Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rzeczpospolita Polska

Tytuł projektu:

„Lekkie drewnopochodne płyty komórkowe z auksetycznymi rdzeniami"

IV Konkurs Tango

Beneficjent:

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
**Wydział Leśny i Technologii Drewna**
**Katedra Meblarstwa**

Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu TANGO IV umowa nr TANGO-IV-A/0022/2019-00

Okres realizacji projektu:

od 2021-09-01 do 2023-10-31

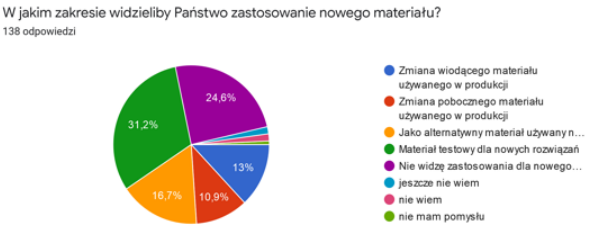
# ETAP 1. Prace koncepcyjne

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania ankietowe dotyczące możliwości wykorzystania nowych płyt komórkowych, stan na dzień 30.11.2021r.

Badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem metody ankietowej. Przedsiębiorstwa selekcjonowane były na podstawie powinowactwa z szeroko pojętą branżą drzewną – zarówno z perspektywy producenta wyrobów drzewnych i drewnopochodnych jak i usługami pokrewnymi, z sektora meblarskiego, budownictwa drewnianego, transportu czy innych usług produkcyjnych. Prośba o wypełnienie ankiety została wysłana do 1000 wytypowanych przedsiębiorstw, z czego ponad 90% stanowiły przedsiębiorstwa z sektora MŚP. Na rozesłane zapytanie otrzymano 138 zwrotnych ankiet co stanowiło 13,8% ankietowanych, z czego 98,5% ankietowanych odesłało kompletnie wypełniony formularz ankietowy.

Nowe warianty płyt komórkowych

**Odpowiedzi na pytania zawarte w ankiecie**




Wskazania literaturowe oraz przeprowadzone badania ankietowe jednoznacznie wskazują na zapotrzebowanie rynkowe dotyczące wdrażania nowych materiałów. Prawie 70% ankietowanych wskazało na zainteresowanie zastosowaniem zaproponowanych nowatorskich materiałów w bieżącej produkcji z czego ponad 40% wskazywało na wdrożenie go w charakterze wiodącym lub pomocniczym, a ponad 30% jako testowy dla nowych wdrożeń. Niezwykle istotnymi z perspektywy wdrażania okazały się wskaźniki ekonomiczne jak cena i dostępność rynkowa, ale również parametry jakościowe i użytkowe. Ponad połowa respondentów wywodzi się z przemysłu meblarskiego co rokuje na możliwie szybkie wdrożenie materiału w postaci półfabrykatów, elementów czy samodzielnych konstrukcji.

**W dniu 28-04.2021 zawarto umowę o współpracy pomiędzy:**

**I.** Uniwersytetem Przyrodniczym w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, posiadającym numer identyfikacji podatkowej (NIP): 777 00 04 960, numer REGON: 000001844,

a

**II.** Sklejka-Eko S.A. z siedzibą w 63-400 Ostrów Wielkopolski, ul. Reymonta 35, wpisaną do rejestru przedsiębiorców prowadzonego przez Sąd Rejonowy – Nowe Miasto i Wilda w Poznaniu IX Wydział Gospodarczy Krajowego Rejestru Sądowego KRS nr 0000032963.

**UMOWA O WSPÓŁPRACY**

zawarta w dniu 28-04-2021 r. w Poznaniu

pomiędzy:

**I.** Uniwersytetem Przyrodniczym w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, posiadającym numer identyfikacji podatkowej (NIP): 777 00 04 960, numer REGON: 000001844, reprezentowanym przez Prorektora ds. nauki i współpracy międzynarodowej Prof. dr hab. Piotra Golińskiego, przy kontrasygnacie Kwestor mgr Karoliny Pralat, zwanym dalej **„Uniwersytetem"**,

a

**II.** Sklejka-Eko S.A. z siedzibą w 63-400 Ostrów Wielkopolski, ul. Reymonta 35, wpisaną do rejestru przedsiębiorców prowadzonego przez Sąd Rejonowy – Nowe Miasto i Wilda w Poznaniu IX Wydział Gospodarczy Krajowego Rejestru Sądowego KRS nr 0000032963 reprezentowaną przez dra Jacka Kaszyńskiego, Prezesa Zarządu – Dyrektora Operacyjnego, zwaną dalej **„Spółką"**

zwanymi w treści umowy łącznie **„Partnerami"**.

**OGÓLNY CEL POROZUMIENIA**

**Partnerzy** umowy zamierzając ściśle ze sobą współpracować ustalają następujące zasady ramowe współpracy w celu realizacji części zadań badawczych stanowiących przedmiot wniosku o dofinansowanie projektu pt. „Lekkie drewnopochodne płyty komórkowe z auksetycznymi rdzeniami" TANGO-IV-A/0022/2019 złożonego przez Uniwersytet do NCBR dnia 2020-05-14 13:10:49(79701), Numer naboru: TANGO-IV A.

**ZOBOWIĄZANIA PARTNERÓW**

§ 1

**Partnerzy** będą współpracować przy wykonywaniu poszczególnych zobowiązań wynikających z niniejszej umowy.

§ 2

W zakresie działalności naukowej **Partnerzy** zapewniają:

1) Inspirowanie i kreowanie koncepcji kształtowania falistego arkusza z obłogów drewnianych. Pierwsza metoda polega na zbudowaniu z cienkiej perforowanej blachy nieruchomej matrycy mocowanej do podłoża nieodkształcalnego pod wpływem zmiennej wilgotności i temperatury

1

W imieniu **Uniwersytetu**

PROREKTOR
ds. Nauki i Współpracy Międzynarodowej
prof. dr hab. Piotr Goliński

KWESTOR
mgr Karolina Pralat

UNIWERSYTET PRZYRODNICZY
w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 28 (1)
60-637 POZNAŃ
tel. (61) 848 70 05, -70 06, -70 07
fax (61) 895 50 07

W imieniu **Spółki**

PREZES ZARZĄDU
DYREKTOR OPERACYJNY
Jacek Kaszyński

SKLEJKA-EKO S.A.
ul. Reymonta 35 (1)
63-400 Ostrów Wlkp
Regon 350026943
NIP 622-00-05-391

5

# ETAP 2. Prace badawczo rozwojowe

## Zadanie 1.

Opracowano dokumentację techniczną form do kształtowania arkuszy rdzeni. Zaprojektowano optymalny kształt matrycy, długość i wysokość fali. Ustalono grubość płyty komórkowej nie mniejszą niż 35 mm oraz grubość okładzin nie mniejszą niż 3 mm. Zaprojektowane urządzenie składa się z nieparzystej liczby listew(Fig.1) uzbrojonych w 18 małych i 18 dużych ogniw (matryc) każda (Fig.2). Z uwagi na warunki suszenia w suszarni przemysłowej zastosowano łącznie 11 listew, 6 listew (dolnych) połączono ze sobą śrubami, a 5 listew (górnych) nie połączono i były wsuwane pojedynczo podczas formowania obłogów.

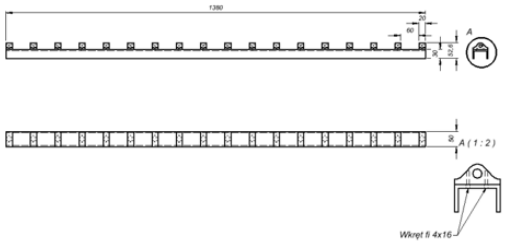



Fig.1. Rysunek listwy do mocowania matryc.

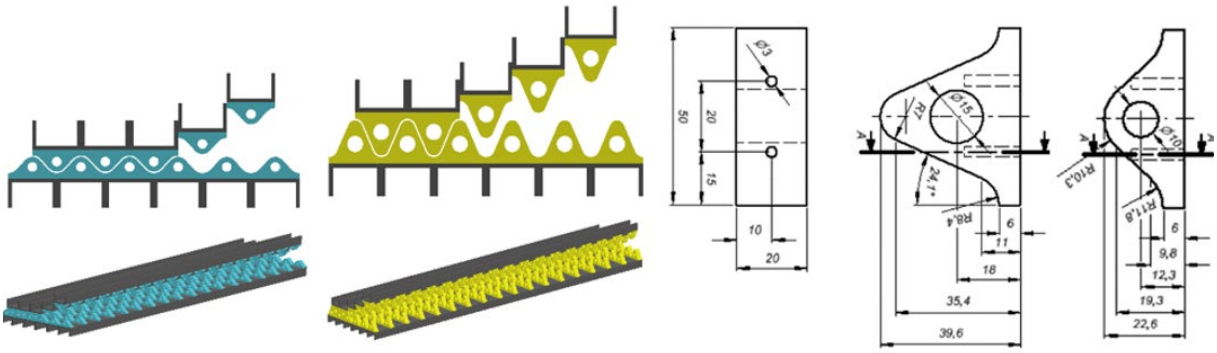



Fig. 2. Rysunki par matryc małych i dużych.

Wykonano także dokumentację urządzenia do formowania łuszczki (Fig. 3). Konstrukcja składa się z dolnego i górnego pasa, każdy napędzany współbieżnie, ręcznie. Pasy zaprojektowano z materiału odpornego na suche i wilgotne gorące powietrze o temperaturze 100 ºC - 140 ºC. Zaprojektowane urządzenie wykonano w ramach usługi zewnętrznej dlatego rysunki przekazano do zapytania ofertowego w postaci jak niżej.

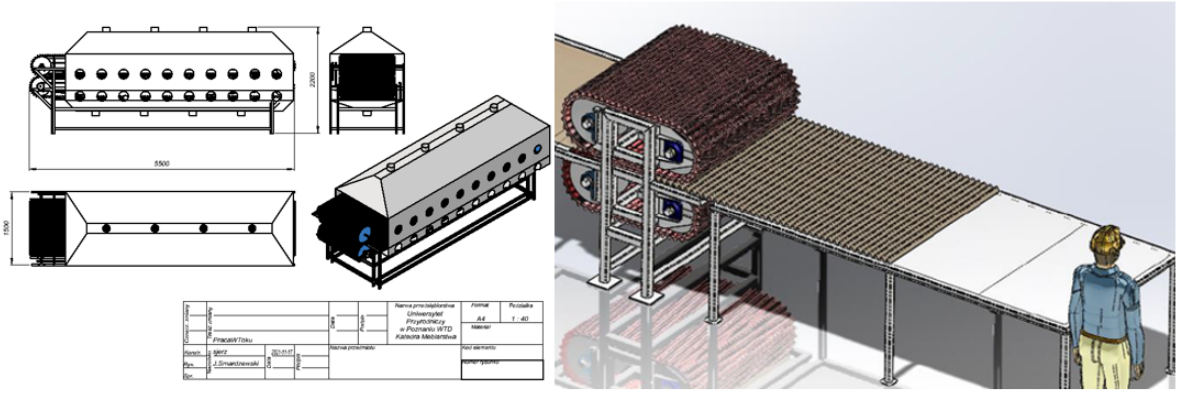



Fig.3. Urządzenie do formowania łuszczki.

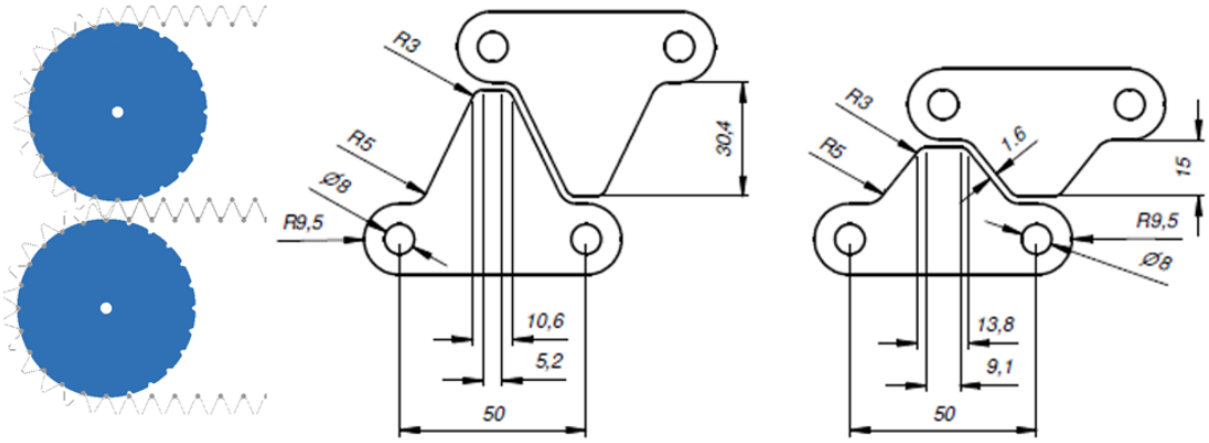



Fig.4. Walce i matryce do formowania łuszczki.

**Zadanie 2.**

Wykonano oprzyrządowanie przeznaczone do kształtowania falistych arkuszy drewnianych obłogów rdzeni płyt komórkowych. Nowe oprzyrządowanie wyróżnia się możliwością zginania uplastycznionych obłogów wzdłuż włókien a następnie suszenia uzyskanego kształtu celem jego utrwalenia. Urządzenie

zapewnia sekwencyjne zginanie kolejnych fal (pryzm) obłogów wraz z liniowym przesunięciem w kierunku prostopadłym do włókien drzewnych i minimalizowanie pęknięć wzdłuż włókien wywołanych suszeniem oraz utrwalanie kształtu falistego arkusza. Wykonano dwie pary matryc i patryc. Jedna para przeznaczona jest do formowania obłogów o dużej wysokości fali (nie większej niż 29 mm), druga para o małej wysokości fali, około 15 mm (Fig.5). Formy wykonano w pierwszej kolejności techniką druku 3D, a następnie z lignofolu i zamocowano na sztywnych profilach aluminiowych zapewniających możliwość swobodnego przepływu gorącego powietrza podczas cyklu suszenia. Matryca tworzy autonomiczne sekcje pozwalające na swobodne układanie się arkusza obłogu pomiędzy matrycą i patrycą. Docisk patrycy do matrycy wywoływano manualnie i w taki też sposób kontrolowano prędkość przesuwania się obłogów.

a) b) c)

Fig.5. Para matryca i patryca o dużej wysokości fali (a). Para matryca i patryca o małej wysokości fali (b), oraz sposób manualnego formowania łuszczki z ich pomocą (c).

Wykonano również urządzenie (oprzyrządowanie) do formowania łuszczki. Charakteryzuje się ono lekką, szkieletową konstrukcją możliwą do ustawiania w otoczeniu maszyn i urządzeń dostępnych w warunkach przemysłowych. Zgodnie z umową współpracy podpisaną z Sklejka-Eko S.A. urządzenie ustawiono w pobliżu łuszczarki, tak aby maksymalnie skrócić czas pobierania łuszczki bezpośrednio po obróbce hydrotermicznej i po łuszczeniu (Fig.6).

Fig.6. Urządzenie do formowania łuszczki.

**Zadanie 3**

Wytworzono płyty komórkowe i określono ich właściwości fizyko-mechaniczne. Ustalono wpływ zastosowanych materiałów oraz budowy rdzenia na gęstość, moduł sprężystości liniowej oraz wytrzymałość na zginanie warstwowych kompozytów drzewnych. Pozyskano obłogi o grubości 1,2 oraz 1,4 mm z drewna sosny i brzozy (zastępując buk) o niższej jakości w porównaniu do wyrzynków stosowanych do produkcji sklejek. Dopuszczalne były: otwory po sękach, ślady po żerowaniu owadów, nieznaczne pęknięcia i nieciągłości warstwy, sinizna, fałszywa twardziel (Fig.7). Dalej uplastycznione obłogi wprowadzono pomiędzy matrycę i patrycę, a następnie dociśnięto w taki sposób, aby nie spowodować ich pękania oraz aby możliwy był nadmuch ciepłego, suchego powietrza. Po zakończeniu obróbki zmierzono wysokość i długość fali oraz kąt nachylenia ramion rdzenia.

Fig.7. Dopuszczalne wady forniru podczas formowania rdzeni.

Fig.8. Rdzenie i płyty kanałowe – z komórkami nieauksetycznymi

Rdzenie kanałowe wykonano w dwóch układach z komórką nieauksetyczną oraz periodyczną komórką auksetyczną, które zostaną omówione w przedstawionej kolejności. Najpierw ułożono rdzenie podłużnie i krzyżowo (Fig. 8) a następnie rdzenie oklejono okładzinami ze sklejki brzozowej. Rdzenie zawierały defekty w postaci pęknięć, ubytków po wadach drewna i wady drewna (Fig.7,9).

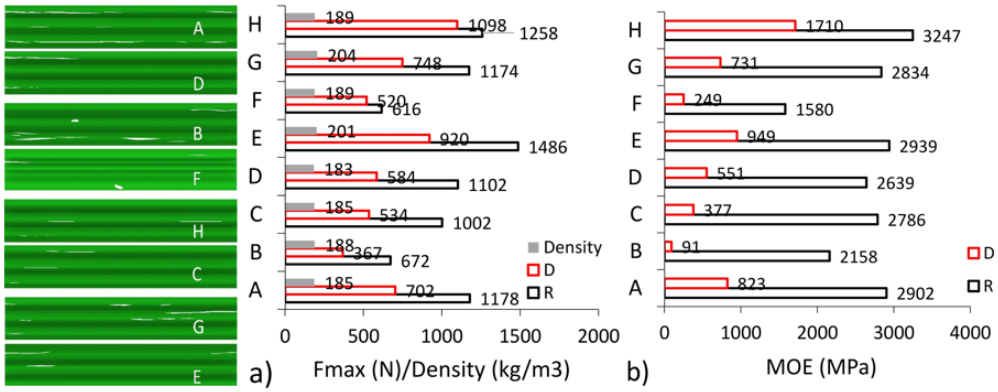
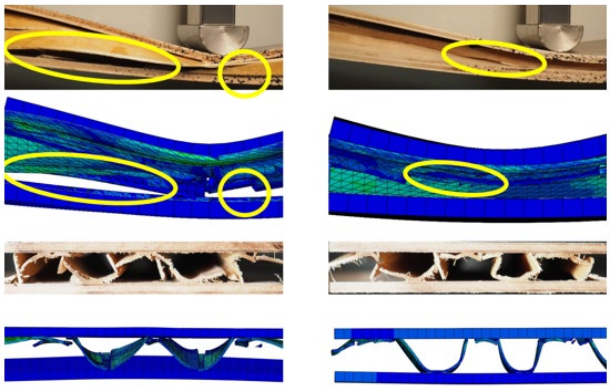



Fig.9. Właściwości mechaniczne płyt kanałowych z komórką nieauksetyczną (a) gęstość i siła maksymalna, (b) moduł sprężystości liniowej.

Badania eksperymentalne wykazały istotne różnice w wartościach sił niszczących dla poszczególnych typów belek (Fig.9a). Gęstość płyt była równa od 185 kg/m3 do 204 kg/m3, zatem znacznie mniej niż zakładano 400 kg/m3. Różnice wytrzymałości płyt nie wynikają jednak z niewielkich różnic w gęstości płyt lecz spowodowane są objętością pęknięć i ubytków drewna. Największą wartością siły niszczącej w pierwszym zginaniu (R) oraz powtórnym zginaniu (D), odpowiednio Fmax=1486 N i 920 N, charakteryzuje się płyta typu E, dla której objętość ubytków wynosi Vi=593 mm3. W tym samym badaniu belkę F charakteryzuje najniższa wartość siły niszczącej Fmax=616 N oraz 520 N odpowiednio dla (R) i (D), dla której objętość ubytków wynosi Vi=4080 mm3. Badania wykazały również, że największym liniowym modułem sprężystości wyróżnia się płyta typu H, gdzie MOE=3247 MPa, a w powtórnym zginaniu MOE=1710 MPa. Dla belki E różnice w MOE wyniosły odpowiednio 2939 MPa i 551 MPa, dla belki F 1580 MPa i 249 MPa, a dla belki B 2158 MPa i 91 MPa. Wykazano, że na MOE wpływają niedoskonałości rdzenia w przekroju płyt oraz udział objętości ubytków drewna.



E F

Fig.10. Typowe uszkodzenia płyt przy zginaniu - porównanie wyników numerycznych z eksperymentalnymi.

Wyniki eksperymentalne pierwszych prób zginania belek (R) porównano z wynikami obliczeń numerycznych (Fig.10). Przedstawiono tu awarie w najmocniejszej belce E i najsłabszej belce F. Wartość naprężenia von Misesa inicjującego uszkodzenie rdzenia sięgała 75 MPa. Obliczenia numeryczne wykazały także pęknięcia na powierzchniach bocznych rdzenia, co potwierdzają obrazy uszkodzeń ujawnione w eksperymencie. Badania wykazały, że płyty kanałowe z rdzeniem falistym stanowią doskonały materiał konstrukcyjny o gęstości mniejszej niż 400 kg/m3 i MOE większym niż 1500 MPa. W czasie zginania do pierwszego zniszczenia moduł sprężystości płyt wahał się od 1580 MPa do 3247 MPa, a wytrzymałość na zginanie od 3,3 MPa do 7,9 MPa. Obliczenia numeryczne wykazały, że wirtualny model belki referencyjnej pozbawiony imperfekcji i szczelin charakteryzował się siłą maksymalną większą jedynie o 11,5% niż u płyty E. Przygotowany model numeryczny prawidłowo określił uszkodzenia w rdzeniu i potwierdził jego przydatność w dalszych badaniach. Wyniki badań opublikowano w pracy https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133924.

Płyty kanałowe z komórkami auksetycznymi uformowano tak, że środek stanowił obłóg o największej wysokości fali oraz dwie warstwy zewnętrzne o mniejszej wysokości fali sklejone przy użyciu kleju PVAC (Fig.11).

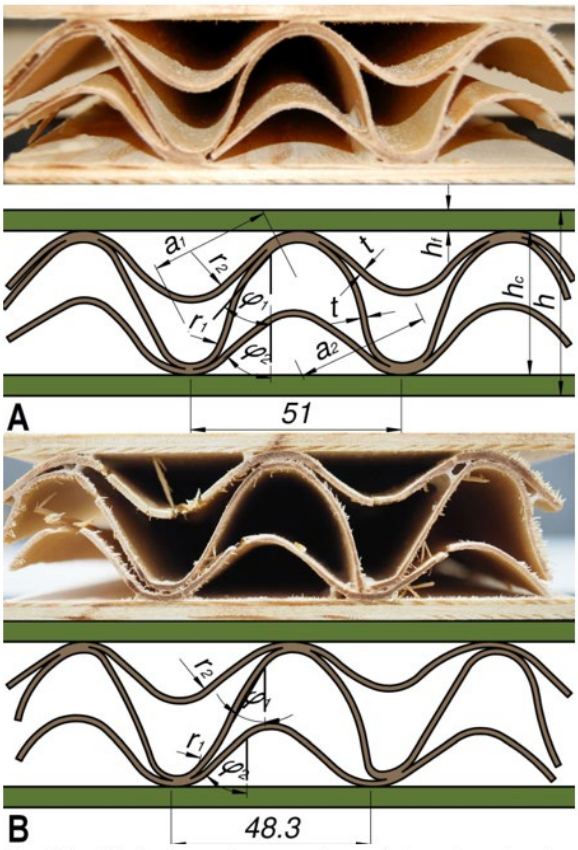



Fig.11. Płyty kanałowe z komórkami auksetycznymi - ilustracja imperfekcji geometrycznych.

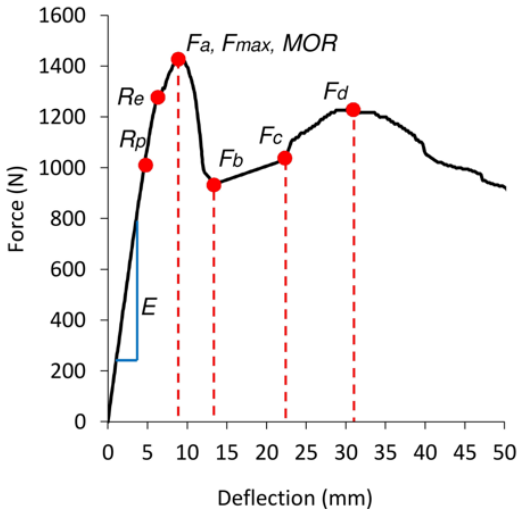



Fig.12. Charakterystyka uszkodzeń płyt.

Badania eksperymentalne wykazały, że uszkodzenie struktury rdzenia następuje w kilku etapach (Fig.12). W pierwszej fazie zginania, aż do osiągnięcia maksymalnej siły Fa zależność siła-ugięcie ma charakter liniowy. Mamy tu zakres proporcjonalności Rp, zakres sprężystości Re oraz zakres odkształcenia plastycznego kończący się na maksymalnej sile Fa. Nie zaobserwowano przy tym wyboczenia ścian rdzenia ani jego zniszczenia. Po przekroczeniu siły Fa ściany rdzenia falistego utraciły stateczność, co skutkowało ich dużym wyboczeniem i pęknięciami, zwłaszcza wzdłuż włókien drewna. Wartość siły gwałtownie spadła do Fb. W trzecim etapie siła powoli wzrasta do Fc, a w środku ściany

rdzenia zaczynają całkowicie stykać się z powierzchniami górnego rdzenia i osadzać się na powierzchniach dolnego rdzenia. Pierwszy kontakt rdzenia środkowego z rdzeniem dolnym pokazuje wzrost siły do wartości Fc. Ostatni, czwarty etap zginania to stan, w którym wszystkie powierzchnie rdzenia stykają się ze sobą i siła wzrasta do wartości Fd. Zauważono, że pomimo zniszczenia rdzenia, okładziny nie uległy uszkodzeniu, a wartość siły Fd jest tylko nieznacznie mniejsza od wartości maksymalnej. Ten etap można nazwać wtórnym wzmocnieniem konstrukcji.

| Parameter | Unit | Experiment | | Mean | SD | FEM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | | | A | B | CAD |
| Density | (kg/m³) | 222 | 229 | 228 | 5.22 | | | |
| $F_{max}$ | (N) | 1429 | 1096 | 1254 | 127 | 1246 | 1045 | 1370 |
| $E$ | (MPa) | 1511 | 1179 | 1449 | 226 | 1294 | 1089 | 1739 |
| $MOR$ | | 5.29 | 4.06 | 4.64 | 0.47 | 4.61 | 3.87 | 5.07 |

Fig.13. Właściwości mechaniczne płyt kanałowych
z komórkami auksetycznymi

Opracowane płyty komórkowe wyróżniają się średnią gęstością 228 kg/m3. Badania eksperymentalne wykazały, że średni moduł sprężystości liniowej płyt wynosi E = 1449 MPa, a średnia wytrzymałość 4,64 MPa (Fig.13). Analizując wpływ imperfekcji na sztywność belek można zauważyć, że moduł sprężystości belek A jest równy 1511 MPa, a belek B 1179 MPa. Zatem niedoskonałości geometrii rdzenia mają znaczący wpływ na sztywność płyty i jej wytrzymałość. Obserwację tę potwierdzają także wyniki obliczeń numerycznych. Ich jakość sprawdzono na Fig.14. Obliczenia numeryczne wykazały, że moduł sprężystości liniowej dla płyty referencyjnej (model CAD) wynosi E = 1739 MPa, a wytrzymałość wynosi 5,07 MPa. W przypadku płyt typu A i B imperfekcje powodowały asymetryczne odkształcenia rdzenia i większe naprężenia w jego ściankach (Fig. 14).

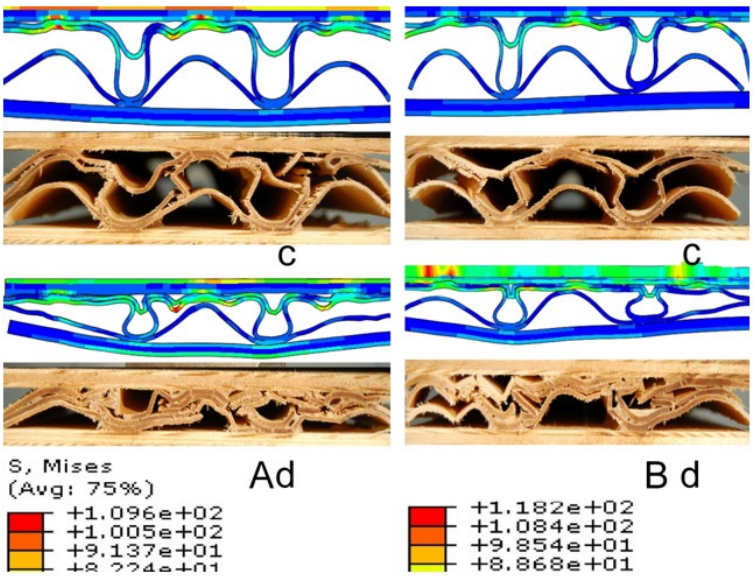



Fig.14. Typowe uszkodzenia płyt przy zginaniu
- porównanie wyników numerycznych z eksperymentalnymi.

Opisane powyżej badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne wykazały, że niedoskonałości geometryczne falistego rdzenia płyty kanałowej silnie wpływają na jej sztywność i wytrzymałość. Przykładowo moduł sprężystości płyty może osiągać wartość o 37% mniejszą, a wytrzymałość na zginanie nawet o 24% mniejszą w porównaniu do płyt referencyjnych o idealnej, symetrycznej

geometrii rdzenia. Zgodnie z zamierzeniem uzyskano jednak płyty typu A o gęstości 222 kg/m3, to jest mniejszej niż zakładano 400 kg/me oraz o module sprężystości liniowej 1511 MPa, to jest większej niż zakładano 1500 MPa. Wskazuje na doskonałe właściwości konstrukcyjne nowej płyty. Wyniki prac opublikowano w https://doi.org/10.1002/pssb.202200423.

Rdzenie komórkowe (plaster miodu) o komórkach trójkątnych uzyskano w wyniku rozpiłowania w poprzek włókien rdzeni kanałowych. Otrzymano pasy o szerokości odpowiadającej grubości rdzenia, które ułożono na płaskim stole w taki sposób aby ściany komórek były prostopadłe do tego stołu. Następnie pasy sklejono szerokimi powierzchniami ścian komórek do siebie z użyciem kleju PVAC. Doklejając kolejne pasy komórek uzyskano rdzenie o strukturze plastra miodu gotowe do sklejenia z okładzinami (Fig. 15).

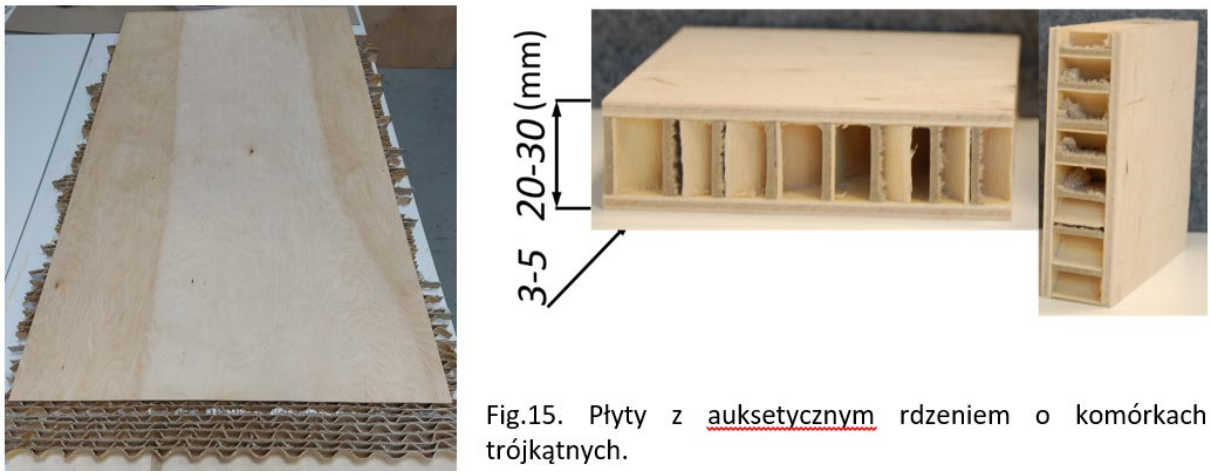



Fig.15. Płyty z auksetycznym rdzeniem o komórkach trójkątnych.

Wykonano łącznie pięć rdzeni auksetycznych o strukturze trójkątnych komórek. Wysokość rdzenia (grubość) była równa 27.5 mm, szerokość i długość nie mniejsze niż 1000 mm x 2000 mm, oraz auksetyczne rdzenie o strukturze owalnych komórek. Badania eksperymentalne wykazały, że płyty z komórkami trójkątnymi i poprzecznym ułożeniem względem okładzin (HCP) przenoszą większe obciążenia (nawet do 1600 N) w porównaniu do płyt z wzdłużnym ułożeniem rdzenia (HCL) (około 450 N) Fig. 16. Ponad to płyty te (HCP) wyróżniały się największym modułem sprężystości linowej oraz największą wytrzymałością na zginanie odpowiednio 1559 MPa i 11.5 MPa (Fig.17).

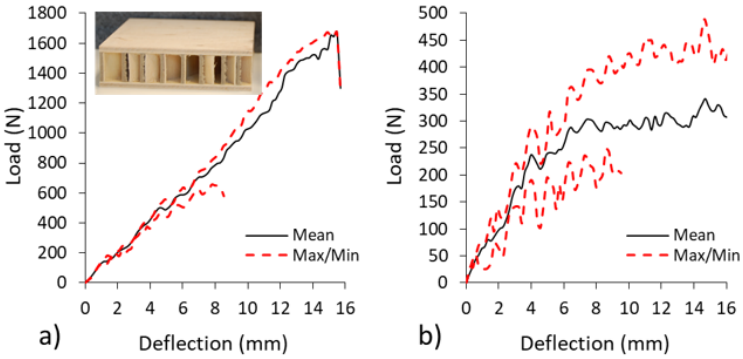



Fig.15. Charakterystyka sztywności płyt z auksetycznymi komórkami trójkątnymi: a) wzdłużne, b) poprzeczne

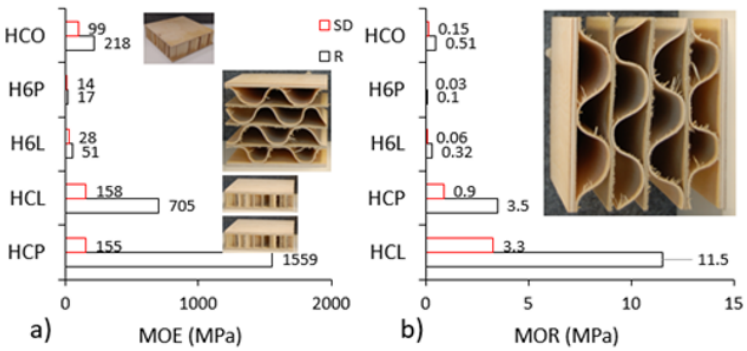



Fig.17. Moduł sprężystości i wytrzymałość płyt: HCO – owalne rdzenie auksetyczne, H6P – owalne komórki auksetyczne, poprzeczne, H6P – owalne komórki auksetyczne, wzdłużne, HCP – trójkątne komórki auksetyczne, poprzeczne, HCL – trójkątne komórki auksetyczne, wzdłużne.

Rdzenie z owalnymi komórkami zostały sklejone w taki sposób aby utworzyć owalne przestrzenie. Arkusze sklejano szerokimi powierzchniami do siebie z użyciem kleju PVAC i prasowano w prasach hydraulicznych z zastosowaniem ograniczników stabilizujących rozmiary komórek. Rdzenie komórkowe uzyskano rozpiłowania w poprzek włókien sklejonych arkuszy obłogów. Otrzymano pasy o szerokości odpowiadającej grubości rdzenia które ułożono na płaskim stole w taki sposób aby ściany komórek były prostopadłe do tego stołu (Fig. 18). Następnie pasy zostały sklejone szerokimi powierzchniami ścian komórek do siebie z użyciem kleju PVAC. Doklejając kolejne pasy komórek uzyskano rdzenie o strukturze plastra miodu gotowe do sklejenia z okładzinami (Fig. 18). W przypadku rdzeni kanałowych z komórkami owalnymi, rdzenie układano wzdłuż okładzin jak na rycinie 19.

Fig.18. Płyty z auksetycznym rdzeniem o komórkach owalnych.

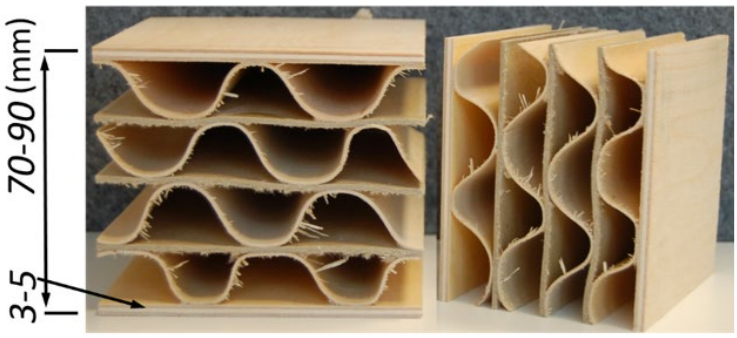



Fig.19. Płyty z auksetycznym rdzeniem o komórkach owalnych.

Interesująco przedstawiają się także płyty z komórkami owalnymi HCO. Wyróżniają się one małą wytrzymałością na zgnanie lecz największą wytrzymałością na ściskanie. To preferuje te płyty jako doskonały materiał podłogowy, okładzinowy i grodzący. Płyty owale sześciowarstwowe H6P i H6L (Fig.16) mają niewielką wytrzymałość na zginanie i niewielki moduł sprężystości liniowej 0.14-0.51 MPa. Gęstość wykonanych płyt z komórkami trójkątnymi była równa 332 kg/m$^3$. Płyty warstwowe z komórkami owalnymi (HCO, H6L, H6P) wyróżniają się jednak małą gęstością. Gęstość wykonanych płyt z komórkami owalnymi była równa od 158 – 193 kg/m$^3$. Zatem mogą one stanowić dobry materiał na płyty okładzinowe, grodzące i izolacyjne.

**Wnioski**

W etapie 2 projektu wykonano wszystkie zaplanowane zadania. Opracowano dokumentację techniczną oprzyrządowania do wytwarzania falistych arkuszy rdzeni płyt komórkowych 3D i 2D. Wykonano dokumentację urządzenia do formowania łuszczki. Wykonano dwie pary matryc i patryc. Para matryca i patryca o dużej wysokości fali. Para matryca i patryca o małej wysokości fali. Wytworzone urządzenie do formowania łuszczki w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Wykonano auksetyczne rdzenie o strukturze kanałowej i komórkowej w tym pięć rdzeni o strukturze kanałowej oraz pięć rdzeni o strukturze trójkątnych komórek. Wysokość rdzenia (grubość) nie była większa niż 29 mm, szerokość i długość nie mniejsze niż 1000 mm x 2000 mm. Wykonano auksetyczne rdzenie o strukturze owalnych komórek. Pięć rdzeni o strukturze owalnych komórek. Wysokość rdzenia (grubość) nie większa niż 29 mm, szerokość i długość nie mniejsze niż 1000 mm x 2000 mm. Wykonano również płyty komórkowe z owalnymi auksetycznymi. Większość zaprojektowanych płyt komórkowych charakteryzowała się modułem sprężystości E >= 1500 MPa, zaś gęstość wszystkich płyt komórkowych była nie większa niż 400 kg/m3.