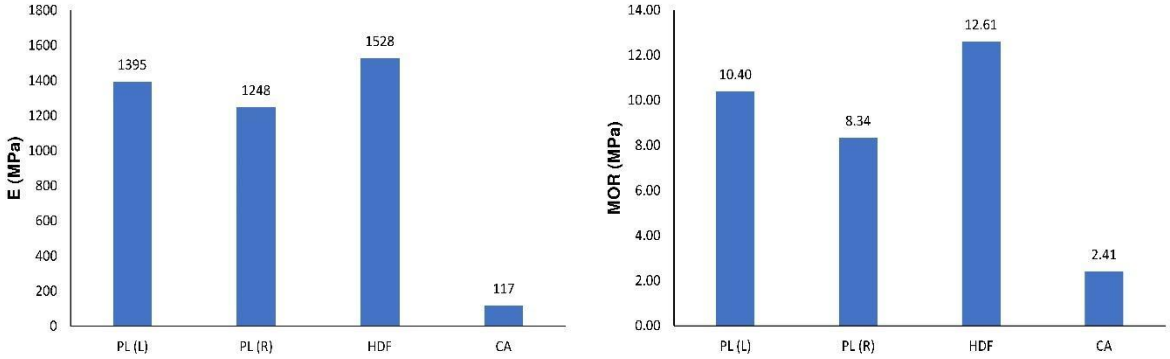
Wyniki publikacji A.5 *Charakterystyka zginania lekkich drewnopochodnych belek warstwowych z auksetycznym rdzeniem komórkowym*

Biorąc pod uwagę wyniki wcześniejszych obliczeń numerycznych, w dalszej części badań eksperymentalnie i numerycznie określono wpływ grubości i rodzaju okładzin drewnopochodnych na sztywność, wytrzymałość, zdolność do pochłaniania i rozpraszania energii warstwowych płyt komórkowych (belek) z rdzeniem auksetycznym. Celem poznawczym badań było wykazanie możliwości wykorzystania materiałów drewnopochodnych na okładziny i wielowarstwowe panele o strukturze plastra miodu. Wyniki badań miały także udowodnić, że materiały te doskonale nadają się do produkcji belek podatnych na duże ugięcia.

Do dalszych badań wytypowana została komórka rdzenia o geometrii Z (wymiary podano w tabeli 6, dla geometrii re-entrant ryc. 4) wykonana z WoodEpox. Na okładziny zastosowano sklejkę Superform (PL), HDF oraz tekturę (CA).

Właściwości mechaniczne belek wielowarstwowych

Zaobserwowano istotny wpływ różnych materiałów okładzinowych na wartość *E* i *MOR* płyt komórkowych (belek). Różnica w wartościach *E* (ryc.18) jest znacząca przy porównywaniu próbek z okładzinami HDF (1528 MPa), PL(L-wzdłuż włókien-1395 MPa) lub PL(R-prostopadle do włókien-1248 MPa) do płyty z okładzinami CA (117 MPa). W stosunku do belek z okładzinami wykonanymi z HDF, moduł sprężystości liniowej belek z PL(L), PL(R) i CA jest mniejszy odpowiednio o 9%, 18% i 92%. Podobną tendencję wykazują relacje między *MOR*. W stosunku do belek z okładzinami produkowanymi przez HDF, *MOR* belek PL(L), PL(R) i CA są mniejsze odpowiednio o 18%, 34% i 81%.



Ryc. 18. Porównanie *E* i *MOR* dla badanych belek.

Przedstawione zależności są czytelne w kontekście relacji między modułem sprężystości liniowej materiałów okładzin a ich momentami bezwładności. Przyjęto, że HDF ma liniowy moduł sprężystości E = 6880 MPa. W porównaniu z HDF, materiały okładzinowe PL, CA i materiał rdzeniowy WE mają mniejszy liniowy moduł sprężystości odpowiednio o 6%, 68% i 84%. Wynika to bezpośrednio z równania.

$$EI = \sum_{i=1}^{n} E_i I_i \,, \qquad (1)$$

stąd:

$$\frac{1}{12}EWt^3 = \frac{1}{12}E_cWt_c^3 + 2E_f\left(\frac{1}{12}Wt_f^3 + Wt_f\left(\frac{t_c + t_f}{2}\right)^2\right), \tag{2}$$

$$E = \frac{1}{t^3}\left(E_ct_c^3 + 2E_ft_f^3 + 6E_ft_ft^2\right). \tag{3}$$

Z wyłączeniem wspólnych czynników, takich jak E_f, t_f, i t przed nawiasem można ocenić wpływ poszczególnych parametrów na wartość modułu sprężystości liniowej belki.

$$E = 2E_f\left(\frac{t_f}{t}\right)^3\left(1 + \frac{1}{2}\frac{E_c}{E_f}\left(\frac{t_c}{t_f}\right)^3 + 3\left(\frac{t}{t_f}\right)^2\right). \tag{4}$$

Wpisując do równania (4) odpowiednie wartości liczbowe obliczono wpływ wybranych parametrów na moduł *E* dla okładzin tekturowych (CA):

$$E = 2E_f \cdot 0.083^3\left(1 + \frac{1}{2}\cdot 0.5157 \cdot 1000 + 3 \cdot 144\right), \tag{5}$$

dla sklejki (PL(L)):

$$E = 2E_f \cdot 0.19^3\left(1 + \frac{1}{2}\cdot 0.174 \cdot 37.04 + 3 \cdot 85.33\right). \tag{6}$$

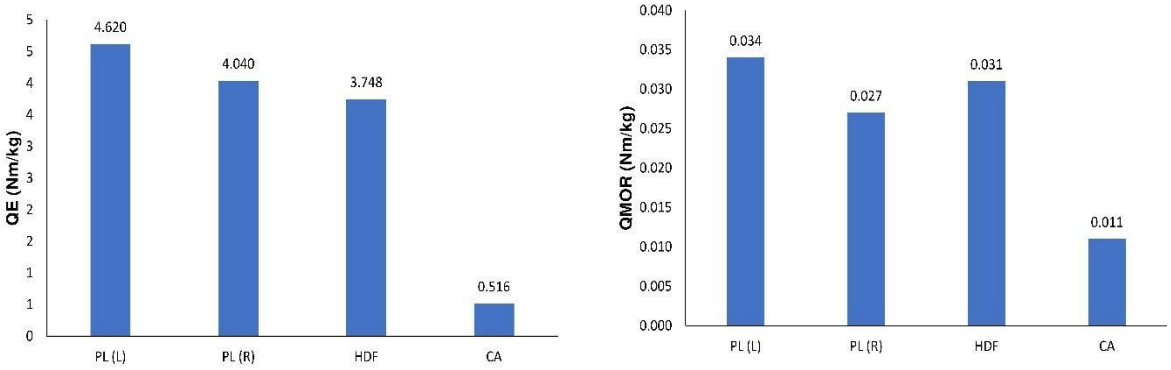
Wyniki wskazują, że liniowy moduł sprężystości belki został określony przez iloraz t_f/t i odwrotność tego ilorazu. W przypadku zastosowania tektury o grubości 1 mm iloraz wynosi 0,083. Dla sklejki o grubości 3 mm iloraz wynosi odpowiednio 0,19. Wynika z tego zasada, że grubsze okładziny w belkach wielowarstwowych dają większą sztywność. Można to również potwierdzić odwrotnością tego ilorazu. Dla tektury iloraz t_f/t wynosi 144, natomiast dla sklejki iloraz ten wynosi 85. Istotny jest również stosunek grubości rdzenia do grubości okładziny t_c/t_f. Dla analogicznych materiałów pokazanych powyżej odpowiednie ilorazy wynoszą 1000 i 37,04. Oznacza to, że grubsze rdzenie zwiększają sztywność belki. Niewątpliwie istotny jest również wpływ materiałów użytych do produkcji rdzeni i okładzin. Ilustruje to iloraz E_c/E_f. Dla okładzin kartonowych wynosi 0,5157, a dla sklejki wynosi 0,174. Utwierdza nas to w przekonaniu, że wyższy moduł sprężystości liniowej okładzin znacznie poprawia sztywność belki.

W przypadku struktur komórkowych korzystnie porównano ich moduł sprężystości liniowej i wytrzymałość na zginanie do ich gęstości. Wyznaczono dwa współczynniki:

$$Q_E = \frac{E}{\rho}, \tag{7}$$

oraz

$$Q_{MOR} = \frac{MOR}{\rho}. \tag{8}$$

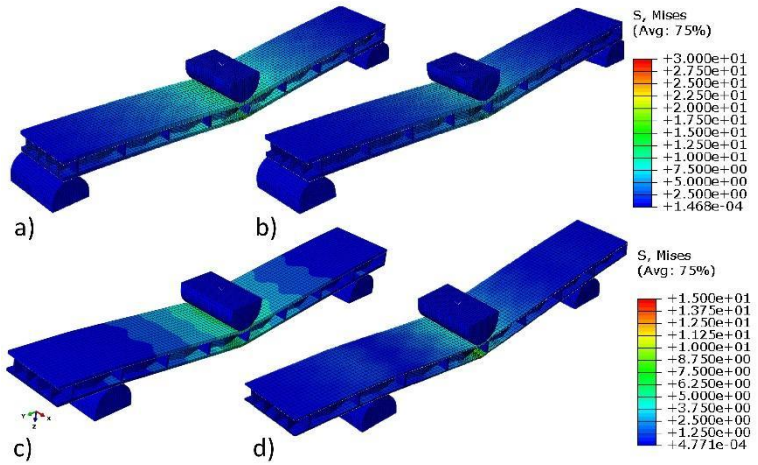


Ryc. 19. Porównanie Q_E i Q_{MOR} dla analizowanych belek.

Na ryc. 19 pokazano, że najlepszą kombinację uzyskano dla płyt z okładzinami PL (L) (Q_E = 4.620 Nm/kg). Najmniejsze wartości Q_E uzyskano dla belek z okładzinami CA (0.516 Nm/kg). Wysoki współczynnik Q_E wskazuje, że wytworzony kompozyt jest lekki i bardzo sztywny. W porównaniu z belkami HDF, struktury wielowarstwowe z PL mają lepszy współczynnik Q_E wynoszący około 8,0% do 23,5%. Nieznaczne różnice w prawidłowościach odnotowano dla współczynnika Q_{MOR}. Najlepsze właściwości wykazały belki z okładziną PL(L) (ryc. 19). Najmniej obiecująca okazała się konstrukcja z okładzinami kartonowymi.

Uszkodzenia belek warstwowych i pochłanianie energii

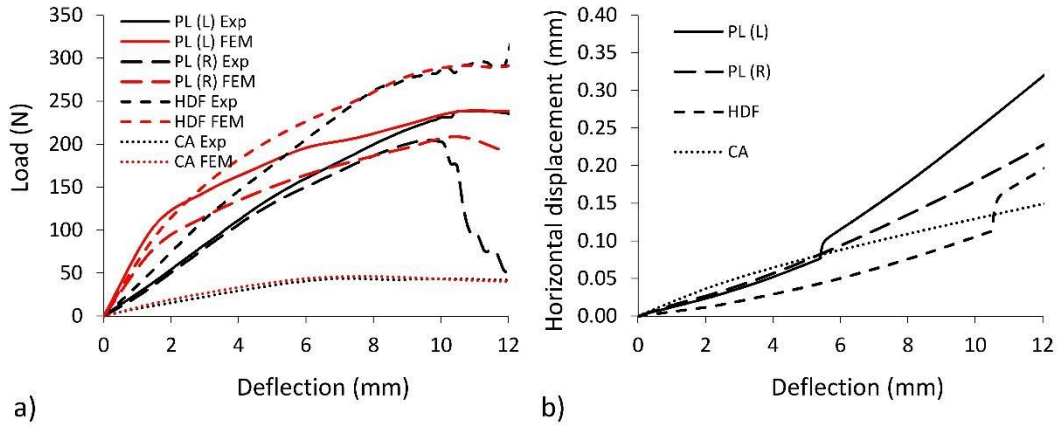
Zastosowana w obliczeniach numerycznych metoda xFEM pozwoliła na wyznaczenie miejsc uszkodzeń w rdzeniu i okładzinach. Rycina 20 przedstawia rozkład naprężeń zredukowanych Mises spowodowanych trzypunktowym zginaniem belek. Wynika z niego, że największe naprężenia znajdują się w strefie zgniotu. W dolnej, rozciągniętej okładzinie naprężenia wynoszą odpowiednio 22,9, 19,5, 13,8 i 11,3 MPa dla PL (L), PL (R), HDF i CA. Wartości te odpowiadają wytrzymałości poszczególnych materiałów.



Ryc. 20. Przykłady ugięcia belek: (a) PL(L), (b) PL(R), (c) HDF oraz (d) CA.

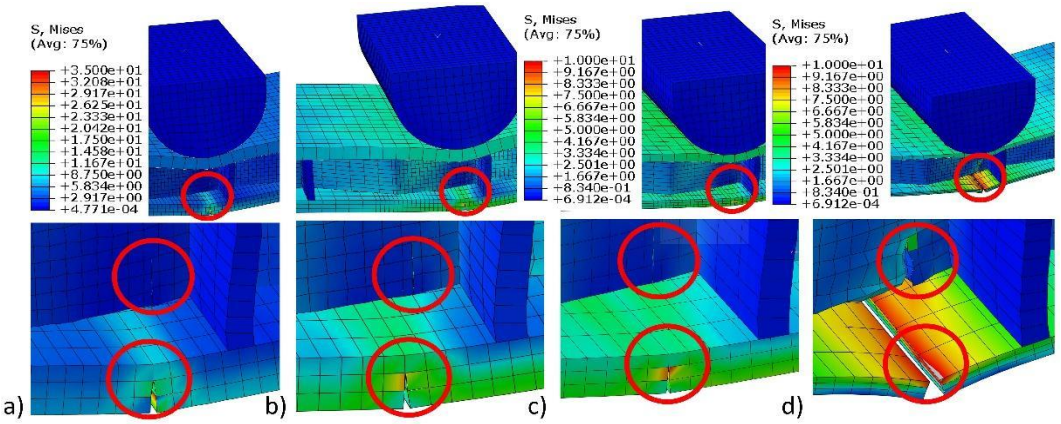
Za miarę uszkodzeń płyt komórkowych przyjęto wartość przemieszczenia poziomego w miejscu powstania pęknięcia. Zależność przemieszczenia poziomego w funkcji ugięcia próbki podczas zginania pokazano na rycinie 21b. Największe wartości przemieszczeń poziomych

odnotowano dla belek PL(L) (0,35 mm). Najmniejsze wartość wykazywały płyty komórkowe z okładzinami CA (0,15 mm). Dla belek z okładzinami PL(R) i HDF przemieszczenie poziome jest bardzo zbliżone i wynosi odpowiednio 0,25 i 0,20 mm. Najwyższe wartości pęknięcia dla belek PL(L) ze sklejką zorientowaną wzdłużnie do osi belki są również spowodowane ich strukturą wewnętrzną, w której pęknięcie jest inicjowane pęknięciem włókien. HDF i CA to materiały jednorodne, dlatego wartości przemieszczeń poziomych są relatywnie mniejsze

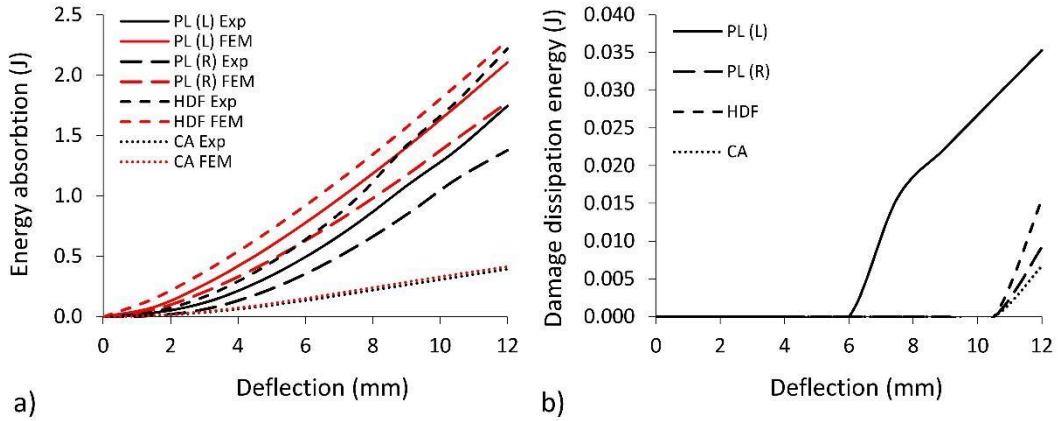


Ryc. 21. Sztywność belek wielowarstwowych oraz (a) wartości obliczeń numerycznych dla przesunięcia poziomego podczas zginania (b).

Istotny wpływ rodzaju materiału okładzin na właściwości mechaniczne belek wielowarstwowych można było zauważyć w przypadku występowania pęknięć okładzin i struktury rdzenia badanych belek (ryc. 22). W przypadku sklejki PL(L) główne pęknięcie występuje w materiale okładzinowym. W tym przypadku najwyższa lokalna wartość zredukowanych naprężeń Mises jest równe 32 MPa (ryc. 22a). Widoczne pęknięcia w ścianach komórkowych rdzenia są spowodowane małymi naprężeniami nie przekraczającymi 3 MPa. Dla belek PL(R) lokalne naprężenia niszczące wynoszą 26,2 MPa (ryc. 22b). Pęknięcia w okładzinach wykonanych z HDF zaczynają pojawiać się przy naprężeniach ok. 9,2 MPa, natomiast w przypadku okładzin tekturowych przy naprężeniach ok. 8,3 MPa (ryc. 22c i 22d). Zauważono, że uszkodzenia pojawiły się głównie w okładzinach dolnych. Dopóki nie było pęknięć w okładzinach, nie obserwowano pęknięć w rdzeniu.



Ryc. 22. Przykłady pęknięć w okładzinach i rdzeniu belek warstwowych: (a) PL(L), (b) PL(R), (c) HDF oraz (d) CA.



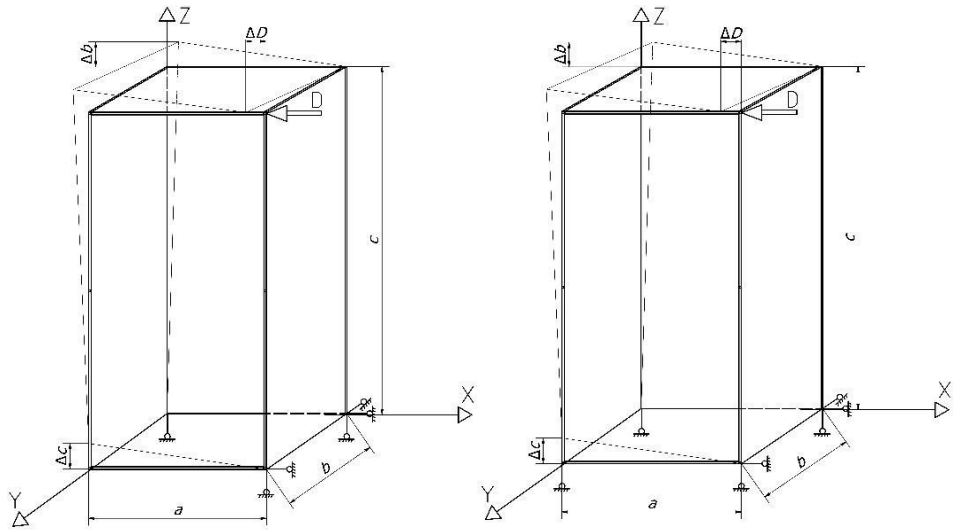
Ryc. 23. Ilość energii pochłoniętej (a) i rozproszonej (b) podczas zginania belek.

Na rycinie 23a pokazano, że wszystkie belki wykazują progresywną zdolność pochłaniania energii podczas zginania. Najlepszą zdolność pochłaniania energii wykazują belki z okładzinami HDF (2,223 J). Jednak belki ze sklejki PL(L) i PL(R) wykazują również stosunkowo dobre właściwości pochłaniania energii, odpowiednio 1,746 J i 1,380 J. W przypadku orientacji wzdłużnej włókien okładzin PL(L) pochłaniają one 21% energii więcej niż PL(R), gdy włókna są zorientowane prostopadle do długiej osi belki. Ta prawidłowość dobrze odpowiada relacji między wyższym modułem sprężystości dla PL(L) a mniejszym modułem sprężystości dla PL(R). Belki z okładzinami CA wykazują znacznie niższą zdolność pochłaniania energii (0,39 J). W porównaniu z HDF okładziny tego typu pochłaniają o 82% mniej energii. Rycina 23b pokazuje również zależność między energią rozproszenia w funkcji ugięcia belki. Podczas gięcia belek warstwowych odkształcenia na mikro-poziomie stają się nieodwracalnymi odkształceniami plastycznymi, co związane jest z rozpraszaniem energii. Uważa się to za główny czynnik powodujący uszkodzenia materiału i powstawanie mikropęknięć o charakterze zmęczeniowym. Zapisy zmian energii rozpraszania mogą być źródłem informacji o wystąpieniu uszkodzeń. Na tej podstawie można wykazać, że belki wykonane z okładzinami z HDF (0,0157 J) oraz PL(R) (0,0093 J) lub CA (0,0067 J) wykazywały mniejszą podatność na uszkodzenia w porównaniu z PL(L).

Biorąc to pod uwagę zaproponowano użycie PL(R) i CA do stworzenia warstwowych paneli komórkowych o synklastycznym kształcie.

Wyniki publikacji A.6. *Sztywność mebli skrzyniowych wykonanych z warstwowych paneli auksetycznych*

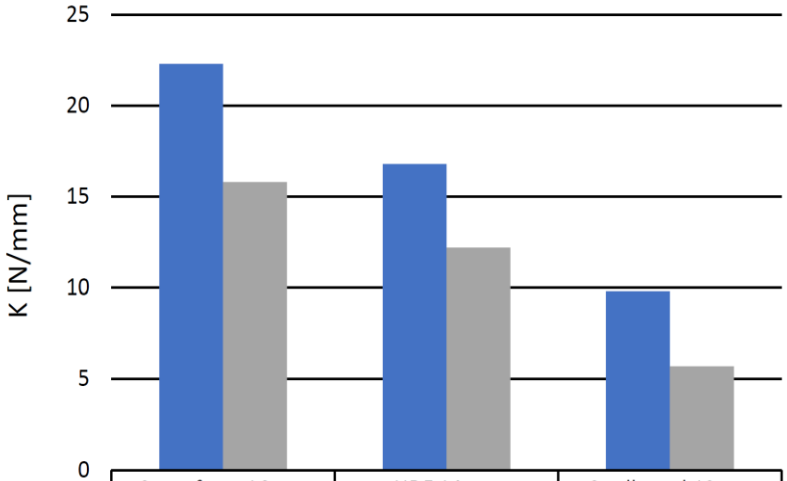
Celem badań było określenie wpływu zróżnicowanej grubości i rodzaju materiału w warstwach okładzinowych płyt komórkowych z rdzeniami auksetycznymi na sztywność mebli skrzyniowych. Do obliczenia sztywności mebli poddanych skręcaniu zastosowano metodę elementów skończonych. Model numeryczny skonstruowano stosując schemat podparcia i obciążenia mebli jak na rycinie 24.



a) b)

Ryc. 24. Schemat statyczny obciążenia mebla: a) podparcie w 3 punktach, b) podparcie w 4 punktach.

Wpływ zmian grubości i rodzaju materiału warstwy zewnętrznej na sztywność zginania K korpusu mebli skrzyniowych przedstawiono na ryc. 25. Wynika z niej, że korpusy mebli wykonane z płyt o grubości 16 mm z warstwą zewnętrzną wykonaną z sklejki Superform o grubości 3 mm charakteryzują się najwyższą sztywnością K od 15,8 N/mm dla 3-punktowego podparcia do 22,3 N/mm dla 4-punktowego podparcia. W przypadku zastosowania na okładziny tektury kartonowej o grubości 1 mm, korpusy mebli charakteryzują się sztywnością od 5,7 N/mm dla 3-punktowego podparcia do 9,8 N/mm dla 4-punktowego podparcia. Zarejestrowany wynik jest poniżej dopuszczalnej, bezpiecznej granicy sztywności mebli wyrażonej współczynnikiem K=10 N/mm.



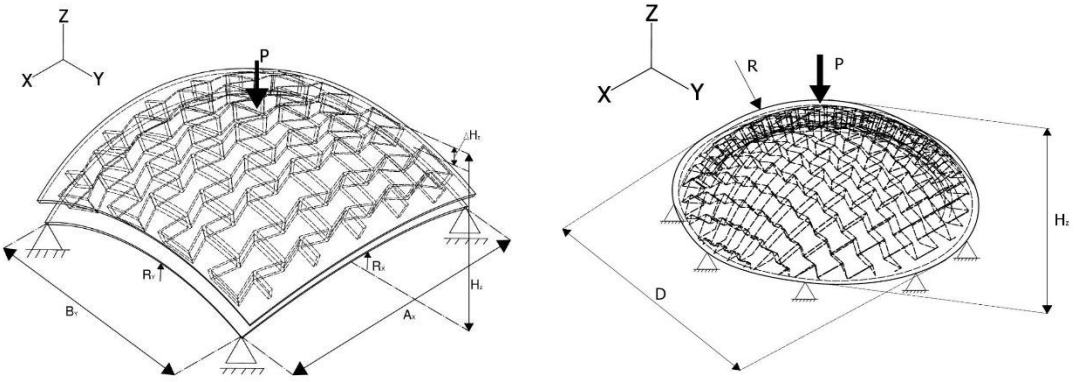
	Superform 16mm	HDF 14mm	Cardboard 12mm
4-point support	22,3	16,8	9,8
3-point support	15,8	12,2	5,7

Ryc. 25. Współczynniki sztywności badanych mebli skrzyniowych.

Na podstawie wyników analizy numerycznej wykazano, że przy wykorzystaniu tektury jako warstwy zewnętrznej płyty dla schematu podparcia 4-punktowego, wartość współczynnika sztywności można uznać jedynie jako zbliżoną do wartości granicznej. W przypadku zastosowania płyt komórkowych z okładzinami HDF i Superform wykazano zadowalającą sztywność mebli skrzyniowych. Udowodniono, że najlepszą konfiguracją dla korpusu mebla jest zastosowanie panelu z zewnętrznymi okładzinami ze sklejki Superform i rdzeniem WoodEpox® o łącznej grubości 16 mm. Ponad to wyniki badań pozwoliły także na ocenę sztywności płyty komórkowej w konstrukcjach skrzyniowych, pośrednio wskazując na dalsze rozwiązania odnośnie przygotowania modeli komórkowych płyt warstwowych z różnymi okładzinami.

Wyniki publikacji A.7. ***Sztywność synklastycznych, auksetycznych, drewnopochodnych płyt warstwowych***

Celem kolejnego etapu badań było opracowanie numerycznej metody określenia sztywności i wytrzymałości płyt komórkowych o powierzchni synklastycznej podczas jednoosiowego ściskania, podpartych na obwodzie lub punktowo w narożnikach (ryc. 26). Dodatkowo zaplanowano sposób pomiaru naprężenia w warstwie zewnętrznej i wewnętrznej płyty. Opracowana metodyka miała pozwolić na badanie sztywności synklastycznych, auksetycznych płyt warstwowych oraz określenie występowania naprężeń zredukowanych przy różnym sposobie podparcia płyt.



a) b)

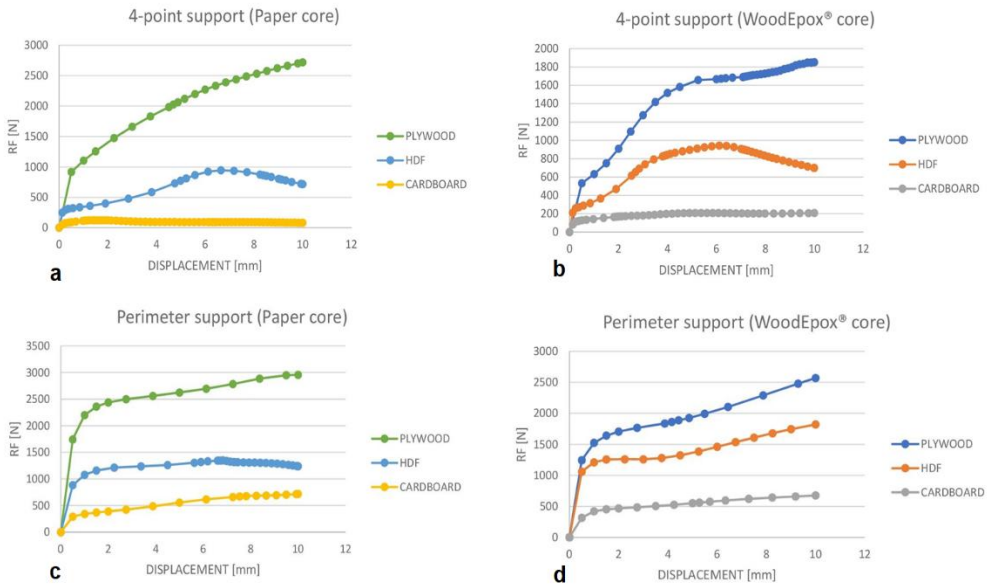
Ryc. 26. Synklastyczne płyty komórkowe podparte w narożnikach fragmentu sfery (a) oraz na obwodzie sfery (b).

Modelowanie przeprowadzono w programie Abaqus 6.13, stosując schematy pokazane na ryc. 26. Zestawienie materiałów rdzenia (WoodEpox oraz papier) i okładzin (Superform, HDF, tektura) przedstawiono w tabeli 8.

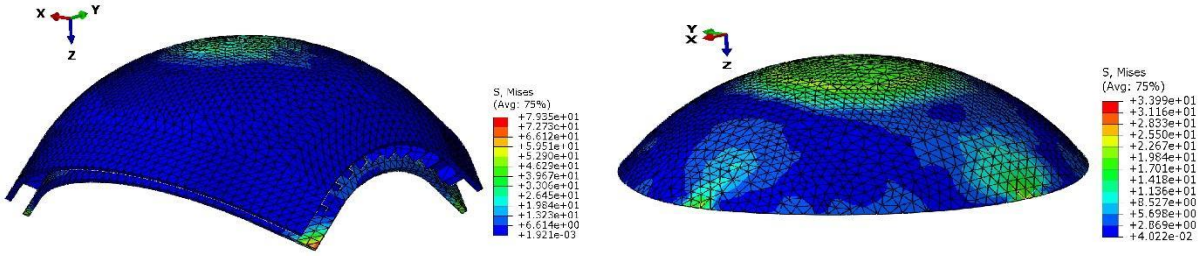
Tabela 8. Materiały użyte do modelowania struktur synklastycznych

	Unit	Thickness [mm]	MC [%]	Density [kg/m^3]	MOE [MPa]	MOR [MPa]
Superform Plywood 3.0mm	Average	3.10	6.15	350	6473	23.5
	SD	0.15	0.2	7	125	2.5
HDF 2.0mm	Average	2.05	5.9	870	6880	20.5
	SD	0.1	0.15	8	214	2.1
Cardboard 1.0mm	Average	1.02	5.84	615	2170	12
	SD	0.06	0.12	10	108	1.2
Abatron WoodEpox®	Average	4.51	6.12	430	1119	6.9
	SD	0.03	0.06	12	49	0.62
Paper	Average	0.15	5.88	123	5142	42
	SD	0.005	0.16	6	44	1.6

Zależność siły i przemieszczenia dla różnych typów struktur synklastycznych oraz ich odkształcenia przedstawiono na rycinie 27.



Ryc. 27. Zależność siły i przemieszczenia dla synklastycznych płyt komórkowych poddanych jednoosiowemu ściskaniu z rdzeniem papierowym (a,c) oraz rdzeniem WoodEpox® (b,d) podpartych 4-punktowo (a,b) i na obwodzie (c,d).



a) b)

Ryc. 28. Rozkład naprężeń zredukowanych Mises w okładzinach synklastycznych płyt komórkowych poddanych jednoosiowemu ściskaniu podpartych 4-punktowo (a) i na obwodzie (b).

W przypadku cztero-punktowego podparcia, panele z rdzeniem papierowym (ryc. 27a) wykazywały lepsze właściwości niż panele z rdzeniem WoodEpox® (ryc. 27b) dla okładzin ze sklejki i HDF. Najsztywniejszą konstrukcją była płyta komórkowa z okładziną ze sklejki i auksetycznym rdzeniem papierowym. Dla tego przypadku siła reakcji dla przemieszczenia 10 mm przekroczyła 2500 N. Najmniejszą sztywność uzyskano dla płyty z okładzinami tekturowymi i rdzeniem papierowym. Tu siła reakcji nie przekroczyła 125 N. Rdzeń wykonany z WoodEpox® poprawił sztywność paneli z okładzinami kartonowymi. Przy podparciu na obwodzie sfery, panele z rdzeniem papierowym (ryc. 27c) i okładzinami ze sklejki wykazywały lepszą sztywność niż panele z rdzeniem WoodEpox® (ryc. 27d) i nieco lepsze właściwości od paneli złożonych z okładzin kartonowych i rdzenia papierowego w porównaniu z panelami z rdzeniem WoodEpox ®. Najsztywniejszą była płyta komórkowa z okładzinami ze sklejki i auksetycznym rdzeniem papierowym. W tym przypadku siła wymuszająca przemieszczenie 10 mm osiągnęła wartość około 3000 N. Najmniejszą sztywność osiągnięto dla płyty z okładzinami tekturowymi i rdzeniem WoodEpox®. Tu siła reakcji osiągnęła wartość 675 N.

Jak pokazano na rycinie 28b, podparcie płyty komórkowej na obwodzie sfery zmniejsza efekt zgniatania krawędzi i umożliwia bardziej równomierne rozłożenie naprężeń wewnętrznych w okładzinach i rdzeniu. Dlatego przeprowadzone analizy numeryczne pozwoliły na zdeterminowanie sposobu wykonania próbek eksperymentalnych synklastycznych modeli płyt komórkowych z auksetycznym rdzeniem oraz optymalizację modeli numerycznych używanych do dalszych obliczeń.

Wyniki publikacji A.8. *Reakcja statyczna synklastycznego panelu warstwowego z auksetycznymi rdzeniami drewnopochodnymi poddawanego ściskaniu*

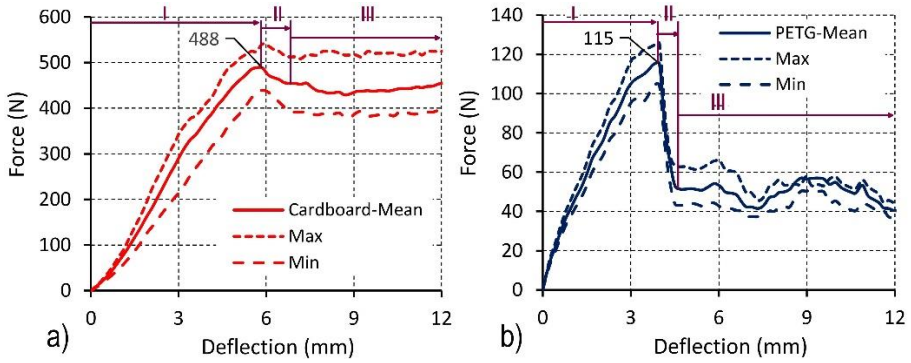
Celem badania była weryfikacja eksperymentalna i numeryczna nowych kompozytów wielowarstwowych o zaprojektowanym rdzeniu auksetycznym. Postawiono hipotezę, że rodzaj cienkich okładzin ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne synklastycznej płyty

warstwowej o właściwościach auksetycznych. Głównym celem pracy było określenie wpływu cienkich okładzin na sztywność, wytrzymałość, ilość pochłoniętej energii i uszkodzenia paneli poddanych osiowemu ściskaniu. Wykonano płyty drewnopochodne z auksetycznym rdzeniem o strukturze plastra miodu i synklastycznej powierzchni.

Kopuły wykonano z użyciem rdzenia o geometrii Z, wykonanego z WoodEpox, na materiały okładzinowe wytypowano tekturę oraz PETG jako materiał porównawczy. Weryfikacja użycia na okładziny materiałów jak Superform czy HDF przy dysponowanych możliwościach technologicznych, nie pozwoliła na sukcesywne uformowanie ich w struktury synklastyczne. Płyty synklastyczne oklejono tensometrami elektrooporowymi na ich wewnętrznej powierzchni. Badania laboratoryjne z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick1445 prowadzono z użyciem dedykowanej do krzywizny płyty napory oraz pozwalającej na podparcie obwodowe podpory.

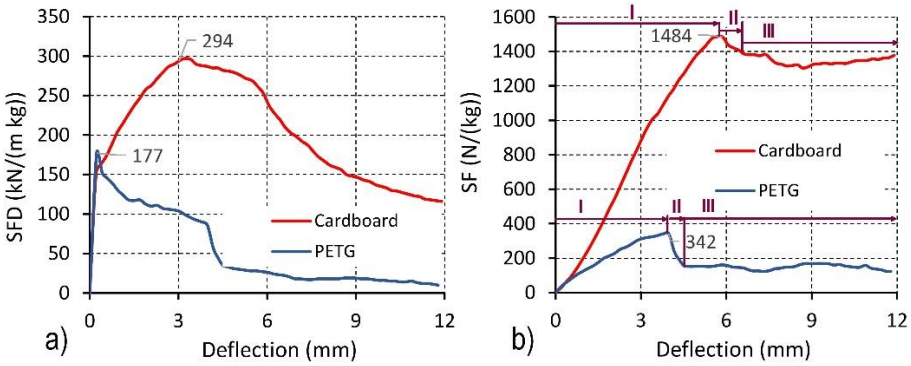
Wpływ okładziny na sztywność panelu

Na rycinie 29 przedstawiono zależność siły od ugięcia ściskanej synklastycznej płyty komórkowej. Zestawiono krzywe dla wartości maksymalnych, minimalnych oraz wartości średnich, które wykorzystano do porównania z wynikami obliczeń numerycznych. Przebiegi krzwych ilustrują trzy etapy ściskania sfery. Etap (I) wyróżnia się niemal liniowym przyrostem siły i ugięcia aż do osiągnięcia maksymalnej wartości siły niszczącej. Dla paneli z okładziną kartonową średnia wartość maksymalnej siły ściskającej była równa 488 N (Ryc.29a). Dla paneli z okładziną wykonaną z PETG odpowiednio 115 N, zatem tylko 23.5% poprzedniej wartości (Ryc. 29b). Ponieważ rdzenie obu konstrukcji były identyczne, głównym powodem zaistniałej różnicy jest różnica modułów sprężystości materiałów z których wykonano okładziny. Moduł sprężystości liniowej PETG stanowi jedynie 28.5% modułu sprężystości tektury. W tym etapie zaobserwowano trwałe uszkorzenia rdzenia, co opisano w dalszej części pracy. Po osiągnięciu maksymalnej siły ściskającej w obu przypadkach nastąpiło zmniejszanie jej wartości przy dalszym przyroście ugięcia (Etap II). Należy przy tym zauważyć, że dla panelu z okładziną kartonową spadek obciążenia jest równy 32 N co stanowi 6.5% wartości siły maksymalnej (Ryc. 29a). W przypadku paneli w których zastosowano okładzinę PETG Etap (II) kończy się wraz ze zmniejszeniem siły maksymalnej o 53.2% to jest o 61.2 N. W tym etapie zaobserwowano zmiany kształtu okładzin (Ryc. 31). Dalej ujawnia się Etap (III) w którym nieznaczne zmieniającym się wartościom sił towarzyszą duże przyrosty ugięcia. W celu określenia sztywności badanych synklastycznych płyt komórkowych, zmierzone siły i ugięcia postanowiono odnieść do masy paneli.



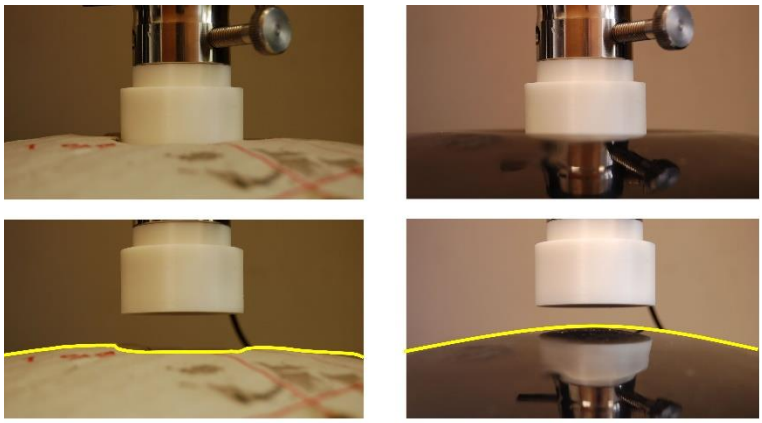
Ryc. 29. Sztywność paneli synklastycznych poddanych ściskaniu: a) tektura, b) PETG

Na rycinie 30a przedstawiono zmienność Specific Force-Deflection SFD (kN/(m kg)) w zależności od ugięcia paneli. Charakterystyczne jest to, że dla pierwszych milimetrów ugięcia sfer ($f \ll 1$ mm), ich sztywności względne są bardzo zbliżone (SFD = 145 kN/(m kg)). Następnie sztywność względna dla paneli z okładziną kartonową wyraźnie asymptotycznie wzrasta aż do wartości SFD = 294 kN/(m kg), i dalej maleje osiągając ostatecznie wartość 116 kN/(m kg). Dla paneli z okładzinami PETG zmiana SFD jest istotnie odmienna. Po nagłym osiągnięciu wartości 177 kN/(m kg) współczynnik SFD maleje osiągając warość 11 kN/(m kg) dla ugięcia $f = 12$ mm. Na rycinie 30b przedstawiono natomiast zmiany specific force SF w zależności od narastającego ugięcia paneli. W tym przypadku uwidacznia się znacząca większa sztywność paneli z kartonu niż z PETG. Specific force dla płyt z okładzinami kartonowymi jest o 77% większa w porównaniu do paneli z okładzinami wykonanymi z PETG. Także i tu można zaobserwować trzy etapy zmiany współczynnika SF. W Etapie (I) zniszczeniu ulega komórkowy rdzeń, zaś w Etapie (II) wyraźnie zmienia się kształt okładziny w miejscu przyłożenia siły (Fig. 31).



Ryc. 30. Charakterystyki siły właściwej-ugięcia (a) i siły właściwej (b) w stosunku do ugięcia paneli synklastycznych.

Na rycinie 31a widać kształt okładziny kartonowej bezpośrednio po osiągnięciu siły maksymalnej, a następnie po ustąpieniu obciążenia. Widoczne jest trwałe zdeformowanie wywołane uszkodzeniem rdzenia oraz przegięciem okładziny w miejscu przyłożenia obciążenia. W tym przypadku rzeczywisty r_p zmierzony po stronie dolnej okładziny był równy 53 mm. Uzyskana postać deformacji wyraźnie ilustruje, że najpierw w Etapie (I) nastąpiło trwałe uszkodzenie rdzenia a następnie w Etapie (II) trwałe odkształecnie okładziny. W przypadku zastosowania PETG, dla maksymalnej siły niszczącej także nastąpiło wgniecenie okładziny w miejscu przyłożenia crosshead (Ryc. 31b). Jednak różnica w stosunku do poprzedniego wariantu panelu polega na tym, że po ustaniu obciążenia, zarówno górna jak i dolna okładzina powróciła do kształtu jak przed obciążeniem. Nie udało się tym samym zmierzyć promienia r_p.



a) b)

Ryc. 31. Różnice w odkształceniach po ściskaniu: a) tektura, b) PETG

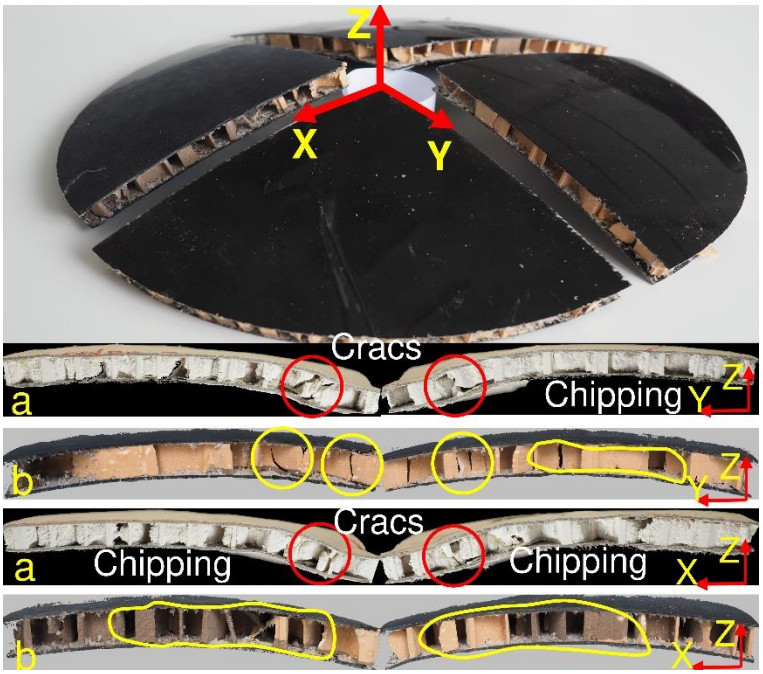
W literaturze nie odszukano analogicznych lub zbliżonych wyników badań ściskania drewnopochodnych synklastycznych płyt komórkowych z auksetycznym rdzeniem. Dlatego postanowiono odnieść się do przykładów ściskania metalowych płyt warstwowych o podwójnej krzywiźnie. W pracy Stein-Montalvo i in. 2019, przedstawiono innowacyjny, zhomogenizowany model do badań dynamicznych podwójnie zakrzywionych płyt warstwowych z rdzeniem o strukturze plastra miodu. Strukturalny kształt modelu kontinuum został opisany w oparciu o krzywoliniowy układ odniesienia głównych współrzędnych. Niestety w tej pracy nie przedstawiono charakterystyki efektu przeskoku siły i ugięcia kuli pod obciążeniem. W badaniach Gorodtsov i Lisovenko (2019) nad ściskaniem sferycznej trzywarstwowej płyty nie zaobserwowano analogicznego efektu przeskoku siły (no snap-trough effect) jak na rycinie 29. Autorzy wyjaśniają to dużą sztywnością przy zginaniu materiału okładzin (70 GPa) i niewielką sztwynością materiału rdzenia (0.7 GPa). Dlatego globalne zachowanie przy obciążeniu i ugięciu sfer pozostało stabilne w rozważanym zakresie. Niemniej jednak charakterystyka relacji siły i ugięcia rozwija się progresywnie, jeśli grubość rdzenia maleje. To tłumaczy, dlaczego w niniejszej pracy przeskok sił (no snap-trough effect) został zaobserwowany. Różnica wartości modułów sprężystości tektury (2119 MPa) i PETG (604 MPa) w stosunku do materiału rdzenia (1045 MPa) jest równa odpowiednio 102% i -42%.

Wpływ okładziny na wytrzymałość płyt warstwowych

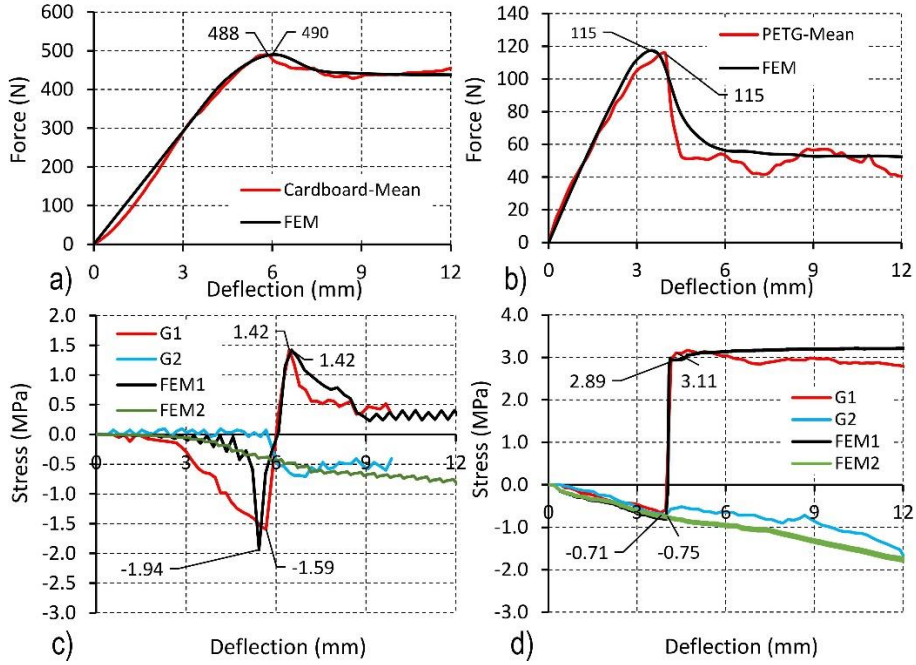
Wpływ okładzin na wytrzymałość płyt komórkowych zdecydowano określić przez porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Najpierw dokonano obserwacji uszkodzeń zewnętrznych i wewnętrznych powstałych podczas badań i uwidocznionych po ich zakończeniu. W tym celu sferyczne płyty komórkowe rozpiłowano wzdłuż prostopadłych średnic uzyskując cztery równe części (Ryc. 32). Przedstawione na rycinie 32a obrazy przekrojów ilustrują zarówno uszkodzenia rdzenia jak i trwałe odkształcenie kartonowych okładzin w płaszczyznach XZ oraz YZ. W pobliżu miejsca przegięcia okładzin widoczne są wyraźne pęknięcia materiału rdzenia i jego ubytki. Z ryciny 32b wynika natomiast, że uszkodzenia struktury rdzenia pokrytego okładziną PETG podobne są do pęknięć sfer kartonowych z tym, że w pewnej odległości od miejsca przyłożenia obciążenia widoczne są odpryski i ubytki materiału rdzenia wywołane wcześniejszym jego pękaniem. Znacząca różnica występuje także w postaci deformacji okładziny. W tym przypadku nie zaobserwowano trwałych odkształceń okładzin PETG

po ustąpieniu obciążenia. Taki charakter sprężystego odkształcenia okładzin spowodował również większe ubytki materiału rdzenia w porównaniu do konstrukcji z okładziną tekturową. Powodem tego było naruszenie połączeń adhezyjnych okładzin i rdzenia podczas gdy połączenia adhezyjne kartonu i rdzenia nie zostały uszkodzone w tak znaczącym stopniu. Dalsze rozważania postanowiono oprzeć na wynikach obliczeń numerycznych.

W pierwszej kolejności sprawdzono poprawność obliczeń numerycznych przez nałożenie krzywych siła-ugięcie wykreślonych na podstawie wartości średnich z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych (Ryc. 33a,b). Na podstawie podobieństwa przebiegów obu krzywych uznano, że przygotowany model numeryczny został poprawnie skalibrowany. Dlatego też na rycinie 33 c,d zamieszczono zmianę naprężeń normalnych zarejestrowanych przez tensometry G1 i G2 oraz naprężeń ustalonych numerycznie w analogicznych punktach pomiarowych.



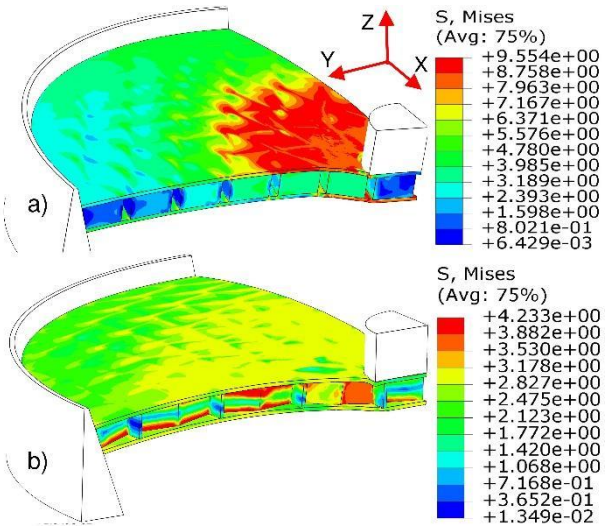
Ryc. 32. Sferyczna próbka podzielona na cztery równe wycinki: a) tektura, b) PETG.



Ryc. 33. Porównanie wyników eksperymentu i obliczeń numerycznych: a,c) tektura, b,d) PETG, a,b) sztywność, c,d) naprężenia w punktach G1 i G2.

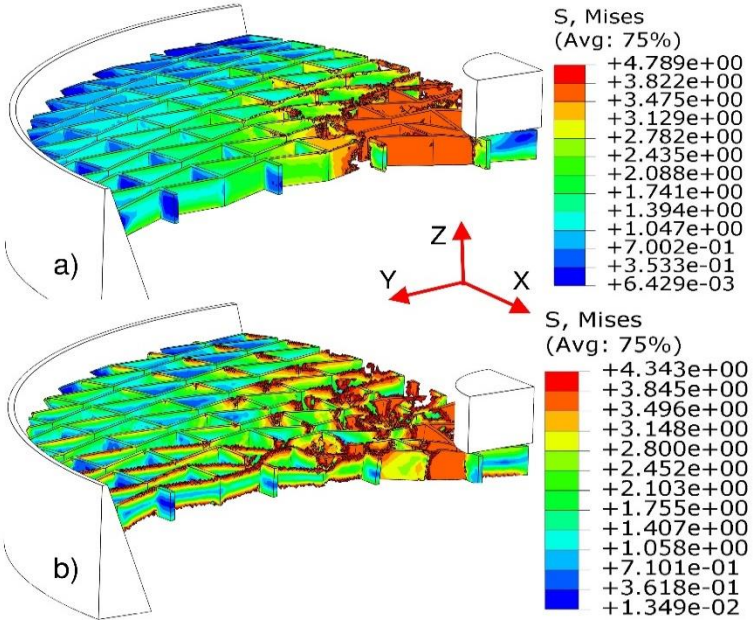
Na rycinie 33c wyraźnie widać, że obliczone numerycznie naprężenia normalne w okładzinie kartonowej, wystarczająco poprawnie pokrywają się z naprężeniami zmierzonymi eksperymentalnie. Widoczny jest przeskok naprężeń dla ugięcia równego około 6 mm, to jest w miejscu dla którego obciążenie osiągnęło wartość maksymalną (Ryc. 29a). Do chwili osiągnięcia siły maksymalnej, naprężenia ściskające w dolnej okładzinie płyty komórkowej w punkcie pomiarowym G1 miały wartość -1.59 MPa (-1.94 MPa FEM). Następnie po przekroczeniu maksymalnego obciążenia sfera doznała przegięcia i naprężenia zmieniły charakter na rozciągające o wartości 1.42 MPa (1.42 MPa FEM). W punkcie pomiarowym G2, od samego początku testu, naprężenia miały charakter ściskający. Zbliżone prawidłowości zaobserwowano także podczas ściskania płyty komórkowej z okładziną PETG (Ryc. 33d). W tym przypadku przeskok siły nastąpił dla ugięcia równego około 4 mm, to jest w miejscu dla którego obciążenie osiągnęło wartość maksymalną (Ryc. 29b). Do chwili osiągnięcia siły maksymalnej, naprężenia ściskające w dolnej okładzinie płyty komórkowej w punkcie pomiarowym G1 miały wartość -0.71 MPa (-0.75 MPa FEM). Dalej po przekroczeniu maksymalnego obciążenia płyta doznała przegięcia i naprężenia zmieniły charakter na rozciągające o wartości 3.11 MPa (2.89 MPa FEM).

Rozkład naprężeń zredukowanych w płytach poddanych ściskaniu siłą o maksymalnej wartości zilustrowano na rycinie 34. Jak widać maksymalne naprężenia o wartości 9.55 MPa występują w okładzinach kartonowych w pobliżu miejsca przyłożenia napory (Ryc. 34a). Widoczne jest także i to, że największe naprężenia zredukowane w rdzeniu osiągają wartość 4.78 MPa. Dla płyt z okładzinami PETG analogiczne naprężenia w okładzinie nie przekraczają 2.83 MPa, zaś w rdzeniu są równe 4.23 MPa (Ryc. 34b). Zatem zarówno w przypadku okładzin kartonowych jak i okładzin z PETG nie wykazano naprężeń większych niż wytrzymałość materiałów na rozciąganie. W rdzeniu naprężenia osiągnęły jednak wartości większe od dopuszczalnych o 13.6% i 0.5% odpowiednio dla konstrukcji z okładzinami tekturowymi i PETG. To wyjaśnia dlaczego zniszczenia synklastycznych płyt komórkowych następowały w rdzeniu.

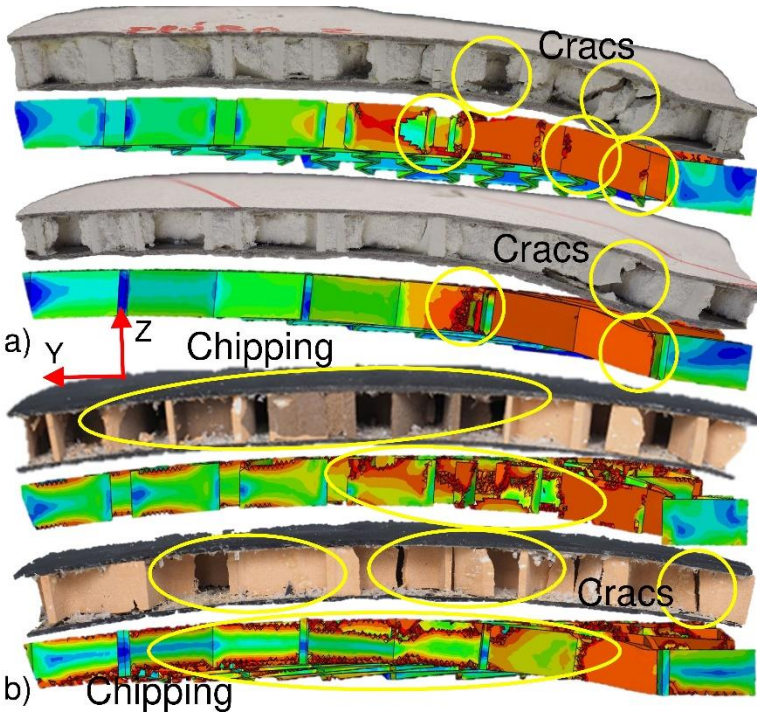


Ryc. 34. Rozkład zredukowanych naprężęń Misesa: a) tektura, b) PETG

Dodatkowo na rycinie 35 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w rdzeniach badanych płyt komórkowych. Z ryciny 35a wynika, że główne uszkodzenia rdzenia występują w pobliżu napory naciskającej na tekturową okładzinę. Wartość naprężeń niszczących jest równa 4.78 MPa, a uszkodzenia w rdzeniu mają charakter pęknięć, co zilustrowano także na rycinie 36a. W przypadku paneli z okładzinami PETG, maksymalne naprężenia zredukowane mają wartość 4.34 MPa i występują na większej powierzchni rdzenia. Można również zauważyć, że zniszczenia występują głównie w górnych warstwach ścian komórkowych przylegających do powierzchni okładziny. To właśnie tłumaczy dlaczego w przypadku tego rodzaju konstrukcji pojawiły się liczne odpryski i ubytki materiału rdzenia. Zjawisko to dodatkowo zilustrowano na rycinie 36b. Wpływ na taki rodzaj uszkodzenia rdzenia ma również sposób uginania się okładzin płyty komórkowej. W tym przypadku maksymalne ugięcie i powrót do niemal pierwotnego kształtu płyty komórkowej po ustąpieniu obciążenia, powoduje uszkodzenia przyokładzinowych warstw rdzenia i jego widoczne ubytki w części środkowej płyty komórkowej.



Ryc. 35. Rozkład naprężeń zredukowanych Misesa w rdzeniu: a) tektura, b) PETG

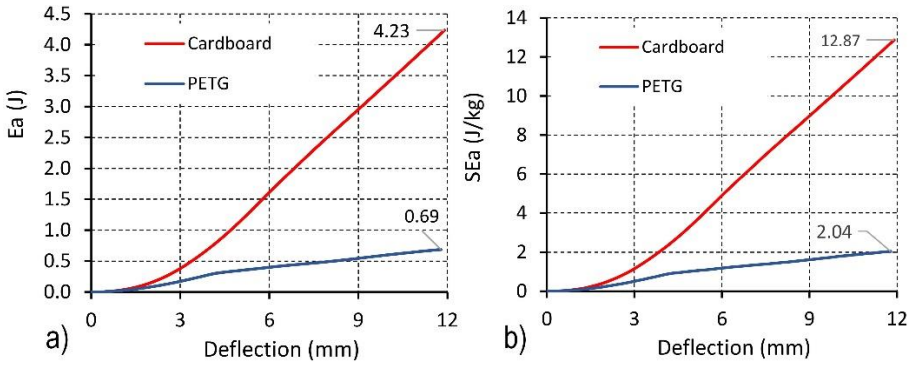


Ryc. 36. Uszkodzenie rdzenia: a) tektura, b) PETG

Ponieważ ugięcie paneli z okładzinami tekturowymi miało charakter odkształcenia trwałego, na rycinie 36a nie jest widoczny znaczący ubytek masy rdzenia w części środkowej. Na tej podstawie można sformułować istotne spostrzeżenie, że okładziny o małym module sprężystości liniowej umożliwiają synklastycznym płytom komórkowym sprężyste odkształcenia po ustaniu obciążenia zewnętrznego jednak sprzyjają znaczącym uszkodzeniom rdzenia. Natomiast okładziny o dużym module sprężystości liniowej powodują, że odkształcenia synklastycznych płyt komórkowych są trwałe po ustaniu obciążenia zewnętrznego przy czym nie powodują znaczącego uszkodzenia struktury rdzenia.

Wpływ typu okładzin na absorpcję energii

Na podstawie badań eksperymentalnych określono także zdolność badanych płyt komórkowych do absorbowania energii. Z ryciny 37a wynika, że płyty z kartonową okładziną pochłaniają 6.1 razy więcej energii (4.23 J) w porównaniu do płyt z okładziną PETG (0.69 J). Widać także, że ilość absorbowanej energii wyraźnie liniowo wzrasta z chwilą ugięcia płyty o około 3 mm, to jest wówczas kiedy współczynnik SFD przekroczy wartość 294 kN/(m kg) (Ryc. 30a). Podobne zależności zaobserwowano w przypadku oceny specific energy absorption SEa (Ryc. 37b). Płyty z kartonową okładziną wykazują 6.3 razy większy współczynnik SEa energii (12.87 J/kg) w porównaniu do płyt z okładziną PETG (2.04 J/kg).



Ryc. 37. Ilość energii absorbowanej przez panele

Z przeglądu literatury wynika, że stosowanie okładzin o wysokiej sztywności istotnie poprawia zdolność płyt komórkowych do absorbowania energii, zmniejsza poziomem naprężeń, deformacji i obszaru uszkodzeń, przy jednoczesnym utrzymywaniu większej maksymalnej siły uderzenia (Rad i in. 2014, Novak i in. 2020, Tarlochan 2021, Easey i in. 2019, Lan i in. 2020, Tornabene i in. 2021). Przedstawione rozwiązania konstrukcyjne wskazują na lepsze właściwości synklastycznych płyt komórkowych których okładziny wykonano z kartonu.

3.4. Podsumowanie

Dzięki osiągnieciu wszystkich punktów założonych w celu pracy, niniejsza rozprawa pozwoliła na weryfikację postawionych hipotez badawczych. Wykazano, że imperfekcje kształtu komórek mają wpływ na ich stałe sprężystości w kontekście obliczeń analitycznych, powinny być zatem implementowane w przypadku wykonywania analiz.

Komórki o geometrii re-entrant w porównaniu do konwencjonalnych heksagonów, okazały się interesującym materiałem o auksetycznych właściwościach, który poddano ocenie wpływu modyfikacji wymiarów geometrycznych na właściwości mechaniczne projektowanych struktur. Wykorzystanie metody Monte-Carlo do optymalizacji funkcji celu pozwoliło na uzyskanie parametrów komórek o istotnie lepszych właściwościach w porównaniu do modelowania w oparciu o gęstość względną komórki, jednak biorąc pod uwagę techniczną wykonalność prototypów projektowanych struktur, parametry materiałów użytych do ich wykonania, takie jak grubość ściany komórkowej, zaproponowano wprowadzić ten właśnie czynnik, jako jeden z warunków brzegowych określających funkcję celu. Efektem tych prac, było stworzenie geometrii komórki, wykonalnej dla materiału WoodEpox. Dobrano i przebadano również materiały okładzin nowo projektowanych struktur tak, aby wykonywane struktury były w całości wykonane z materiałów drewnopochodnych.

Wykazano również, że dla stałej gęstości względnej, geometria auksetycznych komórek typu re-entrant ma znaczący wpływ na sztywność oraz wytrzymałość warstwowych płyt meblowych oraz, że dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re-entrant okładziny o powierzchni płaskiej decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej.

Istotnym z perspektywy modelowania okazała się i w tym przypadku implementacja imperfekcji geometrycznych, któree pozwoliły na uzyskanie możliwie zbliżonych modeli projektowanych struktur z rzeczywistymi. Pozwoliło to na zaprojektowanie struktur w postaci belek, płyt, form synklastycznych, a nawet bardziej złożonych układów, opartych o konstrukcję skrzyniową oraz ocenę ich parametrów.

Wykazano, że dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re- entrant okładziny o synklastycznej powierzchni decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej.

W pracy z sukcesem osiągnięto i przebadano struktury synklastyczne, te zamodelowano również numerycznie, aby zweryfikować poprawność przeprowadzonych eksperymentów. Zbadano zdolność tych struktur do pochłaniania energii, a także rozkład naprężeń w strukturze rdzenia i okładzin.

Wyniki badań wykazały istotny wpływ rodzaju okładziny na sztywność, wytrzymałość, zdolność do pochłaniania energii oraz uszkodzenia rdzenia paneli synklastycznych. Ponadto rodzaj okładziny determinował rozkład naprężeń w rdzeniu i odkształcenie obciążonego obszaru. Próbki z okładzinami tekturowymi wykazywały ugięcie plastyczne charakteryzujące się ugięciem okładzin górnych i dolnych w miejscu obciążenia naporą. Panel ustąpieniu obciążenia nie powrócił do podobnego kształtu jak przed obciążeniem. W przypadku okładzin wykonanych z PETG, próbki wykazywały ugięcie sprężyste. Po zdjęciu obciążenia panel wrócił do podobnego kształtu jak pierwotnie. Próbki z okładzinami PETG sprzyjają znacznemu uszkodzeniu rdzenia. Panele kartonowe są znacznie sztywniejsze niż te wykonane z PETG.

Oba testowane kompozyty w połączeniu z właściwościami auksetycznymi rdzenia są łatwe w produkcji i dalszemu przetwarzaniu. Konstrukcje te mogą być stosowane w różnych aplikacjach przemysłowych. Dalsze badania powinny koncentrować się na opracowywaniu różnych materiałów i geometrii komórek rdzenia. Ważne jest również, aby rozszerzyć zakres badań o nowe kombinacje materiałów okładzin.

4. Literatura

1. Rupani, S.V.; Jani, S.S.; Acharya, G.D. Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review. Int. J. Sci. Dev. Res. 2017, 2, 526–532.
2. Marsh, G.; Jacob, A. Trends in marine composites. Reinf. Plast. 2007, 51, 22–27.
3. Cunningham, P.R.; White, R.G. Free vibration of doubly curved composite honeycomb rectangular sandwich panels. In Proceedings of the IMACXVII: 17th International Modal Analysis Conference, Bellingham, WA, USA, 8–11 February 1999; pp. 65–71.
4. Cunningham P. R., White R. G., Aglietti G. S. (2000). The Effects of Various Design Parameters on the Free Vibration of Doubly Curved Composite Sandwich Panels. Journal of Sound and Vibration (Vol. 230, Issue 3), p. 617-648.
5. Negro, F.; Cremonini, C.; Zanuttini, R.; Properzi, M. A new wood-based lightweight composite for boatbuilding. Wood Res. 2011, 56, 257–266.
6. Prucz, J.C.; Shoukry, S.N.;William, G.W.; Shoukry, M.S. Lightweight Composite Materials for Heavy Duty Vehicles; West Virginia University: Morgantown, WV, USA, 2013.
7. Jen, Y.; Chang, L. Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters. Int. J. Fatigue 2008, 30, 1103–1114.
8. Chang, C.C.; Ebcioglu, I.K. Efect of cell geometry on the shear modulus and on density of sandwich panel cores. J. Basic Eng. 1961, 83, 513–517.
9. Smardzewski, J. Elastic properties of cellular wood panels with hexagonal and auxetic cores. Holzforschung 2013, 67, 87–92.
10. Smardzewski, J. Mechanical properties of wood-based sandwich panels with a wavy core. In Proceedings of the XXVII International Conference Research for Furniture Industry, Ankara, Turkey, 17–18 September 2015; pp. 242–255.
11. Bitzer, T.N. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing; Springer Science & Business Media: London, UK, 1997.
12. Pour, N.; Itzhaki, L.; Hoz, B.; Altus, E.; Basch, H.; Hoz, S. Auxetics at the molecular level: A negative Poisson's ratio in molecular rods. Angew. Chem. Int. Ed. 2006, 45, 5981–5983.
13. Alderson, A.; Alderson, K. Auxetic materials. Int. J. Trends Eng. Technol. 2007, 5, 156–160.
14. Gibson, L.J.; Ashby, M.F. Cellular Solids: Structure and Properties; Cambridge University Press: London, UK, 1999.
15. Smardzewski, J. Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells. Mater. Des. 2019a, 183, 108159.
16. Smardzewski, J.Wooden sandwich panels with prismatic core–Energy absorbing capabilities. Compos. Struct.2019b, 230.
17. Peliński, K.; Smardzewski, J. Experimental testing of elastic properties of paper and WoodEpox® in honeycomb panels. Bioresources 2019, 14, 2977–2994.
18. Pflug, J.; Vangrimde, B.; Verpoest, I.; Vandepitte, D.; Britzke, M.; Wagenführ, A. Continuously produced paper honeycomb sandwich panels for furniture applications. In Proceedings of the 5th GlobalWood Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, Germany, 27–28 April 2004; pp. 1–9.
19. Smardzewski, J.; Jasińska, D. Mathematical models and experimental data for HDF based sandwich panels with dual corrugated lightweight core. Holzforschung 2016, 71, 265–273.
20. Smardzewski, J.; Majewski, A. Mechanical properties of auxetic honeycomb core with triangular cells. In Proceedings of the 25th International Scientific Conference, New Materials and Technologies in the Function of Wooden Products, Zagreb, Croatia, 16 October 2015; pp. 103–112.
21. Klimek, P.;Wimmer, R.; Brabec, M.; Sebera, V. Novel sandwich panel with interlocking plywood Kagome lattice core and grooved particleboard facings. Bioresources 2016, 11, 195–208.
22. L. Stein-Montalvo, P. Costa, M. Pezzulla, D.P. Holmes, Buckling of geometrically confined shells, Soft Matter. 15 (2019) 1215–1222. https://doi.org/10.1039/C8SM02035C.

23. V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko, Extreme values of Young's modulus and Poisson's ratio of hexagonal crystals, Mech. Mater. 134 (2019) 1–8. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.03.017.
24. M. Shokri Rad, Y. Prawoto, Z. Ahmad, Analytical solution and finite element approach to the 3D re-entrant structures of auxetic materials, Mech. Mater. 74 (2014) 76–87. 10.1016/j.mechmat.2014.03.012.
25. N. Novak, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, M. Vesenjak, Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures, Mech. Mater. 148 (2020) 103524. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103524.
26. F. Tarlochan, Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review, Mater. 14 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14164731.
27. N. Easey, D. Chuprynyuk, W.M.S.W. Musa, A. Bangs, Y. Dobah, A. Shterenlikht, F. Scarpa, Dome-Shape Auxetic Cellular Metamaterials: Manufacturing, Modeling, and Testing , Front. Mater. 6 (2019) 86. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmats.2019.00086.
28. X. Lan, Q. Huang, T. Zhou, S. Feng, Optimal design of a novel cylindrical sandwich panel with double arrow auxetic core under air blast loading, Def. Technol. 16 (2020) 617–626. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.09.010.
29. F. Tornabene, M. Viscoti, R. Dimitri, M.A. Aiello, Higher order formulations for doubly-curved shell structures with a honeycomb core, Thin-Walled Struct. 164 (2021) 107789. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107789.

5. Streszczenia - w języku polskim i angielskim

PL

Celem pracy było określenie wpływu okładzin na sztywność i wytrzymałość warstwowych płyt meblowych o powierzchni synklastycznej i z auksetycznym rdzeniem.

Ponadto celem pracy było określenie wpływu długości i kąta pochylenia ścian auksetycznych komórek typu re-entrant o stałej gęstości względnej na ich stałe sprężystości, a także ich wpływ na stałe sprężyste płaskich warstwowych płyt meblowych. Dalszym poznawczym celem badań było określenie wpływu jaki wywiera zmiana gęstości oraz sztywności okładzin na wytrzymałość oraz sztywność warstwowych płyt meblowych. Celem pracy było także wyjaśnienie wpływu imperfekcji geometrycznych na jakości wyników obliczeń analitycznych stałych sprężystości komórek typu re-entrant.

Dzięki osiągnieciu wszystkich punktów założonych w celu pracy, niniejsza rozprawa pozwoliła na weryfikację postawionych hipotez badawczych. Wykazano, że imperfekcje kształtu komórek mają wpływ na ich stałe sprężystości w kontekście obliczeń analitycznych, powinny być zatem implementowane w przypadku wykonywania analiz. Komórki o geometrii re- entrant w porównaniu do konwencjonalnych heksagonów, okazały się interesującym materiałem o auksetycznych właściwościach, który poddano ocenie wpływu modyfikacji wymiarów geometrycznych na właściwości mechaniczne projektowanych struktur. Wykorzystanie metody Monte-Carlo do optymalizacji funkcji celu pozwoliło na uzyskanie parametrów komórek o istotnie lepszychwłaściwościach w porównaniu do modelowania w oparciu o gęstość względną komórki, jednak biorąc pod uwagę techniczną wykonalność prototypów projektowanych struktur, parametry materiałów użytych do ich wykonania, takie jak grubość ściany komórkowej, zaproponowano wprowadzić ten właśnie czynnik, jako jeden z warunków brzegowych określających funkcję celu. Efektem tych prac, było stworzenie geometrii komórki, wykonalnej dla materiału WoodEpox. Dobrano i przebadano również materiały okładzin nowo projektowanych struktur tak, aby wykonywane struktury były w całości wykonane z materiałów drewnopochodnych. Wykazano również, że dla stałej gęstości względnej, geometria auksetycznych komórek typu re-entrant ma znaczący wpływ na sztywność oraz wytrzymałość warstwowych płyt meblowych oraz, że dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re-entrant okładziny o powierzchni płaskiej decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej. Istotnym z perspektywy modelowania okazała się i w tym przypadku implementacja imperfekcji geometrycznych, któree pozwoliły na uzyskanie możliwie zbliżonych modeli projektowanych struktur z rzeczywistymi. Pozwoliło to na zaprojektowanie struktur w postaci belek, płyt, form synklastycznych, a nawet bardziej złożonych układów, opartych o konstrukcję skrzyniową oraz ocenę ich parametrów. Wykazano, że dla stałych parametrów geometrycznych auksetycznych komórek typu re-entrant okładziny o synklastycznej powierzchni decydują o wytrzymałości komórkowej płyty meblowej. W pracy z sukcesem osiągnięto i przebadano struktury synklastyczne, te zamodelowano również numerycznie, aby zweryfikować poprawność przeprowadzonych eksperymentów. Zbadano zdolność tych struktur do pochłaniania energii, a także rozkład naprężeń w strukturze rdzenia i okładzin. Wyniki badań wykazały istotny wpływ rodzaju okładziny na sztywność, wytrzymałość, zdolność do pochłaniania energii oraz uszkodzenia rdzenia paneli synklastycznych. Ponadto rodzaj okładziny determinował rozkład naprężeń w rdzeniu i odkształcenie obciążonego obszaru. Próbki z okładzinami tekturowymi wykazywały ugięcie plastyczne charakteryzujące się ugięciem okładzin górnych i dolnych w miejscu obciążenia naporą. Panel ustąpieniu obciążenia nie powrócił do podobnego kształtu jak przed obciążeniem. W przypadku okładzin wykonanych z PETG, próbki wykazywały ugięcie sprężyste. Po zdjęciu obciążenia panel wrócił do podobnego kształtu jak pierwotnie.

Próbki
z okładzinami PETG sprzyjają znacznemu uszkodzeniu rdzenia. Panele kartonowe są znacznie sztywniejsze niż te wykonane z PETG.

Oba testowane kompozyty w połączeniu z właściwościami auksetycznymi rdzenia są łatwe w produkcji i dalszemu przetwarzaniu. Konstrukcje te mogą być stosowane w różnych aplikacjach przemysłowych. Dalsze badania powinny koncentrować się na opracowywaniu różnych materiałów i geometrii komórek rdzenia. Ważne jest również, aby rozszerzyć zakres badań o nowe kombinacje materiałów okładzin.

ENG

The aim of the study was to determine the effect of the type of outer layers on the stiffness and strength of laminated furniture panels with a synclastic surface and an auxetic core.

Moreover, the aim of the study was to determine the effect of the length and angle of inclination of the auxetic walls of the re-entrant cells with a constant relative density on their elasticity constants, as well as their influence on the elastic constants of flat layered furniture panels. A further exploratory goal of the research was to determine the effect of the change in the density and stiffness of outer layers on the strength and stiffness of laminated furniture panels. The aim of the work was also to explain the influence of geometrical imperfections on the quality of the analytical results of the re-entrant cell elasticity constants.

Thanks to the achievement of all the points assumed for the purpose of the work, this dissertation allowed for the verification of the research hypotheses. It has been shown that cell shape imperfections affect their elasticity constants in the context of analytical calculations, therefore they should be implemented when performing analyzes. Cells with re-entrant geometry, compared to conventional hexagons, turned out to be an interesting material with auxetic properties, which was subject to evaluation of the influence of modification of geometrical dimensions on the mechanical properties of the designed structures. The use of the Monte-Carlo method to optimize the objective function allowed to obtain cell parameters with significantly better properties compared to modeling based on the relative cell density, however, taking into account the technical feasibility of prototypes of the designed structures, the parameters of the materials used for their production, such as the thickness of the cell wall, it was proposed to introduce this factor as one of the boundary conditions determining the objective function. The result of this work was the creation of a cell geometry workable for WoodEpox material. The materials of the outer layer of the newly designed structures were also selected and tested so that the structures were made in total from wood-based materials. It has also been shown that for a constant relative density, the geometry of the auxetic re-entrant cells has a significant impact on the stiffness and strength of layered furniture panels, and that for constant geometric parameters of the auxetic re-entrant cells, outer layers determine the strength of the furniture board. From the modeling perspective, the implementation of geometric imperfections turned out to be important, as it allowed for obtaining possibly similar models of the designed structures to the real ones. This allowed structures to be designed in the form of beams, panels, synclastic forms, and even more complex systems based on a case furniture structure and to assess their parameters. It has been shown that for constant geometrical parameters of the auxetic re- entrant cells, the synclastic surface of outer layer determine the strength of the furniture board. Synclastic structures were successfully tested and also modeled numerically to verify the correctness of the experiments. The ability of these structures to absorb energy was examined, as well as the distribution of stresses in the structure of the core and facings. The test results showed a significant effect of the type of facing on the stiffness, strength, ability to absorb energy

and damage to the core of synclastic panels. Moreover, the type of facing determined the stress distribution in the core and the deformation of the loaded area. The samples with cardboard as outer layers showed a plastic deflection characterized by deflection of the upper and lower facings at the point of pressure load. The panel yielded to the load did not returned to a similar shape as before the load. In the case of PETG facings, the samples showed an elastic deflection. After removing the load, the panel returned to a similar shape as it was originally. Samples with PETG facings promote significant damage to the core. Cardboard panels are much stiffer than those made of PETG.

Both tested composites, combined with the auxetic properties of the core, are easy to manufacture and further process. These structures can be used in a variety of industrial applications. Further research should focus on the development of different materials and geometries of the core cells. It is also important to extend the scope of the research to new combinations of facing materials.

6. Kopia artykułów stanowiących cykl publikacji

7. Oświadczenia współautorów prac