Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Leśny i Technologii Drewna
Katedra Meblarstwa

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Łukasz Krzyżniak

Wpływ wewnętrznych sił montażowych i zjawisk kontaktowych na wytrzymałość zewnętrznie niewidocznych połączeń meblowych

Effect of internal mounting forces and contact phenomena on the strength of externally invisible furniture joints

w formie spójnego tematycznie cyklu artykułów opublikowanych

w czasopismach naukowych

Promotorzy:

prof. dr hab. inż. Jerzy Smardzewski
prof. dr. Ali Kasal

Poznań, luty 2022

Słowa kluczowe

Złącza meblowe, łączniki, obciążenia statyczne i dynamiczne, absorbcja energii, eksperyment, analiza numeryczna.

Finansowanie zewnętrzne

Prace badawcze opisane w cyklu publikacji finansowane były z kilku źródeł zewnętrznych. Przedstawiono je w kolejności pozyskania:

- Projekt "Inkubator Innowacyjności 2.0" w ramach ustanowionego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu pozakonkursowego pn. „Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 (Działanie 4.4), Umowa MNiSW/2019/170/DIR pt. „EkoBioFood 2.0 – PULS PLANTINOVA" z dnia 11.06.2019 r. Całkowita wartość projektu: 1 371 111,12 PLN. Wartość realizowanych prac przedwdrożeniowych pt. „Meble gotowe do montażu bez użycia narzędzi", 52.000,00 zł. Umowa NR 1/ININ 2.0/UW/2019.

- Projekt "Inkubator Innowacyjności 2.0" w ramach ustanowionego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu pozakonkursowego pn. „Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 (Działanie 4.4), Umowa MNiSW/2019/170/DIR pt. „EkoBioFood 2.0 – PULS PLANTINOVA" z dnia 11.06.2019 r. Całkowita wartość projektu: 1 371 111,12 PLN. Wartość realizowanych prac przedwdrożeniowych pt. „Przesuwno-zaczepowe zewnętrznie niewidoczne połączenia do mebli", 50.000,00 zł. Umowa NR 1/ININ 4.0/UW/2020.

- Wilrobi Sp. z o.o., ul. Nowogrodzka 157H, Łomża (18-400), KRS: 0000301959, REGON: 200213853, NIP: 7182081544, Umowa o wykonanie usługi badawczo-rozwojowej zawarta dnia 01.10.2019, kwota zlecenia 92.000,00 zł. Dotyczy umowy o powierzenie grantu GRANT2/102 w ramach FE FRR 1.2.2 „Bon na usługi badawcze" RPOWP, Umowa z dnia 30.09.2019.

Wykaz skrótów

W wykazie skrótów zastosowano zasadę, aby wszystkie oznaczenia odpowiadały oryginalnym oznaczeniom w tekście przywołanych publikacji, nawet jeżeli ich znaczenia w poszczególnych pracach mogą być różne.

ABS	Terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy *(ang. Acrylonitrile Butadiene Styrene)*
3D	Trójwymiarowy *(ang. Three-dimensional)*
Be	Drewno bukowe *(ang. Beech wood)*
D	Gęstość *(ang. Density)*
DP	Przemieszczenie *(ang. Displacement)*
E	Łącznik mimośrodowy *(ang. Eccentric joint)*
E_i	Energia zaabsorbowana *(ang. Absorbed energy)*
E_n	Naprężenia po odciążeniu *(ang. Stresses after unloading)*
Es	Zastępczy moduł sprężystości *(ang. Equivalent modulus of elasticity)*
F	Siła *(ang. Force)*
F_c	Siła uderzenia *(ang. Contact force)*
F_m	Siła montażowa *(ang. Assembly force)*
G	Moduły sprężystości postaciowej *(ang. Modulus elasticity in shear)*
H_i	Ugięcie
I	Strona wewnętrzna połączenia *(ang. Internal side of the joint)*
K	Współczynnik sztywności *(ang. Coefficient of stiffness)*
K_a	Współczynnik ilości pochłoniętej energii *(ang. Coefficient of the amount of absorbed energy)*
L	Długość *(ang. Length)*
M	Złącze skrętno-sprężne *(ang. Tension twist joint)*
M	Moment montażowy *(ang. Mounting moment)*
MC	Wilgotność bezwzględna (*ang. Moisture content)*
MES, FEM	Metoda elementów skończonych *(ang. Final element method)*
MDF	Płyta pilśniowa o średniej gęstości *(ang. Medium density fibreboard)*
M_O	Naprężenia normalne spowodowane przez siły montażowe F_m *(ang. Normal stresses caused by assembly forces F_m)*
MOE, E	Moduł sprężystości liniowej *(ang. Modulus of elasticity)*
MOR	Wytrzymałość na zginanie *(ang. Modulus of rupture)*
O	Strona zewnętrzna połączenia *(ang. External side of the joint)*
P	Nacisk *(ang. Pressure)*
PA	Poliamid *(ang. Polyamide)*
PB	Płyta wiórowa *(ang. Particle board)*
PL	Sklejka *(ang. Plywood)*
RP	Punkt referencyjny *(ang. Reference point)*
S	Złącze przesuwno-zaczepowe *(ang. Slide catch joint)*
SLS	Selektywne spiekanie laserowe *(ang. Selective Laser Sintering)*
T_e	Naprężenia normalne spowodowane przez siłę *P (ang. Normal stresses caused by force P)*
δ	Przemieszczenie w kierunku działania siły *(ang. Displacement in the direction of the force)*
k	Współczynnik sztywności *(ang. Coefficient of stiffness)*
$\sigma_{(i)}$	Naprężenia normalne *(ang. Normal stress)*
$\Delta\varphi$	Kąt obrotu połączenia *(ang. Angle of joint rotation)*

Spis treści

1. Wykaz publikacji stanowiących podstawę postępowania w sprawie o nadanie stopnia naukowego doktora 6
2. Aktywność naukowa i zawodowa 8
3. Przedmiot badań 14
3.1 Wprowadzenie 14
3.2 Hipotezy badawcze 16
3.3 Cel rozprawy 16
3.4 Ogólna metodyka badań 16
3.5 Wyniki publikacji A.1. *Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases* 18
3.6 Wyniki publikacji B.1. *Modeling of Externally Invisible Cabinet Furniture Joints* 23
3.7 Wyniki publikacji A.4. *Analysis of the internal mounting forces and strength of newly designed fastener to joints wood and wood-based panels* 28
3.8 Wyniki publikacji A.2. *Numerical modelling of stiffness of RTA furniture with new externally invisible and dismountable joints* 34
3.9 Wyniki publikacji A.3. *Impact damage response of L-type corner joints connected with new innovative furniture fasteners in wood-based composites panels* 42
4. Dyskusja wyników i wnioski 47
5. Literatura 50
6. Streszczenie 54
7. Abstract 55
8. Kopia artykułów stanowiących cykl publikacji 56
9. Pisemne oświadczenia 57

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

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z cyklu 4 publikacji analizujących „Wpływ wewnętrznych sił montażowych i zjawisk kontaktowych na wytrzymałość zewnętrznie niewidocznych połączeń meblowych”:

A.1 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2019) Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases. Engineering Structures, Volume 199, 11 September 2019, 109674; https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109674 **(if=3.345, p.140)**,

A.2 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J., Prekrat S. (2020) Numerical modelling of stiffness of RTA furniture with new externally invisible and dismountable joints. Drvna Industrija 71 (2) 207-212, https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1953 **(if= 0.712, p. 40)**,

A.3 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2021) Impact damage response of L-type corner joints connected with new innovative furniture fasteners in wood-based composites panels. Composite Structures, Volume 255, 1 January 2021, 113008; https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113008 **(if= 5.138, p. 140)**,

A.4 Krzyżaniak Ł., Kuşkun T., Kasal A., Smardzewski J. (2021) Analysis of the internal mounting forces and strength of newly designed fastener to joints wood and wood-based panels. Materials 2021, 14, 7119, https://doi.org/10.3390/ma14237119 **(if= 3.623, p. 140)**.

Ze względu na tematykę badawczą poniższa publikacja stanowi uzupełnienie powyższego cyklu:

B.1 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2017) Modeling of Externally Invisible Cabinet Furniture Joints. 28th International Conference on Wood Science and Technology 2017 IMPLEMENTATION OF WOOD SCIENCE IN WOODWORKING SECTOR. Faculty of Forestry and Wood Technology, Zagrzeb, 07-08 December 2017 r. :191-197.

Ponadto rezultaty pracy doktorskiej zostały zawarte w udzielonych patentach i zgłoszeniach patentowych:

C.1 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2021) Złącze przesuwno-zaczepowe, w szczególności do mebli. P.423160 / Pat.237086, Klasyfikacja MKP F16B 12/12 F16B 12/26 F16B 12/46, Data zgłoszenia 2017-10-13, Data publikacji BUP 2019-04-23, Data udzielenia prawa 2020-10-20, Data publikacji WUP 2021-03-08

C.2 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2017) Złącze skrętno-sprężne, w szczególności do mebli. Zgłoszenie oznaczono numerem P.423338. Data zgłoszenia 2017-11-02, Klasyfikacja MKP F16B 12/20, F16B 12/10, F16B 12/12, F16B 12/46

C.3 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2019) Złącze przesuwno-zaczepowe zwłaszcza do mebli. Zgłoszenie oznaczono numerem: P.432153. Data zgłoszenia 2019-12-09, Klasyfikacja MKP F16B 12/12, F16B 12/26, B27F 1/16

C.4 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2019) Złącze przesuwno-rozporowe, zwłaszcza do mebli. Zgłoszenie oznaczono numerem: P.432195. Data zgłoszenia 2019-12-12, Klasyfikacja MKP F16B 12/12, F16B 12/20, F16B 12/26, F16B 21/06

2. Aktywność naukowa i zawodowa

Urodziłem się 30 grudnia 1991 r. w Gubinie. Ukończyłem Gubińskie Technikum Ekonomiczne przy Zespole Szkół Licealnych i Technicznych.

W 2011 roku rozpocząłem studia na Wydziale Technologii Drewna, w trakcie studiów wybrałem specjalność meblarstwo i w tym zakresie zrealizowałem pracę inżynierską oraz magisterską. Od początku realizacji studiów zajmowałem bardzo dobre pozycje na listach rankingowych najlepszych studentów WTD, wielokrotnie zajmując pierwszą pozycję. W związku z powyższym przez cały okres trwania studiów inżynierskich, magisterskich oraz doktoranckich byłem stypendystą z zakresu stypendiów rektorskich, naukowych czy innych przeznaczonych dla najlepszych studentów. Pracę inżynierską pt. „Projekt mebli szkieletowych do biur z wykorzystaniem materiałów pasywnych akustycznie" obroniłem w roku 2015 uzyskując ocenę bardzo dobrą. Moja praca magisterska pt. „Modelowanie połączenia do mebli skrzyniowych" z drewna również zwieńczona została obroną na ocenę bardzo dobrą w roku 2016. Studia drugiego stopnia ukończyłem z wyróżnieniem w postaci złotego medalu oraz wyróżnienia dla najlepszego absolwenta. Współpracę z przemysłem rozpocząłem jeszcze przed uzyskaniem tytułu inżyniera, angażując się różnego rodzaju prace badawczo-rozwojowe dotyczące rozwiązywania problemów konstrukcyjnych jak i technologicznych. We wspomnianym okresie nawiązałem współpracę z wieloma przedsiębiorstwami działającymi w branży meblarskiej. W związku z chęcią pogłębienia wiedzy z zakresu produkcji przemysłowej w roku 2016 zaraz po ukończeniu studiów magisterskich podjąłem pracę na stanowisku konstruktora-technologa w fabryce mebli biurowych „MARO Sp. z o.o." w Komornikach pod Poznaniem. Na stanowisku konstruktora-technologa poznałem specyfikę produkcji mebli oraz wiele problemów z nią związanych. Doświadczenie w fabryce mebli biurowych „MARO Sp. z o.o." zdobywałem poprzez konstruowanie mebli, planowanie procesów technologicznych jak i obsługę maszyn i urządzeń produkcyjnych. Studia doktoranckie rozpocząłem w roku 2017 równolegle z rozpoczęciem stałej współpracy z fabryką mebli „VOX Sp. z o.o." na stanowisku inżyniera działu rozwoju. Jako inżynier działu rozwoju zajmowałem się opracowywaniem wszelkiego rodzaju konstrukcji związanych z wyposażeniem wnętrz. Ze spółką „VOX Sp. z o.o." związany jestem do dzisiaj jako konsultant z zakresu technologii łączenia oraz innowacji konstrukcyjnych. W połowie roku 2020 objąłem stanowisko inżyniera R&D w centrum designu „Lab150" w Poznaniu. Na wspomnianym stanowisku do dziś zajmuję się opracowywaniem innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych dla podmiotów zewnętrznych, nie tylko z zakresu wyposażenia wnętrz, ale także małej architektury. Jak wspomniałem, studia doktoranckie rozpocząłem równolegle z moją działalnością zawodową, było to możliwe ze względu na bardzo zbliżony charakter podejmowanych przeze mnie działań, które zawsze dotyczyły rozwiązywania problemów związanych z technologiami łączenia. Realizacja studiów doktoranckich oraz pracy zawodowej w trybie równoległym była i jest możliwa również ze względu na fakt bliskiej współpracy Katedry Meblarstwa Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu z przemysłem. Rozwijając przebieg moich studiów doktoranckich, motywacją do ich podjęcia była chęć kontynuacji badań rozpoczętych podczas realizacji studiów magisterskich związanych z szeroko rozumianymi technologiami łączenia.

Realizację prac nad niniejszą rozprawą, rozpocząłem od uzupełnienia oraz publikacji wyników badań z mojej pracy magisterskiej dotyczącej projektu złącza skrętno-sprężnego na konferencji pt. 30th International Conference on Wood Science and Technology (ICWST)" w Zagrzebiu **B1**. Pierwszą znaczącą międzynarodową publikacją moich badań był artykuł w czasopiśmie Engineering Structures Volume 199 w roku 2019 pt. „Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases" **A.1**, w którym przedstawiłem dokładny przebieg badań nad właściwościami złączy skrętno-naprężnych oraz pierwotnej wersji złącza przesuwno-zaczepowego. Badania dotyczyły statycznych prób wytrzymałościowych mających na celu poznanie podstawowych charakterystyk wytrzymałościowych połączeń wykonanych w oparciu o wspomniane łączniki. Jako dobre uzupełnienie powyżej opisanych badań uznałem przeprowadzenie kolejnej serii prób, tym razem w warunkach dynamicznych co stanowiło zupełnie nowe podejście do sposobu badań wytrzymałości i sztywności połączeń. Wyniki badań dynamicznych udało mi się opublikować w roku 2021 w czasopiśmie Composite Structures, Volume 255 w pracy pt. "Impact damage response of L-type corner joints connected with new innovative furniture fasteners in wood-based composites panels" **A.3**. Zwieńczeniem badań nad właściwościami opisywanych złączy była publikacja pt. „Numerical modelling of stiffness of RTA furniture with new externally invisible and dismountable joints" **A.2** opublikowana w 71 wydaniu czasopisma Drvna Industrija. Powyżej wspomniany artykuł traktował o sztywności korpusów meblowych, analizowanych w warunkach symulacji komputerowej. Publikację można uznać za zwieńczenie badań, ponieważ dotyczyła korpusów mebli zasymulowanych na podstawie wyników badań z wcześniejszych publikacji.

Złącze przesuwno-rozporowe było obiektem badań opublikowanych przeze mnie w czasopiśmie MDPI Materials 2021, 14 pt. „Analysis of the internal mounting forces and strength of newly designed fastener to joints wood and wood-based panels" **A.4** oraz omówionych na konferencji „VI International Furniture Congress" poprzez wystąpienie pt. "Design and evaluation of the strength of a new externally invisible fastener by numerical analysis for cabinet furniture joints" **D.2** w Trabzon w Turcji. Współpracując z „VOX Sp. z o.o." byłem współautorem dwóch zgłoszeń patentowych. Pierwszym z nich jest mechanizm pozycjonowania siedziska z roku 2015 **E.3**, drugim jest już przyznany patent **E.2** dotyczący mechanizmu przesuwno-obrotowego drzwi meblowych.

D.1 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J., Prekrat S. (2019) Numerical Modelling of Stiffness of RTA Furniture with New Externally Invisible and Dismountable Joints. 30th International Conference on Wood Science and Technology (ICWST), 70th Anniversary of Drvna industrija Journal. Implementation of Wood Science In Woodworking Sector, Zagreb, 12th - 13th December 2019, pp. 253.

D.2 Smardzewski J., Krzyżaniak Ł., Kuşkun T., Kasal A. (2020) Design and evaluation of the strength of a new externally invisible fastener by numerical analysis for cabinet furniture joints. VI International Furniture Congress. Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Department of Forest Industry Engineering 61080 - Trabzon, Turkey, 02-05 November 2020, IFC 2020 (http://www.kongre2020.com/site.php?http://www.ktu.edu.tr/ifc2020).

Jestem również współautorem dwóch przyznanych patentów oraz sześciu zgłoszeń wzorów użytkowych o zasięgu europejskim. Przyznany patent **E.1** dotyczy rozwiązania stanowiącego stabilizator ściany tylnej, przeznaczony do mebli skrzyniowych. Zasada działania stabilizatora polega na skutecznym ściśnięciu ściany tylnej we wpuście poprzez zastosowanie mechanizmu klinowego. Jeśli chodzi o rozwiązanie **E.1** jestem jego głównym wykonawcą oraz autorem. Rozwiązanie **E.2** dotyczy mechanizmu drzwi przeznaczonych do mebli skrzyniowych, zapewniającego możliwość jednoczesnego obracania oraz przesuwania drzwi. W kwestii wymienionego zgłoszenia **E.2** jestem współautorem rozwiązania i moja rola polegała na opracowaniu rozwiązań mechanicznych. Rozwiązania **E.4-E.10** dotyczą pracy w interdyscyplinarnym zespole, którego byłem częścią. Moim wkładem w zgłoszenia wzorów użytkowych **E.4-E.10** było opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych, z pominięciem rozwiązań estetycznych. Moja działalność w zakresie wynajdowania nowych rozwiązań z zakresu innowacji dla meblarstwa nie ogranicza się jedynie do współpracy z jednostkami badawczymi czy usługami dla przemysłu. Obecnie ukończyłem optymalizację nowego systemu łączenia elementów płytowych mebli skrzyniowych, opierającego się o mechanizm zaczepowy bazujący na wygiętym o 90 stopni trzpieniu, który generuje znaczący poziom sił montażowych, przy jednoczesnej niewidoczności o prostocie działania. W przypadku powyższego rozwiązania, jest to rozwiązanie opracowane całkowicie prywatnie, jestem na etapie tworzenia zastrzeżeń patentowych we współpracy z biurem patentowym specjalizującym się w tego typu rozwiązaniach.

Przyznane patenty

E.1 Krzyżaniak Ł., Smardzewski J. (2021) Stabilizator ściany tylnej, zwłaszcza do mebli skrzyniowych. P.425831 / Pat.239103. Klasyfikacja MKP A47B 96/00, Data zgłoszenia 2018-06-06, Data wydania decyzji o udzieleniu patentu: 2021-08-10. Data publikacji WUP: 2021-11-08

E.2 Barański M., Łyskawiński G., Peliński K., Krzyżaniak Ł., (2018) Mechanizm przesuwno-obrotowy drzwi, zwłaszcza do mebli skrzyniowych i szkieletowych. Zgłoszenie oznaczono numerem: P.425760. Data zgłoszenia 2018-05-28, Klasyfikacja MKP E06B 3/42 E06B 3/46 E06B 3/32 E05D 15/06

Zgłoszone patenty

E.3 Smardzewski J., Matwiej Ł., Krzyżaniak Ł., Matusiak P., Voelkel P., (2015) Mechanizm pozycjonowania siedziska. Zgłoszenie oznaczono numerem: P.414228. Data zgłoszenia 2015-09-29, Klasyfikacja MKP A47C 1/032, A47C 3/02, A47C 3/025, A47C 3/026, A47C 7/02

Europejskie wzory użytkowe

E.4 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0001, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.5 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0002, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.6 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0003, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.7 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0004, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.8 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0005, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.9 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0006, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

E.10 Jolanta Usarewicz-Owsian, Marek Owsian, Jerzy Smardzewski, Łukasz Krzyżaniak, (2021). Wzór wspólnotowy. Locarno 06.05, 06.06. Composite furniture, Modular furniture, Sections for furniture, Furniture parts. Owner: Tomasz Kasprzak, Albin Zientek, Złote Łąki 9/7, 62-811 Kościelna Wieś, POLONIA. Design number 008432868-0007, Filing date 11/02/2021, Registration date 11/02/2021, Expiry date 11/02/2026, Design status Registered and fully published (A.1.), Reference AA5/90/2021, Bulletin number 2021/032, Applications published under Articles 48 and 50 CDR, https://euipo.europa.eu/eSearch/

Jestem wykonawcą jednego projektu badawczego finansowanego przez NCBiR. Projekt dotyczy opracowania innowacyjnej płyty meblowej znajdującej zastosowanie w branży meblarskiej **F1**. Główną cechą wymienionej płyty z założenia jest mała masa oraz rdzeń posiadający właściwości auksetyczne. Moim zadaniem jest opracowanie technologii produkcji takiej płyty oraz sporządzenie zapisu konstrukcji maszyn i urządzeń niezbędnych do wytworzenia prototypu.

F.1 Smardzewski J., Peliński K., Krzyżaniak Ł. (2021) Lekkie drewnopochodne płyty komórkowe z auksetycznymi rdzeniami. Projekt finansowany przez NCBiR w ramach TANGO-IV-A/0022/2019 od 01.09.2021 do 30.11.2022.

Byłem wykonawcą czterech projektów badawczych finansowanych z źródeł zewnętrznych. Wszystkie projekty dotyczyły opracowania technologii montażu mebli. W przypadku pozycji **G.1** projekt bazował na złączu skrętno-sprężnym, który za względu na poziom innowacyjności pozwolił mi na uczestnictwo w projekcie pt. InnCOM_PULS, zwanym również „Inkubator Innowacyjności +". Owocem realizacji projektu było zgłoszenie patentowe złącza skrętno-sprężnego **C.2**, złącza przesuwno-zaczepowego **C.1** oraz rozwiązania z już przyznanym patentem w postaci stabilizatora ściany tylnej **E.1.** Wszystkie z wymienionych rozwiązań zaprezentowano na targach MTP Arena Design w roku 2018. W roku 2019 rozpocząłem realizację drugiej edycji projektu znanego jako „Inkubator Innowacyjności 2.0" którego zwieńczeniem było zgłoszenie patentowe ulepszonej wersji złącza przesuwno-zaczepowego **C.3**. Dopracowanie złącza przesuwno-zaczepowego polegało na optymalizacji pod docelową technologię wytwarzania tj. wtrysku oraz zbadaniu właściwości złączy wykonanych w tejże technologii. Podczas przebiegu mojej pracy doktorskiej zaprojektowałem oraz przebadałem inne rozwiązania z zakresu połączeń meblowych, również komercyjnie. Przykładem takiego działania jest złącze przesuwno-rozporowe zrealizowane dla firmy „Wilrobi Sp. z o.o." **G.3** zgłoszone do ochrony w Urzędzie Patentowym RP w roku 2019 **C.4**. którego jestem głównym autorem.

G.1 Smardzewski J., Krzyżaniak Ł., Kuchciak K. (2019) Projekt "Inkubator Innowacyjności 2.0" w ramach ustanowionego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu pozakonkursowego pn. „Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 (Działanie 4.4), Umowa MNiSW/2019/170/DIR pt. „EkoBioFood 2.0 – PULS PLANTINOVA" z dnia 11.06.2019 r. Całkowita wartość projektu: 1 371 111,12 PLN. Wartość realizowanych prac przedwdrożeniowych pt. „Meble gotowe do montażu bez użycia narzędzi", 52.000,00 zł. Umowa NR 1/ININ 2.0/UW/2019.

G.2 Smardzewski J., Krzyżaniak Ł. (2020) Projekt "Inkubator Innowacyjności 2.0" w ramach ustanowionego przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego projektu pozakonkursowego pn. „Wsparcie zarządzania badaniami naukowymi i komercjalizacja wyników prac B+R w jednostkach naukowych i przedsiębiorstwach", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 (Działanie 4.4), Umowa MNiSW/2019/170/DIR pt. „EkoBioFood 2.0 – PULS PLANTINOVA" z dnia 11.06.2019 r. Całkowita wartość projektu: 1 371 111,12 PLN. Wartość realizowanych prac przedwdrożeniowych pt. „Przesuwno-zaczepowe zewnętrznie niewidoczne połączenia do mebli", 50.000,00 zł. Umowa NR 1/ININ 4.0/UW/2020.

G.3 Smardzewski J., Krzyżaniak Ł. (2019) Opracowanie koncepcji innowacyjnego połączenia umożliwiającego łączenie elementów skrzyniowych wykonanych z MDF, HDF, sklejki, płyty wiórowej lub drewna przez użytkownika końcowego, bez użycia narzędzi lub przy znikomym ich udziale. Umowa o powierzenie grantu GRANT2/102 w ramach FE FRR 1.2.2 „Bon na usługi badawcze" RPOWP, Umowa z dnia 30.09.2019. Wartość 92.000,00 zł.

Kolejnym przykładem mojego zaangażowania w zacieśnianie współpracy nauki z przemysłem jest współpraca z firmą „AWA Home Sp. z o.o." **H.1** która skutkowała wykonaniem projektu skrzyniowych mebli systemowych będących obiektem serii zgłoszeń do Europejskiego Urzędu Patentowego w formie wzorów użytkowych **E.4-E.10**. Moim głównym zadaniem było opracowanie technologii montażu mebli wspomnianych mebli oraz opracowanie kompleksowej dokumentacji konstrukcyjnej.

H.1 Smardzewski J., Usarewicz-Owsian J., Owsian M., Krzyżaniak Ł. (2020) Zakup usługi polegającej na stworzeniu mebli modułowych z innowacyjnymi rozwiązaniami w ramach sterowania internetem rzeczy IoT i zmniejszeniem masy mebli. AWA HOME Tomasz Kasprzak, Osiedle Złote Łąki nr 9, lok. 7, Kościelna Wieś, 62-811 Kalisz, NIP: 6181323677, REGON: 383859435. Umowa na wykonanie badań naukowych nr 43/2020/B z dnia 30.06.2020, kwota zlecenia 328 000,00 zł. Dotyczy umowy o oddzielenia wsparcia Nr POIR.02.03.02-30-0044/19-00 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014-2020 Poddziałanie 2.3.2 Bony na innowacje dla MŚP.

3. Przedmiot badań

3.1 Wprowadzenie

Współczesny przemysł drzewny, a w szczególności meblowy nieustannie zmierza w kierunku optymalizacji kosztów produkcji oraz kosztów związanych z logistyką. W związku z powyższym produkcja mebli dyskontowych w postaci zmontowanych brył okazuje się rozwiązaniem niekorzystnym pod względem kosztów transportu. Jednym z ostatnich procesów technologicznych w produkcji mebli jest montaż, przeniesienie tego procesu do domu użytkownika jest skutecznym sposobem zmniejszania objętości mebla na czas transportu i finalnie ceny produktu [1]. Dystrybucja mebli w formie płaskiej paczki, wymaga zastosowania odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych. Wielu autorów podkreśla, że miarą jakości konstrukcji mebli skrzyniowych jest ich sztywność oraz wytrzymałość [2][3][4][5][6][7][8]. Znaczący wpływ na tą jakość wywierają węzły konstrukcyjne [9][10]. Ze względu na powszechność mebli do samodzielnego montażu, istnieje wiele doniesień opisujących właściwości mechaniczne połączeń meblowych wykonanych z zastosowaniem łączników mechanicznych. Wiele z pośród nich wyróżnia się możliwością wielokrotnego montażu i demontażu [11][12][13][14]. Część zaś to śruby, wkręty i mimośrody sprawdzone i zaakceptowane przez praktykę [11][12][13]. Cechą charakterystyczną tych łączników jest konieczność doprowadzenia energii zewnętrznej niezbędnej do wygenerowania sił montażowych. Siły te najczęściej dociągają elementy połączenia do siebie. Najczęściej spotykanym sposobem wywołania sił montażowych w połączeniu jest dokręcanie śrub, mimośrodów, wsuwanie klinów, przemieszczanie zaczepów, zwiększenie lub zmniejszenie objętości łączników, odpowiednio przy użyciu śrubokrętów, elektronarzędzi, wirującego pola magnetycznego, młotków, generatorów ciepła lub ultradźwięków. Liczba zmiennych, mających bezpośredni wpływ na sztywność i wytrzymałość połączenia jest oczywiście bardzo duża. Racjonalne było by zatem określenie jak wybrane spośród tych czynników wielkości wpływają na właściwości połączenia. Wartość sił montażowych pomiędzy łączonymi elementami można by uznać za kryterium oceny jakości połączenia. Zwykle badania określające wartości sił montażowych mają charakter symulacji komputerowych przy użyciu metody elementów skończonych *MES* [1][8][15][16][17]. Wyniki tych obliczeń nie były jednak weryfikowane eksperymentalnie. Na podstawie wiedzy autora dotychczas nie dokonano pomiaru wartości sił montażowych i nie określono wpływu wartości tych sił na sztywność oraz wytrzymałość połączeń meblowych. Wspominane badania określają właściwości połączeń meblowych w symulowanych warunkach eksploatacji, których integralną częścią było wprowadzenie badanej konstrukcji w stan obciążenia i rejestracja stopnia ich odkształcenia czy zniszczenia. Istnieje wiele doniesień związanych z konstrukcjami mebli skrzyniowych oraz połączeń kątowych, które za miarę wytrzymałości uznają maksymalną siłę niszczącą [12], [5], [18], [14]. Maksymalny moment zginający (Nm) jest kolejnym parametrem powszechnie stosowanym jako miara wytrzymałości połączeń [19], [20], [21], [22], [23], [24]. W celu opisywania sztywności połączenia zwykle stosuje się iloraz momentu zginającego i kąta obrotu połączenia kątowego (Nm/rad) określany jako współczynnik sztywności [8], [7], [25], [26], [27], [28]. Pierwsza praca opisująca mechanikę zniszczeń połączeń kątowych [29] wykorzystuje badania połączeń typu L wykonanych z płyt o strukturze plastra miodu, pod obciążeniem statycznym i dynamicznym, z uwzględnieniem pomijanych wcześniej aspektów montażowych. Istnieją badania określające zależność pomiędzy

sposobem mocowania łączników a niezawodnością obciążanych połączeń [30]. W pracy [31] autorzy wykazali, że ważnym czynnikiem determinującym wytrzymałość połączeń jest rodzaj materiału, z którego wykonane są łączone elementy oraz rodzaj łącznika. Jest to jednak kolejny przykład pracy, w której brakuje dokładnego opisu mechaniki zniszczeń. Istotny postęp w analizie uszkodzeń połączeń meblowych przedstawia praca [32] w obliczeniach zastosowano metodę analizy numerycznej *MES*, a uzyskane wyniki pozwoliły na identyfikację miejsc o największym poziomie odkształceń i zniszczeń w złożonej konstrukcji szkieletu krzesła. W kolejnych pracach [33], [34], [35] zastosowano metodę analizy prawdopodobieństwa znaną jako rozkład Weibulla. Wspomnianą metodę wykorzystano do określenia wytrzymałości wzmocnionych tkaniną połączeń mimośrodowych. Autor zauważył, że w próbach rozwierania pękały połączenia od wewnątrz wzdłuż krawędzi elementów płytowych. W testach zwierania zniszczenia wystąpiły z zewnątrz i na frontach elementów. Zbadano również wpływ luzów technicznych między kołkiem a gniazdem na rozkład naprężeń w połączeniach meblowych typu T [36], próbując przewidzieć stany uszkodzeń metodą elementów skończonych. Innowacyjną metodę numerycznego modelowania sztywności i wytrzymałości połączeń w meblach skrzyniowych opisuje praca [37], w której uwzględniony został wpływ temperatury i wilgotności względnej na właściwości mechaniczne połączeń. Metoda elementów skończonych została niejednokrotnie wykorzystana [38], [1] celem wyznaczenia konkretnych miejsc w konstrukcjach meblowych, w których mogłoby powstać zniszczenie podczas fizycznych testów. Wszystkie wspomniane osiągnięcia odnoszą się jedynie do wpływu obciążeń statycznych. Cechą charakterystyczną obciążeń statycznych jest działanie sił o niezmiennych w czasie wartościach, kierunkach i punktach przyłożenia względem danego ciała. Obserwacja sposobu w jaki meble są użytkowane czy transportowane, pozwala zauważyć stałe ryzyko uszkodzenia konstrukcji mebli w wyniku obciążeń nie tylko statycznych, ale także dynamicznych. Uzasadnione jest zatem stwierdzenie, że na etapie projektowania mebli potrzebne jest uwzględnianie przyszłych dynamicznych warunków eksploatacji. Niestety brakuje doniesień badawczych opisujących uszkodzenia połączeń meblowych, spowodowanych obciążeniem dynamicznym.

W wymienionych powyżej pracach badawczych brakuje badań wyjaśniających powstawanie sił montażowych i zniszczeń w złączach połączeń meblowych. Brakuje analiz prowadzących do oceny wpływu sił montażowych powstających w połączeniach na ich wytrzymałość. Nie przeanalizowano także wpływu obciążeń statycznych i dynamicznych na ilość energii pochłanianej podczas testowania połączeń. W świetle powyższych rozważań, postanowiono sformułować hipotezy badawcze których wyjaśnienie pozwoli na pozyskanie nowej wiedzy z zakresu mechaniki konstrukcji nowo zaprojektowanych złączy zaczepowych do mebli i umożliwi ocenę ich zastosowania w rozwiązaniach praktycznych.

3.2 Hipotezy badawcze

Biorąc pod uwagę rozważania zawarte w poprzednim rozdziale postanowiono sformułować następujące hipotezy badawcze:

1. Wytrzymałość oraz sztywność połączeń meblowych jest wprost proporcjonalna do wartości sił montażowych powstających podczas łączenia;

2. Wewnętrzne siły montażowe są najważniejszym kryterium determinującym wytrzymałość oraz sztywność połączeń meblowych;

3. Wewnętrzne siły montażowe wpływają na ilość energii pochłanianej przez połączenia meblowe podczas oddziaływań dynamicznych;

4. Ilość energii pochłanianej podczas odziaływania siły dynamicznej jest miarą sztywności oraz wytrzymałości połączeń meblowych.

3.3 Cel rozprawy

Celem badań było określenie wpływu wewnętrznych sił montażowych na wytrzymałość oraz sztywność nowo zaprojektowanych połączeń meblowych oraz scharakteryzowanie mechaniki procesu niszczenia połączeń, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk kontaktowych powstających w połączeniu. Celem utylitarnym pracy było zaprojektowanie innowacyjnych zewnętrznie niewidocznych złączy meblowych, posiadających potencjał wdrożeniowy oraz uzyskanie ich ochrony patentowej.

3.4 Ogólna metodyka badań

Na rycinie 1 przedstawiono ogólny schemat przebiegu prac badawczych wykonanych w ramach pracy doktorskiej i opublikowanych w czasopismach lub materiałach pokonferencyjnych. Pierwszy krok prac badawczych zakładał proces projektowy w którym zaprojektowano i poddano wstępnej analizie konstrukcje złączy. Na tym etapie możliwe było względnie swobodne modyfikowanie rozwiązania. Krok drugi zakładał ochronę patentową opracowanych rozwiązań, przy założeniu dostatecznego poziomu innowacyjności. Kolejne dwa kroki wymagały zebrania podstawowych danych dotyczących stałych sprężystości materiałów oraz pozostałych właściwości materiałów, z których wykonane były połączenia. Wstępnie określono właściwości materiału złącza, w tym przypadku poliamidu stosowanego powszechnie w procesach prototypowych wykorzystujących druk *3D*, następnie oznaczono właściwości materiałów płytowych wykorzystanych do wytworzenia łączonych elementów. Znając właściwości oraz charakterystykę materiałów, przystąpiono do wykonania serii próbek przeznaczonych do badań. Wykonanie próbek polegało na odpowiedniej obróbce elementów płytowych, w celu umożliwienia instalacji złączy i następnie stworzenia próbek kątowych tylu L. Wspomniane próbki wykonano w sposób umożliwiający przeprowadzenie badań na zwieranie oraz rozwieranie wg założonych procedur badawczych. W celu zgłębienia zjawisk zachodzących w połączeniach, ze szczególnym naciskiem na generowane siły montażowe, zastosowano analityczne metody oparte na schematach rozkładu sił oraz zasadach mechaniki klasycznej. Prowadziło to do wyjaśnienia pożądanych interakcji między

złączami i/lub łącznikami. Wnioski oraz dane uzyskane w poprzednich korkach zostały wykorzystane do stworzenia modeli numerycznych połączeń. Podjęto próbę maksymalnie rzetelnego odzwierciedlenia rzeczywistych próbek, z uwzględnieniem optymalizacji wpływającej na czas obliczeń i symulacji komputerowej. Zjawiska zachodzące pomiędzy łączonymi elementami odzwierciedlono stosując odpowiednie kontakty i wiązania. Dalej prowadzono badania numeryczne w celu wyznaczenia sił montażowych generowanych w połączeniach oraz określenia charakterystyk wytrzymałościowych. Kolejność działań nie była przypadkowa, ponieważ dane uzyskane po analizie numerycznej sił montażowych zostały wykorzystane w numerycznej analizie wytrzymałościowej. Etapem uzupełniającym analizę numeryczną były rzeczywiste testy wykorzystujące fizyczne próbki. Próbki typu L poddano zwieraniu oraz rozwieraniu, w próbach statycznych oraz dynamicznych. Dywersyfikacja rodzajów prób oraz sposobów obciążania miała na celu uzyskanie jak najbardziej rzetelnych i szerokich charakterystyk wytrzymałościowych połączeń. Analizowanie wyników obejmowało porównanie zależności między siłami a przemieszczeniami wyznaczonymi numerycznie i eksperymentalnie. Następnie analizowano siły montażowe w połączeniu oraz interakcję pomiędzy powierzchniami wewnątrz złączy. Istotnym etapem realizowanej metody była ocena wartości sił montażowych w zależności oraz rodzaju użytych materiałów i sposobu obciążenia zewnętrznego na sztywność i wytrzymałość połączeń meblowych. Każda praca badawcza powinna zostać zwieńczona wnioskami oraz spostrzeżeniami, które stanowią pewnego rodzaju interpretację uzyskanych wyników oraz obserwacji. W związku z powyższym badania zakończono opisem zawierającym wnioski i spostrzeżenia, które stanowią nie tylko źródło nowej wiedzy na temat mechaniki połączeń, ale także mogą być punktem wyjścia do kolejnych badań.

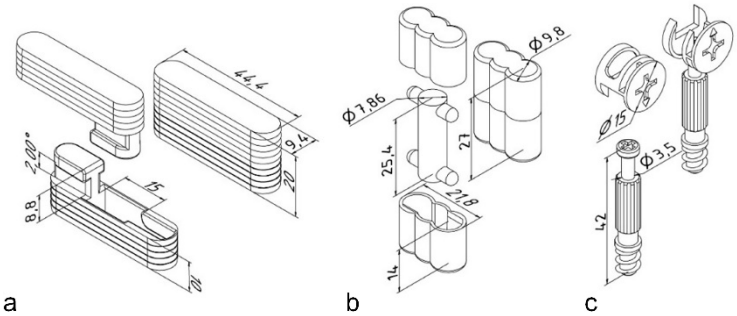
Ryc. 1. Metodologia przeprowadzonych prac badawczych.

3.5 Wyniki publikacji A.1. *Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases*

Realizacja tej części badań prowadziła do weryfikacji hipotezy, że na sztywność oraz wytrzymałość połączeń w największym stopniu wpływa poziom sił montażowych generowanych pomiędzy łączonymi elementami. Celem badań było określenie wpływu sił montażowych na sztywność i wytrzymałość połączeń do mebli opartych o nowo zaprojektowane złącza. W ramach badań postanowiono wykonać prototypy innowacyjnych złączy meblowych oraz ocenić ich jakość w porównaniu do najpopularniejszych w przemyśle meblowym złączy mimośrodowych.

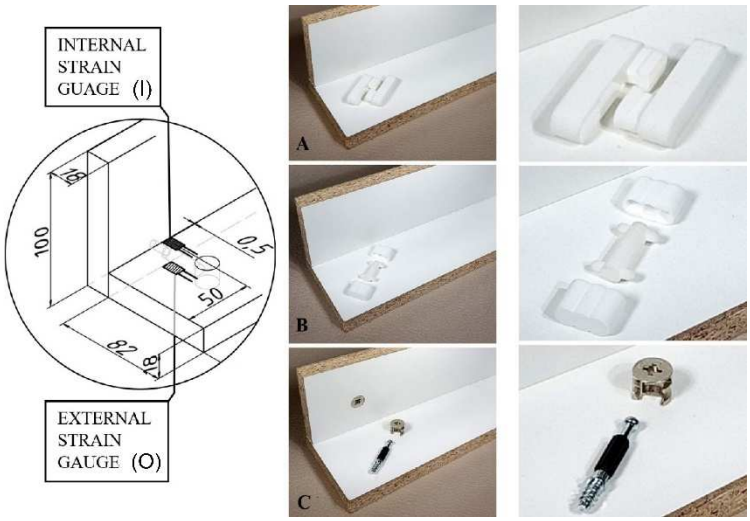
Przygotowanie łączników oraz połączeń

Do badań zaprojektowano dwa nowe, oryginalne złącza zapewniające, że połączenie elementów meblowych jest: zewnętrznie niewidoczne, łatwe do montażu bez użycia narzędzi, z możliwością demontażu, proste konstrukcyjnie, gdyż składa się z minimalnej liczby identycznych części, technologiczne, gdyż wymaga prostych operacji możliwych do wykonania na frezarce lub wiertarce (Ryc. 2). Są to: złącze przesuwno-zaczepowe *(S)* (Ryc. 2a) oraz złącze skrętno-sprężne *(M)* (Ryc. 2b). Zaprojektowane rozwiązania konstrukcyjne zostały zastrzeżone przez zgłoszone do Polskiego Urzędu Patentowego odpowiednio pod numerem P.423160 oraz P.423338. W celu oceny jakości tych złączy jako referencyjne zastosowano także łącznik mimośrodowy *(E)* Hettich® z trzpieniem Twister DU 320 T i puszką mimośrodu Rastex 15 (Ryc. 2c). Do badań wykorzystano płytę wiórową *(PB)* oraz płytę pilśniową średniej gęstości *(MDF)* o grubościach 18 (mm).



Ryc. 2. Złącza wykorzystane do badań: a) przesuwno-zaczepowe *(S)* P.423160, b) złącze skrętno-sprężne *(M)* P.423338, c) łącznik mimośrodowy *(E)* Hettich®.

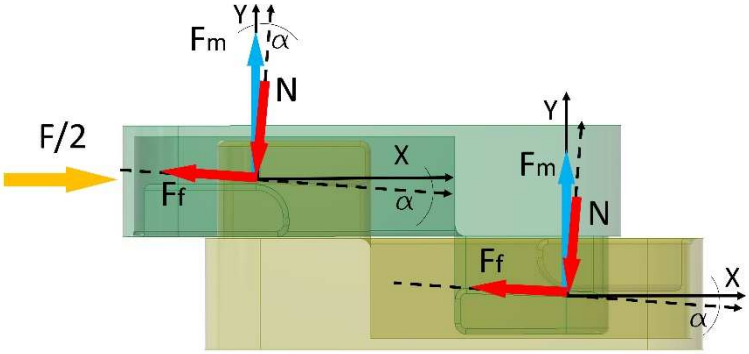
Badania eksperymentalne postanowiono wykonać na połączeniach kątowych typu L. Ich kształt przedstawiono na rycinie 3. Długość połączeń była równa 400 (mm). Na górnej i dolnej powierzchni krótszego ramiona połączenia naklejono dwa tensometry. Zadaniem tensometrów było dostarczenie wyników do obliczeń naprężeń normalnych wywołanych siłami montażu w ramionach połączeń.



Ryc. 3. Połączenia użyte do badań, wykorzystujące odpowiednie mechanizmy łączące: a) przesuwno-zaczepowe *(S)*, b) skrętno-sprężne *(M)*, c) mimośrodowe *(E)*.

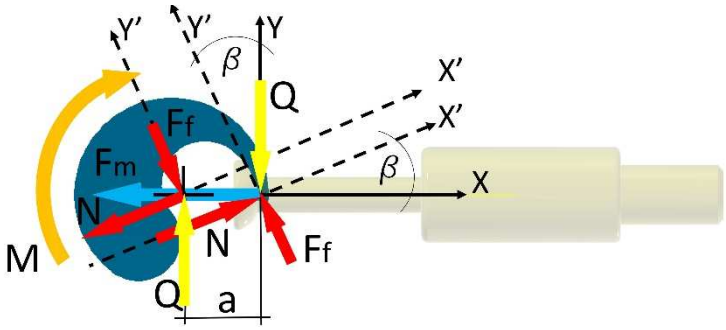
Określenie sił montażowych

Analiza geometrii złączy zaproponowanych do badań oraz próby wstępne wykazały, że podczas montażu złączy skrętno-sprężnych *(M)* nie występują siły montażowe które mogły by dociskać ramiona połączeń do siebie. W przypadku złączy przesuwno-zaczepowych *(S)* siły montażu F_m (N) powstają na skutek przesunięcia powierzchni klinów siłą zewnętrzną F (N) wywołaną przez użytkownika (Ryc. 4).



Ryc. 4. Rozkład sił wewnętrznych w złączu przesuwno-zaczepowym *(S)*.

Na podstawie badań eksperymentalnych wykazano, że średnia wartość siły zewnętrznej F (N) dla połączeń wykonanych z *PB* jest równa 310 (N), SD = 36 (N), zaś dla połączeń wykonanych z *MDF* jest równa 385 (N), SD = 55 (N). Na tej podstawie obliczono odpowiednie siły montażowe F_m (N) dla połączeń z *PB* 352 (N) oraz dla połączeń z *MDF* 438 (N). Montaż połączeń z mimośrodami wymagał zastosowania wkrętaka dynamometrycznego. Zewnętrzny moment montażowy M (Nm) dla połączeń z *PB* był równy 2.4 (Nm), a dla połączeń z *MDF* 2 (Nm). Na rycinie 5 przedstawiono rozkład sił wewnętrznych w połączeniu mimośrodu z trzpieniem.

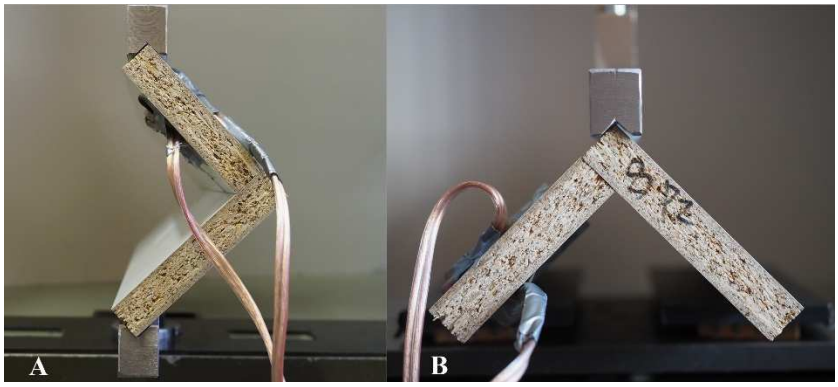


Ryc. 5. Rozkład sił wewnętrznych w łączniku mimośrodowym (E).

Na podstawie danych eksperymentalnych obliczono odpowiednie siły montażowe F_m (N) dla połączeń z *PB* 840 (N) oraz dla połączeń z *MDF* 700 (N).

Badania wytrzymałościowe

Podczas montażu połączeń rejestrowano zmiany napięcia w obwodzie mostka tensometrycznego wywołane skróceniem tensometrów przez siły montażowe. Następnie połączenia umieszczano w maszynie wytrzymałościowej Zwick 1445 poddając je odpowiednio zwieraniu i rozwieraniu (Ryc. 6). Metodykę pomiaru siły oraz ugięcia próbek szczegółowo opisano w pracach [1],[17],[23],[24].



Ryc. 6. Połączenia poddane: a) zwieraniu, b) rozwieraniu.

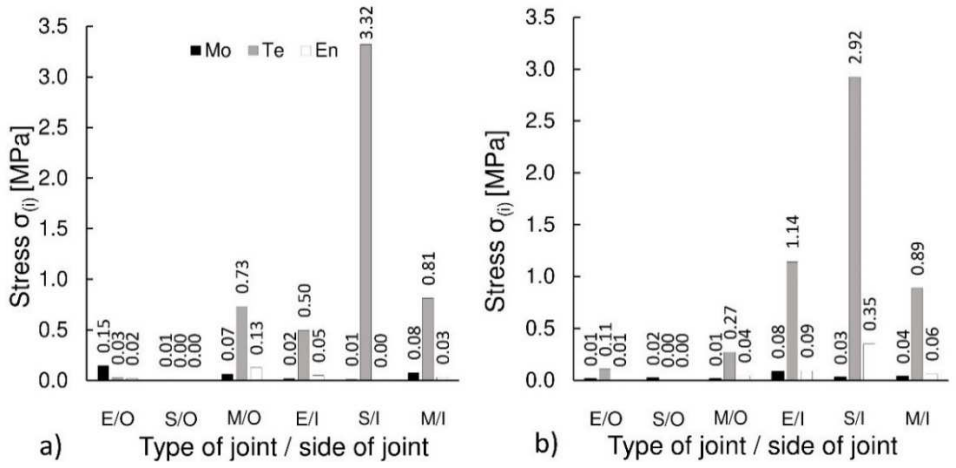
Obliczenia numeryczne wykonano z zastosowaniem oprogramowania Abaqus v.6.16 Geometria, warunki podparcia i obciążenia połączeń były one zgodne z przyjętą wcześniej metodyką. Do obliczeń przyjęto odpowiednie wartości obciążeń montażowych F_m (N) wyznaczone w wcześniejszym etapie pracy oraz maksymalne wartości obciążeń *P* na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

Wytrzymałość i sztywność połączeń

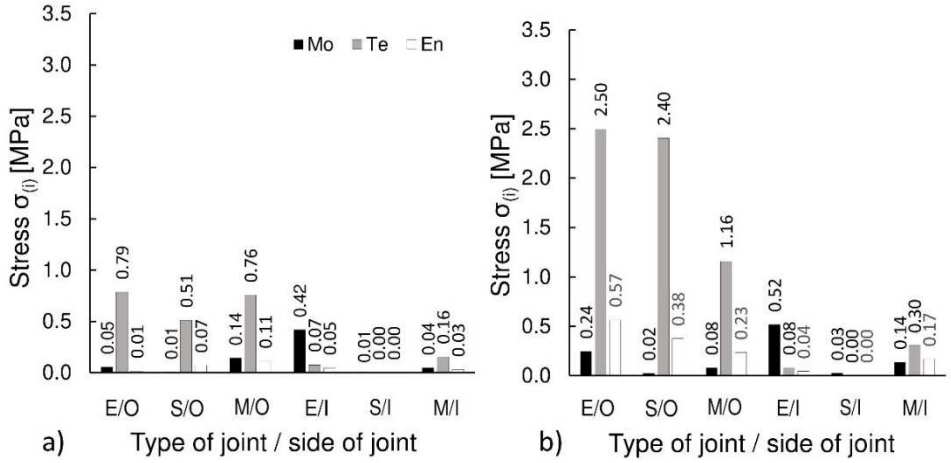
Wyniki badań dowiodły, że zastosowanie płyt *MDF* zdecydowanie poprawia wytrzymałość wszystkich połączeń w próbach rozwierania oraz wytrzymałość połączenia z łącznikami mimośrodowymi *(E)* w próbie zwierania. Zatem sztywniejsze warstwy zewnętrzne płyty *MDF* korzystniej wzmacniają wytrzymałość zastosowanych połączeń meblowych. Stwierdzono, że w próbie zwierania, próbki oparte na złączach przesuwno-zaczepowych *(S)* przedstawiły sztywność 1,57 (kNm/rad) dla próbek wykonanych z płyty wiórowej *PB* oraz 1,73 (kNm/rad) dla próbek wykonanych z *MDF*. Połączenia *(M)* zarówno w próbie zwierania jak i rozwierania wykazały najmniejsze wartości współczynnika sztywności względem próbek *(S)* oraz *(E)*, były równe odpowiednio 0,65 (kNm/rad) dla próbek wykonanych z płyty wiórowej oraz 0,70 (kNm/rad) dla próbek wykonanych z płyty *MDF*. W związku z powyższym, zwiększenie sztywności o 7,7% na korzyść płyty *MDF* świadczy o nieznacznym wpływie materiału na sztywność zwieranych połączeń typu *(M)*. Połączenia *(M)* w próbie rozwierania uzyskały sztywność na poziomie 2,67 (kNm/rad]) dla próbek z płyty wiórowej oraz 2,89 (kNm/rad) dla próbek z *MDF*. Zatem podobnie jak w próbie na zwieranie, przy zastosowaniu płyty *MDF* sztywność zwiększyła się, dokładnie o 8,2% co potwierdza nieznaczny wpływ rodzaju materiału na sztywność rozpatrywanych połączeń.

Siły montażowe w połączeniu

Siły montażowe generowane w niektórych złączach, przekładają się bezpośrednio na sztywność i wytrzymałość połączeń. Połączenia typu *(M)* pod względem mechanicznym nie wytworzyły sił montażowych, lub ich wartość była pomijalnie mała. Natomiast wykazano, że siły montażowe F_m (N) dla połączeń *(S)* wykonanych z *PB* są równe 352 (N), z *MDF* 438 (N), a dla połączeń z mimośrodami *(E)* odpowiednio 840 (N) oraz 700 (N). Na rycinach 7-8 zilustrowano wyniki pomiarów naprężeń normalnych $\sigma_{(i)}$ w wybranych miejscach połączeń. Z rycin tych wprost wynika, że naprężenia wywołane siłami montażowymi w połączeniach ze złączami *(S)* i *(E)* zależą od strony, na której naklejono tensometr oraz rodzaju zastosowanego materiału.



Ryc. 7. Naprężenia w próbkach kątowych wykonanych z płyty wiórowej *PB* (a) oraz płyty *MDF* (b) w próbie zwierania, gdzie: *O* – strona zewnętrzna połączenia, *I* – strona wewnętrzna połączenia, *Mo* – naprężenia montażowe, *Te* – naprężenia podczas zwierania, *En* – naprężenia po odciążeniu.



Ryc. 8. Naprężenia w próbkach kątowych wykonanych z płyty wiórowej *PB* (a) oraz płyty *MDF* (b) w próbie rozwierania, gdzie: *O* – strona zewnętrzna połączenia, *I* – strona wewnętrzna połączenia, *Mo* – naprężenia montażowe, *Te* – naprężenia podczas zwierania, *En* – naprężenia po odciążeniu.

Wpływ sił montażowych na wytrzymałość połączeń potwierdzają także rezultaty obliczeń numerycznych. W tabeli 1 zestawiono wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych, połączeń poddanych zwieraniu i rozwieraniu. Zestawione w tabeli 1 wartości ugięć połączeń oraz naprężenia wykazują zadowalającą zgodność obliczeń numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych. Można z pełnym przekonaniem stwierdzić, że największą wytrzymałość wykazują połączenia ze złączami typu *(S)* następnie *(E)* a najmniejszą wytrzymałością charakteryzują się połączenia typu *(M)*. Prawidłowość ta ma związek z wytworzonymi siłami montażowymi F_m (N). Korzystna konstrukcja połączenia ze złączami typu *(S)* powoduje mniejsze, bardziej równomiernie rozłożone naprężenia montażowe w porównaniu do skoncentrowanych naprężeń wywołanych w połączeniach zawierających trzpień i mimośród. Ponadto sztywność połączeń opartych o złącza *(S)* i *(E)* dominuje nad sztywnością połączeń ze złączami typu *(M)* u których nie wywołano sił montażowych.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych, gdzie *P* (N) siła obciążająca połączenie, *DP* (mm) ugięcie próbki, *Mo, Te* odpowiednio naprężenia normalne spowodowane przez siły montażowe F_m lub siłę *P*.

Rodzaj próby	Materiał	Rodzaj złącza	Siła	Badania eksperymentalne			Analiza numeryczna		
			P (N)	*DP* (mm)	*Mo* (MPa)	*Te* (MPa)	*DP* (mm)	*Mo* (MPa)	*Te* (MPa)
Zwieranie	*MDF*	*S*	405	6.89	0.03	2.92	6.08 (-11.8)	0.02	3.36 (15.1)
		M	153	8.60	0.04	0.89	8.14 (-5.3)	0.00	1.00 (12.4)
		E	183	3.40	0.08	1.14	3.51 (3.2)	0.14	1.32 (15.8)
	PB	*S*	449	8.54	0.01	3.32	8.67 (1.5)	0.03	3.95 (19.0)
		M	152	8.70	0.08	0.81	8.35 (-4.0)	0.00	0.98 (21.0)
		E	178	3.06	0.02	0.50	3.50 (14.4)	0.17	0.57 (14.0)
Rozwieranie	*MDF*	*S*	899	4.68	0.02	2.40	4.22 (-9.8)	0.02	2.68 (11.7)
		M	316	6.30	0.08	1.16	6.72 (6.7)	0.00	1.31 (12.9)
		E	548	6.67	0.24	2.50	6.60 (-1.0)	0.14	2.79 (11.6)
	PB	*S*	689	4.15	0.14	0.51	4.88 (17.6)	0.10	0.58 (13.7)
		M	259	6.10	0.01	0.76	6.42 (5.2)	0.00	0.86 (13.2)
		E	446	3.98	0.05	0.79	3.38 (-15.1)	0.17	0.92 (16.6)

Rezultaty przeprowadzonych badań, pozwalają stwierdzić, iż osiągnięto wszystkie zakładane cele badań, począwszy od wykonania projektów i prototypów innowacyjnych złączy meblowych, skończywszy na zbiorze charakterystyk opisujących właściwości połączeń wykonanych w oparciu o wspomniane złącza. Analiza wyników, pozwoliła zweryfikować hipotezę, że siły montażowe w największym stopniu wpływają na sztywność oraz wytrzymałość połączeń meblowych. Korzystna konstrukcja połączenia ze złączami typu *(S)*, z dwoma zaczepami, powoduje równomierny rozkład naprężeń montażowych w porównaniu do skoncentrowanych naprężeń wywołanych przez trzpień i mimośród w połączeniu z łącznikiem typu *(E)*. Można z pełnym przekonaniem stwierdzić, że największą wytrzymałość wykazują połączenia ze złączami typu *(S)* następnie *(E)*, a najmniejszą wytrzymałością charakteryzują się połączenia zbudowane w oparciu o złącze *(M)* w których nie wywołano siły montażowej. Zastosowanie płyt *MDF* zdecydowanie poprawia wytrzymałość wszystkich połączeń w próbach rozwierania oraz wytrzymałość połączenia z łącznikiem *(E)* w próbie zwierania.

Stwierdzono, że nadal uzasadnione jest poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych złączy, wykonanych z tańszych i ekologicznych materiałów, o kształcie gwarantującym duże siły montażowe, solidność osadzenia w elementach mebla i wymaganą wytrzymałość połączenia.

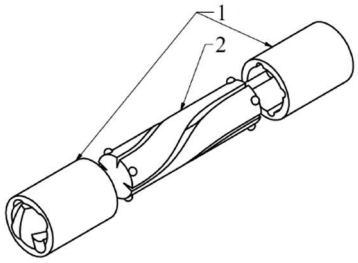
3.6 Wyniki publikacji B.1. *Modeling of Externally Invisible Cabinet Furniture Joints*

Niniejsza część badań miała na celu wyznaczenie sztywności i wytrzymałości połączeń powstałym z wykorzystaniem nowo zaprojektowanego złącza meblowego, bazującego na innowacyjnym mechanizmie skrętno-naprężnym. Badania miały na celu zweryfikować hipotezę, że wytrzymałość oraz sztywność wspomnianych połączeń meblowych nie jest bezpośrednio uzależniona od materiału, z którego wykonane jest złącze i może zależeć od innych czynników takich jak zdolność do generowania sił montażowych w połączeniach. Weryfikacja powyższej hipotezy pozwoliłaby stwierdzić, że materiał, z którego wykonane jest złącze jest cechą wtórną względem istotniejszych czynników determinujących wytrzymałość połączeń meblowych.

Przygotowanie łączników oraz połączeń

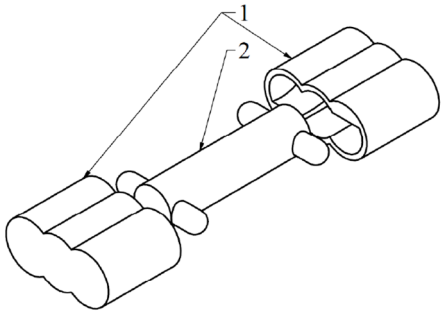
Pierwszą częścią badań było zaprojektowanie oraz wykonanie funkcjonalnych prototypów złączy. Projektując złącza skupiono się na założeniu, iż idealne połączenie meblowe powinno być bardzo proste podczas montażu, niewidoczne z zewnątrz i proste w swojej konstrukcji. Dodatkowo, za ważną cechę dobrego złącza uznano zdolność do generowania sił montażowych w połączeniu. Większość łączników dostępnych na ryku wymaga użycia narzędzi w celu akumulacji odpowiedniej ilości energii. W celu ograniczenia liczby czynności niezbędnych do złożenia konstrukcji meblowej, postanowiono zaprojektować innowacyjny mechanizm generujący energię w złączu. Głównym założeniem wspomnianego mechanizmu była akumulacja energii podczas procesu montażu, bez użycia narzędzi. Z powodów opisanych powyżej, głównie z powodu zachowania prostoty rozwiązania jako początkową formę łącznika przyjęto walec. Podjęto działania mające na celu wykoncypowanie sposobu

akumulacji energii w formie walca. Wprowadzenie momentu skręcającego uznano za najlepszą metodę akumulacji energii w łączniku, bez konieczności wprowadzania znacznej zmiany jego formy (Ryc. 9).



Ryc. 9. Koncepcja złącza skrętnego, gdzie: 1 – Mufa, 2 – Łącznik (opracowanie własne).

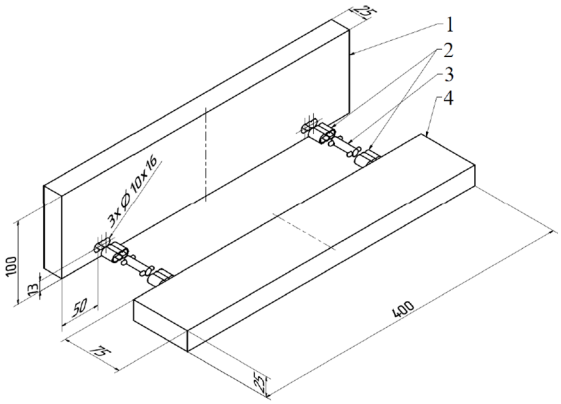
Odpowiednie wypusty wykonane u podstawy łącznika (2) (Ryc. 9) miały spowodować jego skręcenie podczas montażu w mufach (1). Energia zgromadzona w łączniku (2) w sposób opisany wcześniej miała zostać zwrócona dzięki odpowiednio wyprofilowanemu wnętrzu muf (1). Próby wykonane na prototypach, wykazały ich konstrukcja mechanizmu wymaga modyfikacji. Ulepszona wersja opisywanego rozwiązania zakładała na zamianie wypustów na raniona oraz powiększenie mufy do postaci trzech połączonych ze sobą walców. Ulepszone rozwiązanie miało gwarantować skuteczne skręcanie łącznika podczas procesu łączenia, polegającego na instalacji łącznika w środkowym gnieździe mufy (Ryc. 10).



Ryc. 10. Koncepcja udoskonalonego złącza skrętnego, gdzie: 1 – Mufa, 2 – Łącznik (opracowanie własne).

Rycina 10 przedstawia budowę złącza wybranego do eksperymentów, złączu nadano roboczą nazwę (TwiCom). Rozwiązanie składa się z pary identycznych muf (1) oraz łącznika właściwego (2). Prezentowane mufy miały być wklejone w odpowiednio ukształtowane gniazda. Odpowiednio wyprofilowane wnętrze mufy miało spowodować skręcanie łącznika, a później zwrócenie przez niego energii. Aby osiągnąć wymagany efekt zwrotu energii przez łącznik (2), konieczne jest zachowanie równoległości muf (1). Z tego powodu tworząc połączenia wykorzystujące łącznik TwiCom, należy stosować co najmniej dwa złącza. Elementy połączenia wykonano z drewna dębowego klejonego o grubości 25 (mm). Drewno przeznaczone do badań połączeń poddano sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych przy wilgotności względnej powietrza 65% i temperaturze około 25 (°C), aż do osiągnięcia stałej masy. Biorąc pod uwagę rozkładu sił wewnętrznych działających na węzły konstrukcji mebli

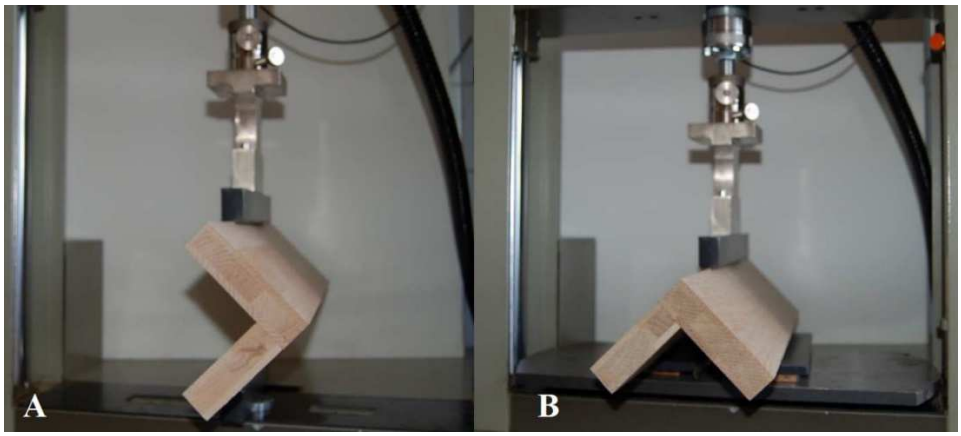
skrzyniowych, do badań postanowiono wybrać połączenie typu L. Wspominany typ połączeń jest odpowiedni do przeprowadzenia badań w próbach zwierania i rozwierania. W celu wykonania potrójnych gniazd wykorzystano wiertarkę wielowrzecionową. Forma gniazd umożliwiła łatwe instalowanie muf, zarówno w szerokiej jak w wąskiej powierzchni łączonych elementów drewnianych. Wykonanie połączenia polegało na wsunięciu łącznika w uprzednio zainstalowane mufy jednego z łączonych elementów, a następnie dociśnięciu drugiego elementu składającego się na połączenie (Ryc. 11). Przemieszczanie się łącznika wewnątrz muf łączonych elementów, miało skutkować powstaniem sił pomiędzy łączonymi elementami. Do każdego z rodzajów badań wykorzystano pięć próbek, uwzględniając próby na zwieranie oraz rozwieranie, przygotowano łącznie 10 próbek.



Ryc. 11. Konstrukcja połączenia typu L, gdzie: 1 – Element 1, 2 – Mufa, 3 – Łącznik, 4 – Element 2.

Badania wytrzymałościowe

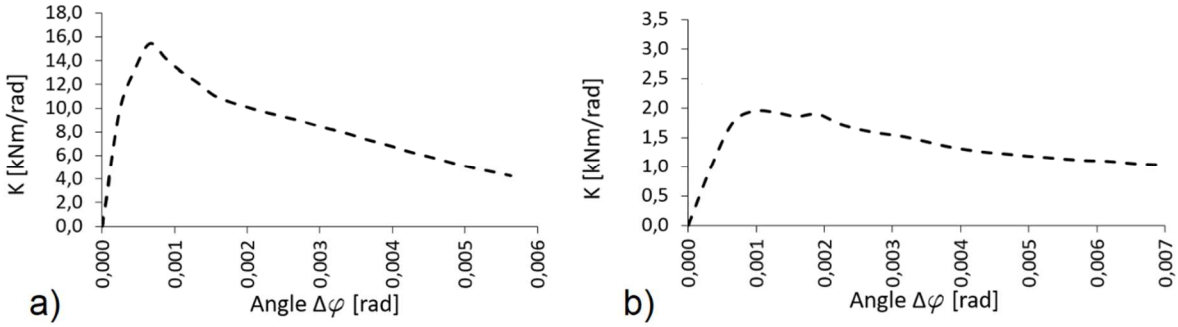
Właściwości mechaniczne połączeń określono poprzez, określenie sztywności oraz wytrzymałości w próbie zwierania i rozwierania. Również, w opisywanej pracy zastosowano metodykę badań, którą szczegółowo opisano w pracach [1],[17],[23],[24]. Rycina 12 przedstawia sposób testowania próbek w próbie zwierania i rozwierania. Eksperymenty przeprowadzono na sterowanej numerycznie maszynie wytrzymałościowej Zwick 1445.



Ryc. 12. Połączenia poddane: a) zwieraniu, b) rozwieraniu.

Wytrzymałość i sztywność połączeń

Sztywność połączenia ze złączami TwiCom przedstawiono graficznie na rycinie 13, jako zależność współczynnika sztywności K (kNm/rad) od kąta obrotu między ramionami $\Delta\varphi$ (rad)

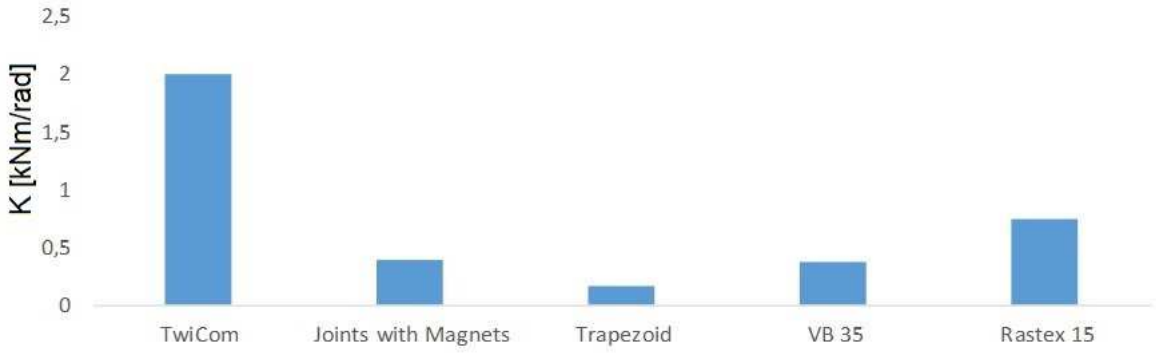


Ryc. 13. Sztywność połączeń ze złączami TwiCom: a) rozwieranych, b) zwieranych.

Test sztywności nowych połączeń w próbie zwierania (Ryc. 13b) wykazał mniej korzystne wyniki w porównaniu z próbą na rozwieranie.

Zniszczenie w przypadku rozpatrywanego połączenia polegało na wysunięciu się łącznika, co skutkowało tym, że po wykonaniu testów empirycznych, próbki można było ponownie zmontować. Żaden z łączonych elementów nie uległ fizycznemu zniszczeniu. Prawdą jest, że grubość łączonych elementów, a także materiał, z którego zostały wyprodukowane, miały wpływ na wytrzymałość badanych połączeń.

Badane połączenie zostało wykonane z elementów o grubości 25 (mm) i materiału o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych, co niewątpliwie wywarło korzystny wpływ na wyniki. Łączniki oraz mufy wykonane z tworzywa sztucznego jakim jest *ABS* charakteryzowały się bardzo małym modułem sprężystości w odniesieniu do np. metalu, z którego wykonuje się łączniki mimośrodowe. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, stwierdzono, że nowe rozwiązanie pod względem wytrzymałości dorównuje standardowym łącznikom dostępnym na rynku. Dokonano porównania wyników maksymalnej sztywności połączeń [55]. Zaobserwowano, że sztywność w próbach na zwieranie (Ryc. 13) była zadowalająca. Należy podkreślić, że na zaobserwowaną dużą sztywność nowego rozwiązania duży wpływ miał rodzaj materiału, z którego zostały wykonane łączone elementy. Próbka opisana w nieniniejszym opracowaniu została wykonana z drewna dębowego, natomiast pozostałe pozycje przedstawione na wykresie słupkowym (Ryc. 14) z materiałów drewnopochodnych. W przyszłych badaniach próbkę wykorzystującą innowacyjny łącznik należy przygotować z tworzywa drzewnego np. płyty wiórowej, aby zwiększyć relatywność oraz czytelność zestawienia porównawczego.



Ryc. 14. Porównanie maksymalnych poziomów sztywności połączeń w próbie zwierania.

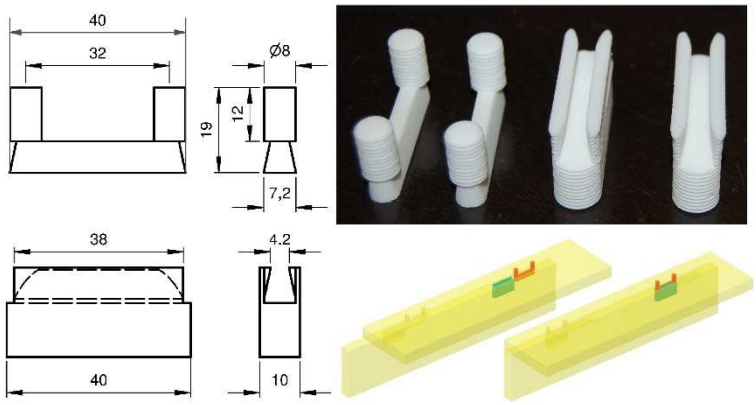
Na podstawie przeprowadzonych badań oraz całości procesu projektowego stwierdzono, że innowacyjny łącznik meblowy TwiCom zapewnia: prostą budowę, intuicyjny montaż oraz demontaż połączeń bez konieczności użycia narzędzi oraz zewnętrzną niewidoczność złączy. W związku z powyższym, cel w postaci opracowania innowacyjnego oraz funkcjonalnego złącza meblowego został osiągnięty. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały zadowalającą sztywność oraz wytrzymałość nowych połączeń względem próbek referencyjnych. Hipoteza, iż materiał, z którego wykonany jest łącznik jest cechą wtórną względem innych czynników determinujących wytrzymałość połączeń została zweryfikowana poprzez porównanie wyników sztywności nowego połączenia z połączeniami opartymi na łącznikach dostępnych na rynku, których konstrukcja w całości lub częściowo opiera się na metalu. Można było założyć, iż do innych czynników determinujących wytrzymałość oraz sztywność połączeń w największym stopniu należy zdolność łącznika do generowania sił montażowych w połączeniu, jednak weryfikacja tego założenia wymaga dalszych badań. Dodatkowo w przyszłych badaniach rozsądne wydało się wykonanie prototypu łącznika TwiCom z metalu oraz budowanie próbek z materiałów identycznych względem materiałów próbek referencyjnych, zarówno pod względem grubości jak i surowca. Godny uwagi jest fakt, iż konstrukcja złącza umożliwia relatywnie szybkie wdrożenie rozwiązania na rynek.

3.7 Wyniki publikacji A.4. *Analysis of the internal mounting forces and strength of newly designed fastener to joints wood and wood-based panels*

Realizacja kolejnej części badań prowadziła do weryfikacji hipotezy, że wewnętrzne siły montażowe są najważniejszym kryterium determinującym wytrzymałość oraz sztywność rozłącznych połączeń meblowych. Celem badań było zaprojektowanie nowego, zewnętrznie niewidocznego złącza do rozłącznego łączenia elementów meblowych oraz numeryczne i eksperymentalne określenie wpływu sił montażowych oraz rodzaju materiału na sztywność i wytrzymałość połączeń kątowych typu L.

Modele połączeń i sił montażowych

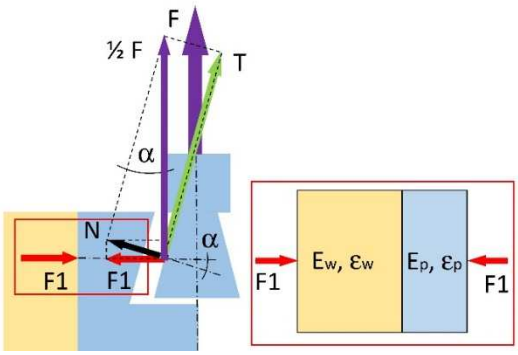
Cechą charakterystyczną zaprojektowanych złączy jest ich zewnętrzna niewidoczność po zmontowaniu mebli. Złącze składa się z dwóch elementów (Ryc. 15) z których jeden ma trapezowy wypust a drugi trapezową prowadnicę. Kształt obu elementów zapewnia samodzielność montażu bez użycia narzędzi i brak pomyłek przez użytkownika. Złożenie elementów mebli w połączenie narożnikowe polega na wzajemnym przesunięciu dwóch płyt o 40 (mm) jak to zilustrowano na rycinie 15.



Ryc. 15. Złącza meblowe i sposób montażu połączeń.

Złącza wytworzono z poliamidu o nazwie handlowej *PA12* w technologii druku *3D (SLS)*. Badania eksperymentalne wykonano na połączeniach narożnikowych typu L stosując pięć wytypowanych rodzajów materiałów: płyty *MDF*, klejone płyty *HDF*, sklejkę bukową *PL*, płytę wiórową *PB* oraz drewno bukowe *Be*.

Podczas montażu połączeń narożnikowych powstaje siła montażowa *F* (N) powodująca wzajemny docisk elementów mebla. Jej wartość ustalono w drodze analizy rozkładu sił w połączeniu (Ryc. 16).

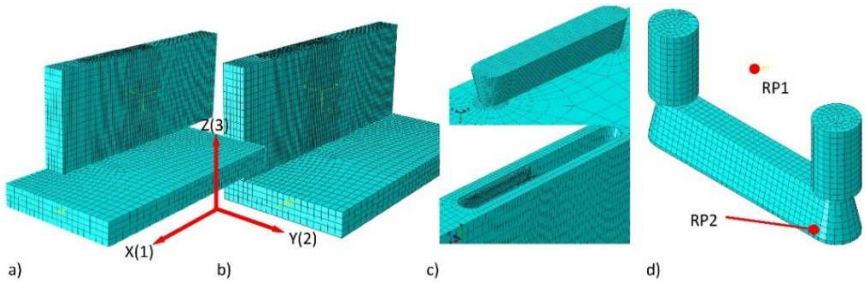


Ryc. 16. Rozkład sił wewnętrznych w złączu.

Trudnością w realizacji badań eksperymentalnych było wyznaczenie odkształceń składowych $\varepsilon_w, \varepsilon_w$ oraz odkształcenia ε. Dlatego wartość siły montażowej F (N) postanowiono wyznaczyć przez obliczenia numeryczne.

Modele numeryczne połączeń

Przygotowano modele numeryczne pozwalające obliczyć wartość sił montażowych i naprężeń kontaktowych w połączeniach narożnikowych w zależności od rodzaju materiału, z którego wykonano ramiona połączeń. Między wszystkimi ruchomymi powierzchniami połączenia zastosowano interakcje typu contact surface przypisując jednakowe wartości współczynnika tarcia 0.2. Aby odwzorować proces montażu połączeń, zdefiniowano trzy kroki dla warunków brzegowych i obciążeń. W kroku 1 (Step 1) wymuszono przesunięcie 15 (mm) w kierunku osi X(1) elementu pionowego po powierzchni elementu poziomego (Ryc. 17a). Przemieszczenie zdefiniowano w punkcie referencyjnym *RP*1 czopa (Ryc. 17d). W tym czasie zablokowano możliwość przesunięcia w innych kierunkach i obrotów względem osi X, Y, Z. Przesunięcie to pozwoliło uzyskać pierwszy kontakt czopa i gniazda w punkcie referencyjnym *RP*2 (Ryc. 17d). W kroku 2 (Step 2) w punkcie *RP*1 wymuszono dalsze przemieszczenie w kierunku osi X(1) o 25 (mm) i dodatkowo umożliwiono przemieszczenia elementu pionowego w kierunku osi Z(3). Dzięki temu odtworzono proces montażu połączenia i uzyskanie pozycji jak na rycinie 17b. Podczas tych dwóch kroków obliczono wartości siły montażowej F (N) w punkcie referencyjnym *RP*1 oraz zmianę naprężeń kontaktowych w punkcie *RP*2 na styku powierzchni czopa i gniazda.

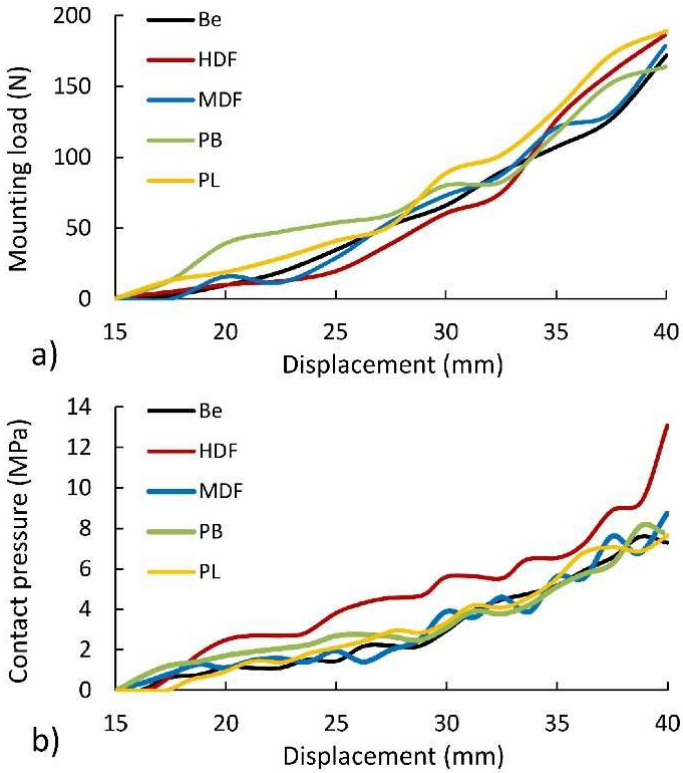


Ryc. 17. Model numeryczny do symulacji sił montażowych w połączeniu i sztywności połączenia: a) model siatkowy połączenia przed montażem, b) model siatkowy połączenia po montażu, c) czop i gniazdo, d) łącznik z punktami referencyjnymi.

W dalszej kolejności symulacji wprowadzono krok 3 (Step 3) w którym zmieniono warunki brzegowe w taki sposób, aby odpowiadały schematom statycznym zwierania i rozwierania próbek. Utworzono lokalny układ współrzędnych i przyłożono przemieszczenia DP (mm) powodujące rozwieranie i zwieranie połączenia. W tym samym czasie aktywne były siły montażowe F (N) zaistniałe w kroku 2. Na podstawie wyników obliczeń z kroku 3 wyznaczono siły reakcji P (N) powodujące określone przemieszczenia DP (mm).

Wpływ rodzaju materiału na siły montażowe

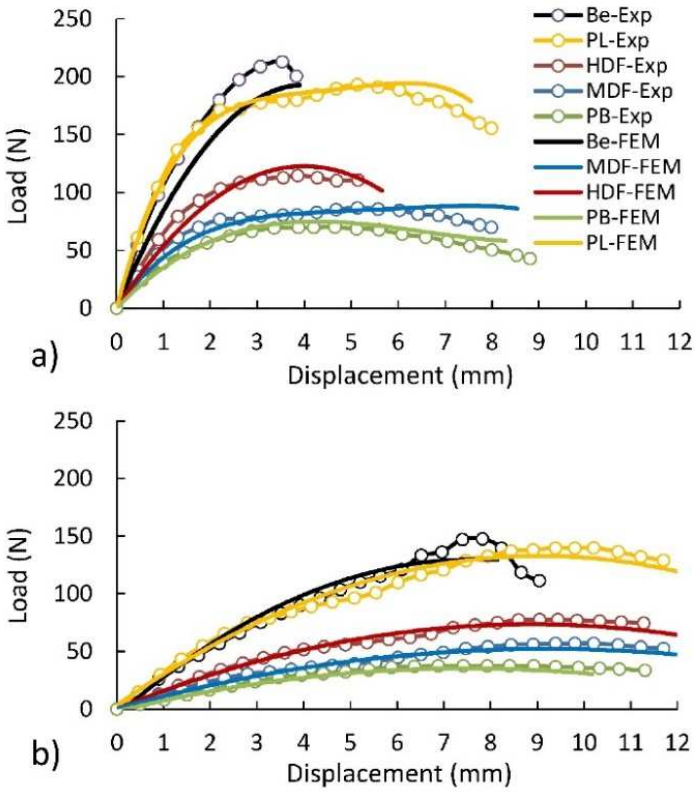
Na rycinie 18 przedstawiono wynik obliczeń numerycznych z przebiegu montażu połączeń. Jak wynika z ułożenia poszczególnych krzywych, obciążenie montażowe nieregularnie zmienia wartość na długości kontaktu czopa i gniazda (Ryc. 18a). Z ryciny 18b wynika natomiast, że połączenia wykonane z *HDF* wyróżniają się największą wartością naprężeń kontaktowych występujących w interakcji pomiędzy powierzchnią czopa i gniazda. Przyczyną tej prawidłowości jest największa gęstość zastosowanych płyt *HDF*. Stąd też uwidacznia się znacząca wartość siły montażowej w zależności od rodzaju zastosowanego materiału. Uznano zatem, że materiał połączeń ma wpływ na wielkość sił montażowych. Tak wyznaczone wartości liczbowe sił montażowych F (N) zostały zastosowane do dalszych obliczeń sztywności i wytrzymałości połączeń oraz sztywności mebli skrzyniowych.



Ryc. 18. Zależność sił montażowych (a) oraz naprężeń kontaktowych (b) od rodzaju materiału połączenia.

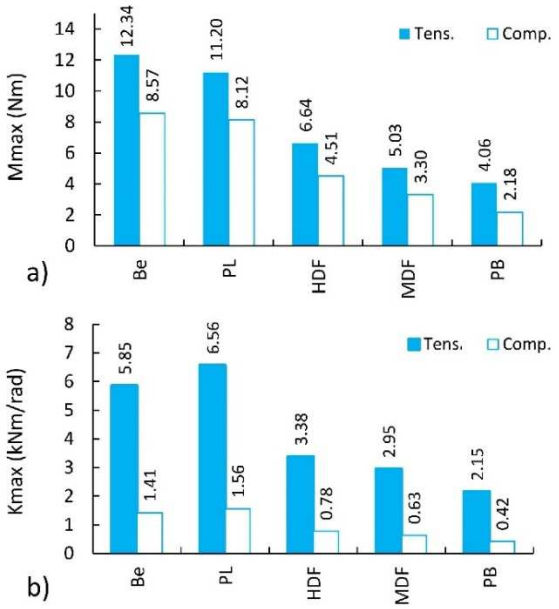
Wpływ rodzaju materiału na sztywność i wytrzymałość połączeń

Wykazano, że przyjęte modele numeryczne prowadzące do wyznaczenia sił montażowych są poprawne. Poprawnie też odwzorowano wpływ sił montażowych i rodzaju materiału na sztywność i wytrzymałość połączeń (Ryc. 19).



Ryc. 19. Zależność obciążenia od przemieszczenia połączeń: a) rozwieranych, b) zwieranych.

Z ryciny 19 wynika, że sztywność połączeń rozwieranych jest minimum trzy razy większa od sztywności połączeń zwieranych. Jednocześnie widać stąd, że najlepsze właściwości mechaniczne wykazują połączenia wykonane z *PL* i *Be*, a następnie z *HDF*, *MDF* i *PB*. Liczbowo, wytrzymałość i sztywność połączeń porównano na rycinie 20.

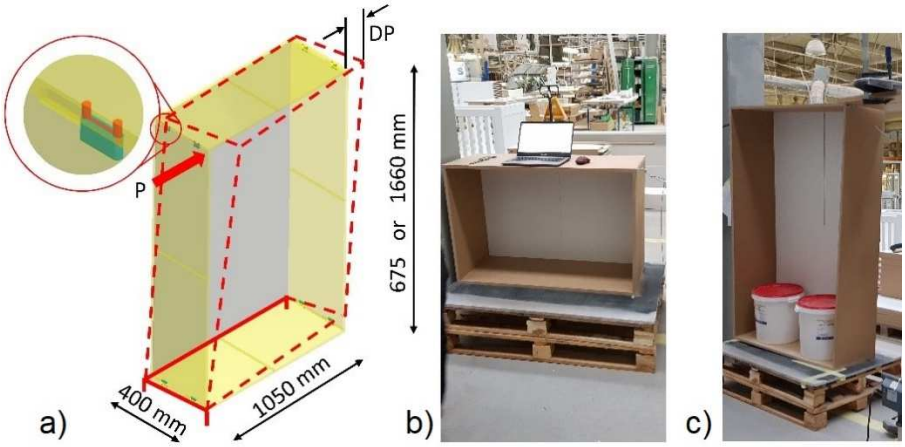


Ryc. 20. Wytrzymałość i sztywność połączeń: a) rozwieranych, b) zwieranych.

Z ryciny 20a wynika, że największą wytrzymałością charakteryzują się połączenia rozwierane wykonane z *Be* 12.34 (Nm). Wytrzymałość połączeń wykonanych z *PL*, *HDF*, *MDF*, *PB* jest mniejsza odpowiednio o 10.2%, 85.8%, 145.3% oraz 203.8%. W przypadku połączeń poddanych zwieraniu tendencja jest analogiczna. Największą wytrzymałością charakteryzują się połączenia wykonane z *Be* 8.57 (Nm). Wytrzymałość połączeń wykonanych z *PL*, *HDF*, *MDF*, *PB* jest mniejsza odpowiednio o 5.5%, 90.1%, 159.6% oraz 293.5%.

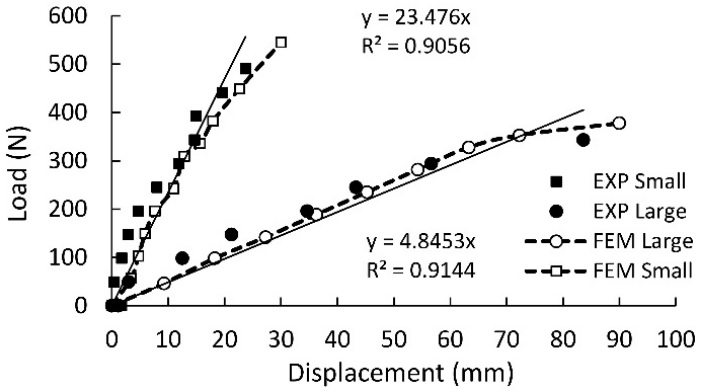
Wpływ sił montażowych na sztywność mebli

Rozszerzając wyniki obliczeń numerycznych przedstawionych w omawianej publikacji dodatkowo obliczono wpływ sił montażowych na sztywność i wytrzymałość mebli jednokomorowych wykonanych z płyt *MDF*, których wymiary przedstawiono na rycinie 21. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych.



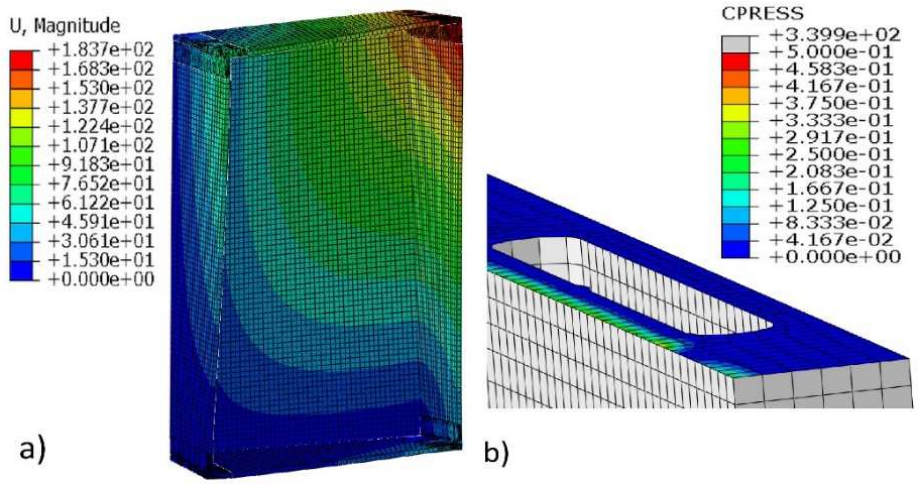
Ryc. 21. Modele mebli użyte do badań sztywności i wytrzymałości: a) schemat statyczny, b) korpus mały, c) korpus duży.

Sztywność badanych mebli skrzyniowych zilustrowano na rycinie 22. Jak wynika z tej ryciny rezultaty obliczeń numerycznych zostały potwierdzone przez badania eksperymentalne. Uwidaczniają one, że meble o małych wymiarach charakteryzują się średnim współczynnikiem sztywności k równym 23.47 (N/mm). Natomiast dla większych mebli współczynnik k jest równy 4.84 (N/mm). Prawidłowość ta wynika głownie z wymiarów mebli. Deformacja skrętna mebla jest bowiem skutkiem deformacji skrętnej poszczególnych jej elementów.



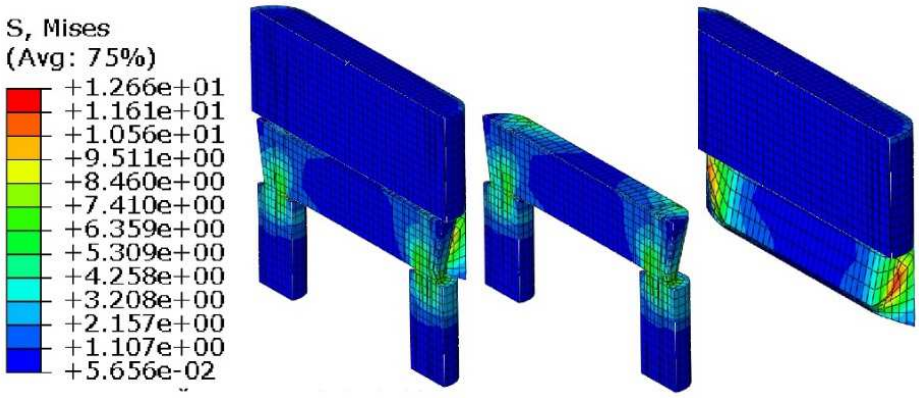
Ryc. 22. Sztywność mebli skrzyniowych.

Stąd wynika, że dla stałych wartości materiałowych sztywność k (N/mm) zależy od wymiarów poszczególnych elementów składowych mebla. Skrętną deformację korpusu mebla uzyskano także w próbie obliczeń numerycznych (Ryc. 23a). W wyniku tej deformacji elementy mebla wzajemnie naciskają na siebie wywierając niewielkie naprężenia kontaktowe o wartości nie większej niż 0.5 (MPa) (Ryc. 23b).



Ryc. 23. Deformacja mebla (a) i naprężenia kontaktowe (b) na powierzchni elementów.

Obliczenia numeryczne wykazały ponadto, że zastosowane złącza dzięki sile montażowej F (N) nie wysuwają się z gniazda. Ulegają natomiast zginaniu, a maksymalne naprężenia zredukowane nie przekraczają 12.7 (MPa). Zatem są mniejsze o połowę od naprężeń dopuszczalnych (Ryc. 24).



Ryc. 24. Rozkład naprężeń w łącznikach połączenia.

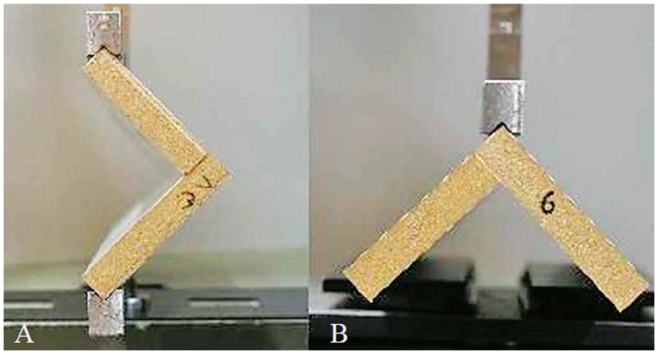
Podsumowując badania można stwierdzić, iż cel w postaci opracowania i przebadania innowacyjnego złącza meblowego został osiągnięty, zarówno poprzez metody wykorzystujące analizę komputerową jak i te związane z rzeczywistymi testami. Wyniki badań potwierdziły, że geometria łączników sprzyja powstawaniu znaczących sił montażowych podczas składania połączeń. Wartość tych sił nieznacznie zależy od rodzaju materiałów zastosowanych do budowy połączeń, co pozwoliło zweryfikować hipotezę, że wewnętrzne siły montażowe są najważniejszym kryterium determinującym wytrzymałość oraz sztywność połączeń. Siły montażowe mają natomiast znaczący wpływ na sztywność mebli skrzyniowych poddanych skręcaniu. Powodują, że łączniki nie wysuwają się z gniazd. Wartości sił montażowych upoważniają też do wniosku, że są one najważniejszym kryterium determinującym właściwości połączeń.

3.8 Wyniki publikacji A.2. *Numerical modelling of stiffness of RTA furniture with new externally invisible and dismountable joints*

Głównym celem badań było przeprowadzenie analizy porównawczej, pod względem sztywności konstrukcji mebli skrzyniowych. Zaproponowano alternatywny sposób wykonywania numerycznych analiz porównawczych, który pozwala różnicować różne rodzaje złączy pod względem użyteczności w konstrukcjach mebli skrzyniowych. Rzetelna reprezentacja badanych konstrukcji w środowisku *MES* jest bardzo pracochłonna i wymaga bardzo dokładnego odzwierciedlenia rzeczywistego modelu poprzez szczegółową siatkę oraz drobiazgowe wyznaczenie właściwości stosowanych materiałów. Uznano, że bardziej praktyczne, ale równie skuteczne jest zastąpienie względnie rzeczywistego modelu złącza, uproszczonymi łącznikami półsztywnymi. W proponowanej metodzie postawiono sobie za cel wyrażenie sztywności połączenia za pomocą modułu sprężystości w postaci funkcji obciążenia i ugięcia. W pracy stworzono wirtualne modele łączników, które reprezentowały właściwości zweryfikowane w fizycznych testach. Praca miała również na celu weryfikację hipotezy, że siły montażowe w znaczącym stopniu wpływają na sztywność całościowych konstrukcji mebli skrzyniowych. Hipotezę postanowiono zweryfikować opierając się o uproszczony, jednak kompletny korpus meblowy zasymulowany w środowisku *MES*.

Przygotowanie łączników oraz połączeń

Analizie poddano połączenia (Ryc. 25) wykorzystujące łączniki przedstawione w pracy [38]. Podobnie jak w wymienonej pracy jako złącze tworzące połaczenie referencyjne wykorzystano łącznik minifix, ze względu na swoją popularność w przemyśle meblowym.

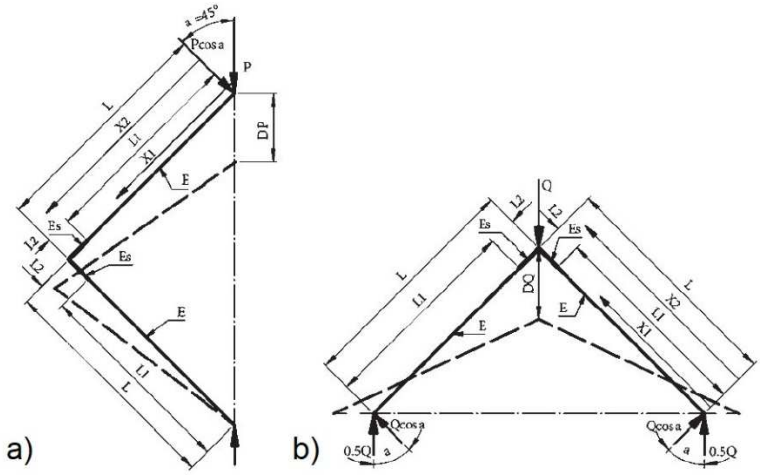


Ryc. 25. Połączenia poddane: a) zwieraniu, b) rozwieraniu.

Sporządzenie modeli numerycznych poprzedzały badania eksperymentalne (Ryc. 25), w sumie przeprowadzono sześć wariantów badań wynikających z trzech metod łączenia, testowanych w dwóch typach obciążeń. Dokładny kształt, wymiary połączeń oraz metodykę badań przedstawiono m.in. w pracach [1],[17],[23],[24]. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych obliczono zastępcze moduły sprężystości.

Zastępczy moduł sprężystości

W celu oszacowania modułów sprężystości połączeń zastosowano model obliczeniowy przedstawiony na rycinie 26. W poniższym modelu L=100 (mm) oznacza długość ramion połączeń, $L2$=18 (mm) oznacza grubość materiału, L=$L1$+$L2$,x1,x2 stanowią zakresy całkowania, E (MPa) oznacza liniowy moduł sprężystości płyty wiórowej, E_s (MPa) natomiast zastępczy moduł sprężystości.



Ryc. 26. Model geometryczny do analitycznego obliczania zastępczych modułów sprężystości połączeń: a) podczas zwierania (compression), b) podczas rozwierania (tension).

Jeżeli połączenie jest poddawane zwieraniu (Ryc. 26a), równinie opisujące ugięcie *DP* (mm) w kierunku siły *P* (N) przyjmuje postać:

$$DP = 2\left(\int_0^{L_1} \frac{P\cos^2\alpha}{EJ} x_1^2 dx_1 + \int_{L_1}^{L=L_1+L_2} \frac{P\cos^2\alpha}{E_s J} x_2^2 dx_2 \right), \tag{1}$$

$$J = bL_2^3 / 12, \tag{2}$$

gdzie: *b* (mm) – szerokość przekroju łącznika, *J* (mm^4) – moment bezwładności przekroju. Zdecydowano, że dla wybranych połączeń wspomniana szerokość będzie równa 30 (mm). Rozwinięcie równania wygląda następująco:

$$DP = \frac{2P\cos^2\alpha}{3J}\left(\frac{L_1^3}{E} + \frac{L^3 - L_1^3}{E_s} \right). \tag{3}$$

w związku z powyższym przyjęto, że moduł sprężystości połączenia stanowi równanie:

$$E_s = \frac{2PE\cos^2\alpha(L^3 - L_1^3)}{3EJ\,DP - 2P\cos^2\alpha L_1^3}. \tag{4}$$

Dla połączeń poddanych rozwieraniu (Ryc. 26b), równanie opisujące ugięcie *DQ* (mm) w kierunku działania siły *Q* (N) przyjmuje następującą postać:

$$DQ = 2\left(\int_0^{L_1} \frac{Q\cos^2\alpha}{2EJ} x_1^2 dx_1 + \int_{L_1}^{L=L_1+L_2} \frac{Q\cos^2\alpha}{2E_s J} x_2^2 dx_2 \right), \tag{5}$$

w związku z tym:

$$DQ = \frac{Q\cos^2\alpha}{6J}\left(\frac{L_1^3}{E} + \frac{L^3 - L_1^3)}{E_s} \right), \tag{6}$$

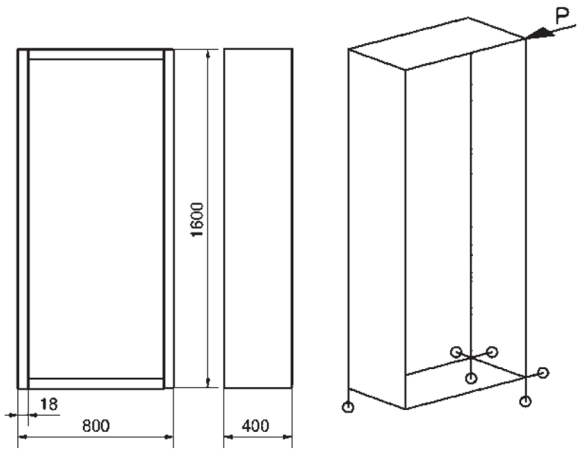
oraz

$$E_s = \frac{QEcos^2\alpha\left(L^3 - L_1^3\right)}{6EJDQ - Qcos^2\alpha\, L_1^3}. \tag{7}$$

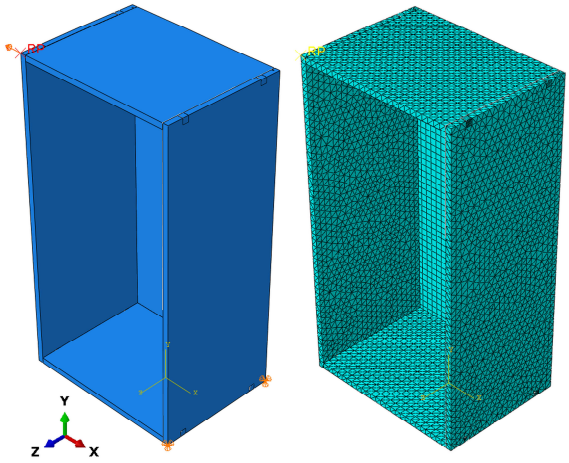
W dalszych krokach postanowiono określić fizyczne i mechaniczne właściwości zastosowanej płyty wiórowej oraz liniowy moduł sprężystości *E*. Wykorzystując równania 4 i 7 obliczono *Es* dla każdego z badanych połączeń, a następnie uzyskane wyniki wykorzystano do obliczeń numerycznych.

Modele numeryczne korpusów mebli skrzyniowych

Analizy numeryczne przeprowadzono na meblach skrzyniowych o wymiarach określonych na rycinie 27. Założono, iż wszystkie elementy korpusu zostały wyprodukowane z zastosowaniem identycznej technologii i przy użyciu identycznego materiału. Korpusy mebli wsparte były w trzech narożnikach (Ryc. 27) i obciążone siłą poziomą *P* (N) w prawym górnym rogu korpusu. Wartość siły obciążającej dobrano tak, aby ugięcie było równe 80 (mm). Rycina 28 przedstawia przykładowy model do obliczeń numerycznych mebli. Wszystkie elementy mebli zostały modelowane przy użyciu 10-węzłowych skończonych elementów czworościennych C3D8R. Pomiędzy wąskimi powierzchniami elementów konstrukcyjnych, ustanowiono punkty styku do szerokich powierzchni bez wywierania tarcia. Ściany boczne, wierzch oraz spód wykonano z płyty wiórowej (*E* = 2500 (MPa), współczynnik Poissona 0,3). Ścianę tylną wykonano z płyty *HDF* (*E* = 3500 (MPa), współczynnik Poissona 0,3). Połączenia były modelowane jako prostopadłościany o podstawie 18 (mm) x 18 (mm) i długości 30 (mm), które następnie zostały połączone z elementami korpusu elastycznym połączeniem typu „bonded". Połączeniom zostały przypisane odpowiednie zastępcze moduły sprężystości w zależności od charakteru deformacji (zwieranie lub rozwieranie).



Ryc. 27. Mebel skrzyniowy przeznaczony do analizy numerycznej.



Ryc. 28. Model numeryczny korpusu mebla skrzyniowego.

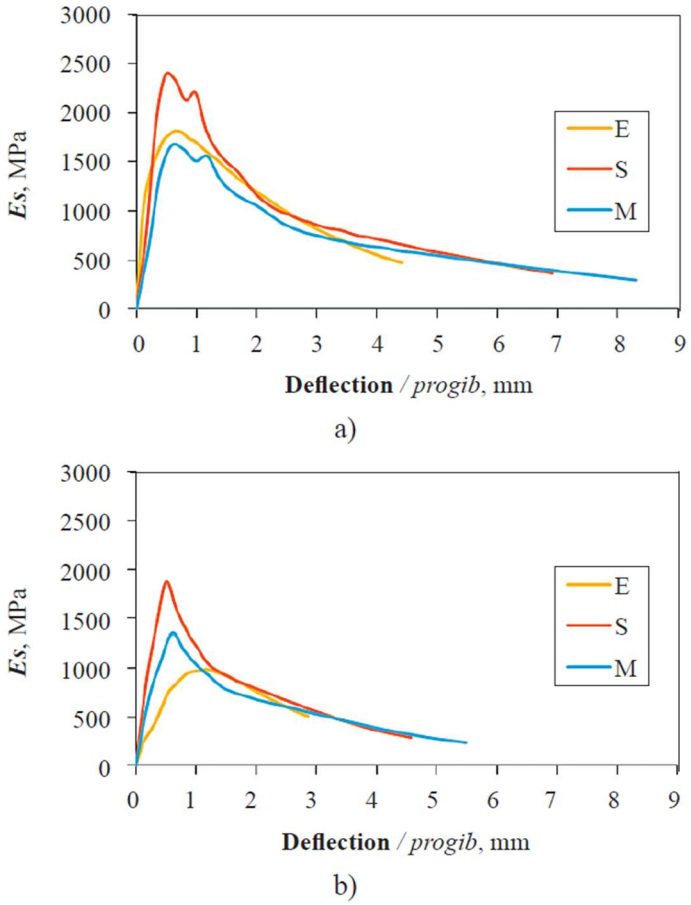
Na podstawie wyników obliczeń numerycznych określono wpływ obciążenia na przemieszczenia obciążonego narożnika korpusu. Ponadto obliczono współczynniki sztywności dla korpusów meblowych na podstawie wzoru:

$$k = \frac{F}{\delta} \text{ (N/mm)} \tag{8}$$

gdzie: F (N) – siła obciążająca korpus mebla, δ (mm) – przemieszczenie w kierunku działania siły.

Wpływ rodzaju łącznika na ugięcia korpusów mebli skrzyniowych

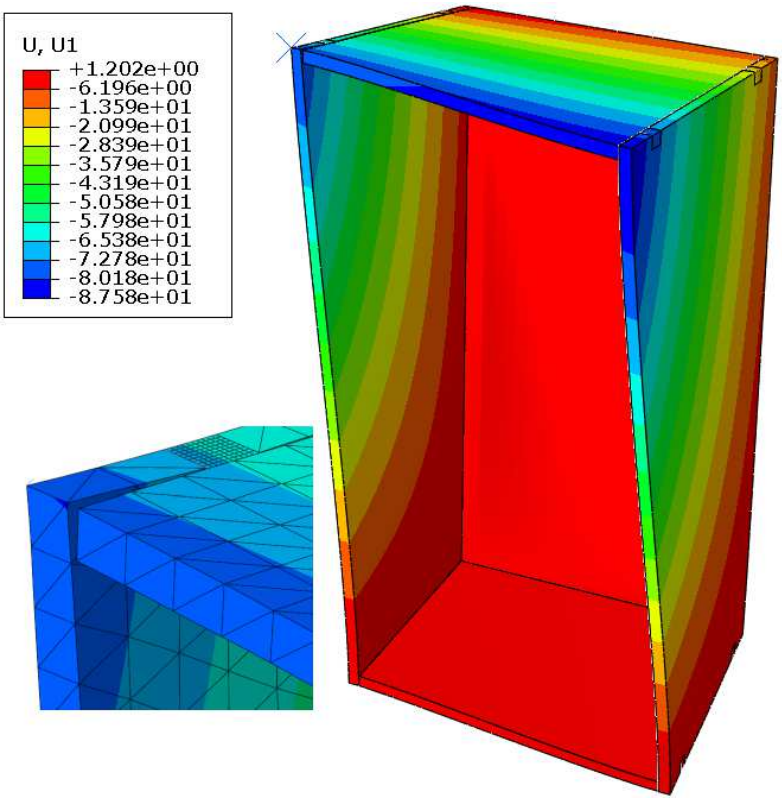
Zmienność zastępczego modułu sprężystości obliczono w funkcji ugięcia połączenia (Ryc. 29). Z ryciny 29 wynika, że największe wartości modułu sprężystości połączenia osiągane są przy ugięciu około 1 (mm). Przy ugięciach o wyższych wartościach wartości modułu sprężystości zmniejszają się relatywnie szybko i dla ugięcia 3 (mm) są równe około 40% maksymalnej wartości. Wartości *Es* przeznaczone do obliczeń numerycznych przedstawiono w tabeli 2. Rycina 30 przedstawia charakterystyczny sposób deformacji mebla skrzyniowego, polegający na skręcaniu konstrukcji. Można zaobserwować szczeliny między elementami mebla, spowodowane zginaniem połączeń i naciskiem na krawędzie elementów konstrukcji.



Ryc. 29. Zależność *Es* od ugięcia w teście: a) zwieranie b) rozwieranie (*S* – połączenie ze złączem przesuwno-zaczepowym, *M* - połączenie ze złączem skrętno-sprężnym, *E* - połączenie z łącznikiem mimośrodowym).

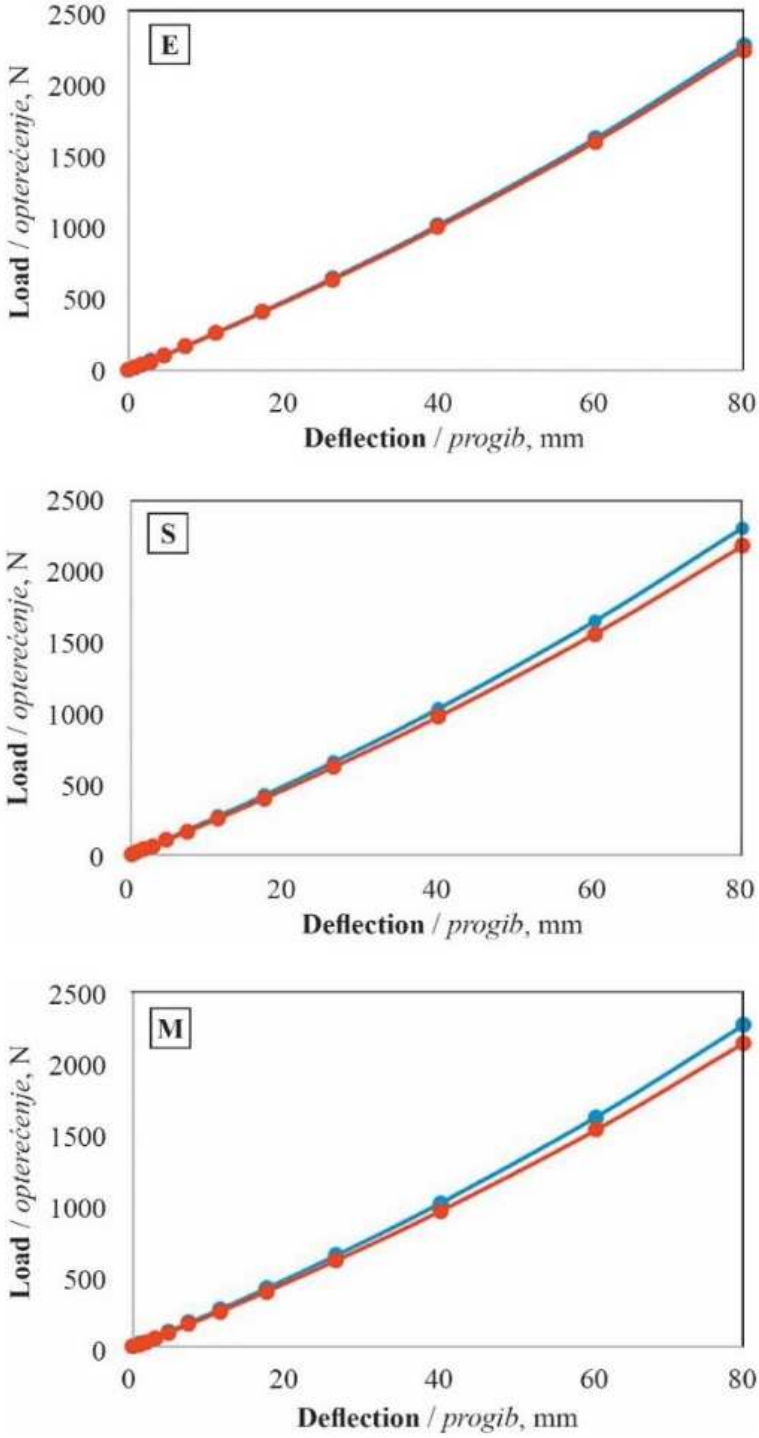
Tabela 2. Zastępcze moduły sprężystości połączeń (*S* – połączenie ze złączem przesuwno-zaczepowym, *M* - połączenie ze złączem skrętno-sprężnym, *E* - połączenie z łącznikiem mimośrodowym).

Rodzaj próby	**Przemieszczenie (mm)**	***Es* (MPa) wg rodzaju złącza**		
		S	*M*	*E*
Zwieranie	1	2201	1554	1815
	3	847	660	1219
Rozwieranie	1	1211	918	821
	3	550	439	786

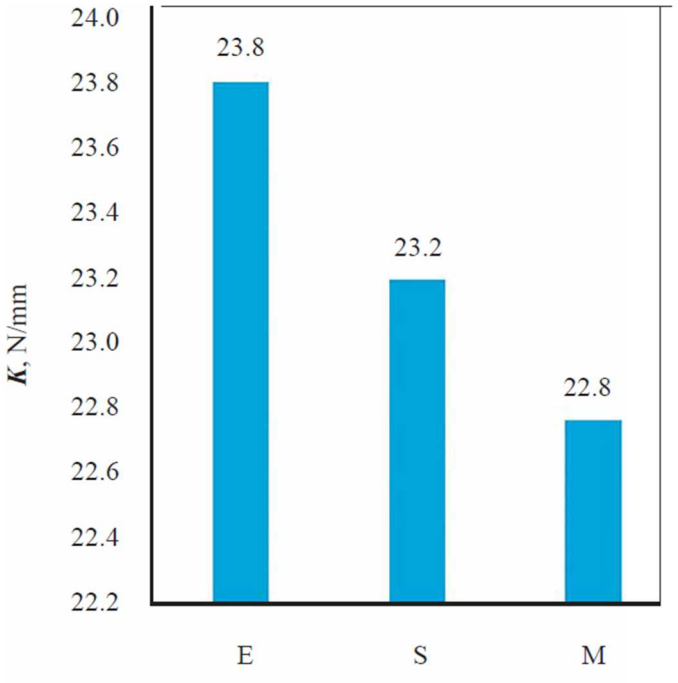


Ryc. 30. Deformacja korpusu mebla skrzyniowego.

Sztywność mebli w zależności od rodzaju zastosowanego złącza przedstawiono na rycinie 31. Wynika z tego, że charakterystyki sztywności są nieliniowe i progresywne. Oznacza to zwiększenie się wartości obciążeń wraz ze zwiększeniem się przemieszczeń. Zmiana wartości *Es* w obrębie tego samego połączenia nie ma znaczącego wpływu na sztywność korpusu. Nie zauważono znaczącej różnicy współczynnika sztywności pomiędzy różnymi sposobami łączenia (Ryc. 32). Na podstawie wyników, można jedynie stwierdzić, że nowo zaprojektowane złącza meblowe zapewniają sztywność porównywalną do tej, którą można uzyskać przy użyciu tradycyjnych łączników mimośrodowych *(E)* które podobnie jak większość zaprojektowanych złączy umożliwia wzbudzenie sił montażowych.



Ryc. 31. Sztywność korpusów wykorzystujących różne metody łączenia: *E*, *S*, *M*.



Ryc. 32. Współczynniki sztywności korpusów wykorzystujących różne metody łączenia: *E*, *S*, *M*.

Przeprowadzono kompleksową analizę porównawczą pod względem sztywności mebli skrzyniowych wykorzystujących różne typy łączników meblowych, co można uznać za realizację głównego celu badań. Symulacje w środowisku *MES*, pozwoliły zweryfikować hipotezę, że siły montażowe w pewnym stopniu wpływają na sztywność konstrukcji mebli skrzyniowych. Wyniki uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych i ich analiza pozwoliły zauważyć, że największe wartości zastępczych modułów sprężystości wykazuje złącze przesuwno-zaczepowe. Sztywność połączeń wykorzystujących wspomniane złącze jest zbliżona do sztywności połączeń wykorzystujących mimośrody. W związku z powyższym, możliwe okazuje się uznanie złącza przesuwno-zaczepowego jako alternatywy dla łączników mimośrodowych. Złącza skrętno-naprężne pozwoliły stworzyć połączenia o dobrych (akceptowalnych) właściwościach mechanicznych nawet bez siły montażowej, co również pozwala stwierdzić, że mógłby być stosowane w przemyśle meblarskim. W związku z powyższym, potwierdzono hipotezę, że siły montażowe generowane w połączeniach w znacznym stopniu wpływają na sztywność konstrukcji. Należy jednak pamiętać, iż niniejsza część badań miała charakter głównie analityczny i rozsądne wydaje się zweryfikowanie wyników poprzez fizyczne testy.

3.9 Wyniki publikacji A.3. *Impact damage response of L-type corner joints connected with new innovative furniture fasteners in wood-based composites panels*

Celem pracy było zweryfikowanie głównej hipotezy badawczej, że siły montażowe w połączeniach meblowych mają znaczący wpływ na ilość energii absorbowanej podczas uderzenia z małą prędkością. Postanowiono wyjaśnić przyczyny uszkodzenia połączeń oraz wpływ rodzaju zastosowanych materiałów i schematów obciążenia. Do badań zastosowano dwa nowe, oryginalne zewnętrznie niewidoczne złącza meblowe oraz najbardziej popularne łączniki mimośrodowe. Wybrane złącza zamontowano w płytach wiórowych *PB* oraz płytach *MDF* które tworzyły połączenia narożnikowe typu L. Połączenia badano w warunkach obciążenia dynamicznego wywołanego uderzeniem o małej prędkości. Podczas ściskania i rozciągania połączeń analizowano siłę uderzania, ugięcie próbki, ilość absorbowanej energii oraz zachowanie podczas uszkodzenia. W ramach analizy numerycznej metodą elementów skończonych utworzono modele symulacyjne i analizowano zachowanie się połączeń w przypadku zniszczenia. Do badań wykorzystano analogiczne złącza i połączenia jakie opisano w pracy A.1. Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases.

Badania eksperymentalne i numeryczne

Zbudowano autorskie stanowisko do pomiaru wytrzymałości połączeń narożnikowych na obciążenia dynamiczne przy małej prędkości. Całkowita masa młota udarowego była równa 5 (kg). W trakcie uderzenia młota o próbkę mierzono siłę uderzenia F_c (N) oraz ugięcie H_i (mm) niszczonej próbki. Energię potencjalną młota, spadającego z wysokości H 100 (mm) z prędkością V = 1400 (mm/s) obliczono z równania (9),

$$E_p = WgH = 4.91 \text{ (J)}. \tag{9}$$

Energię uderzenia E_i (J) obliczono na podstawie równania (10),

$$E_i = WgH_{iF}. \tag{10}$$

Całkowitą energię E_T (J) równą pracy obciążenia zewnętrznego podczas uderzenia próbki młotem udarowym obliczono z równania (11),

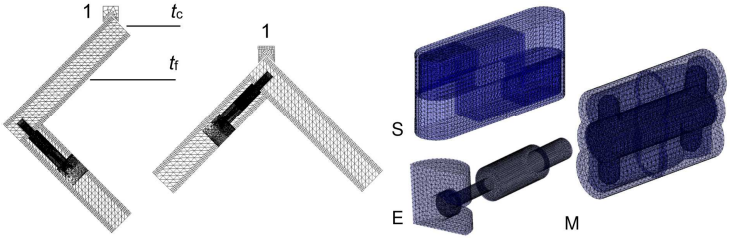
$$E_T = \int_o^{H_i} F_c(H_i)\, dH_i. \tag{11}$$

Ilość energii zaabsorbowanej przez połączenie K_a (%) obliczono z równania,

$$K_a = \frac{E_i}{E_T} \cdot 100\%. \tag{12}$$

Na rycinie 33 przedstawiono przykładowe modele numeryczne połączeń narożnikowych obciążonych dynamicznie przez pryzmatyczny impactor (1). Impactor umieszczono 2 (mm) powyżej krawędzi próbki i przypisano mu masę 5 (kg) oraz prędkość 1400 (mm/s). Pomiędzy wszystkimi powierzchniami połączenia zdefiniowano general contact z współczynnikiem tarcia 0.2. Ponadto dla połączeń z

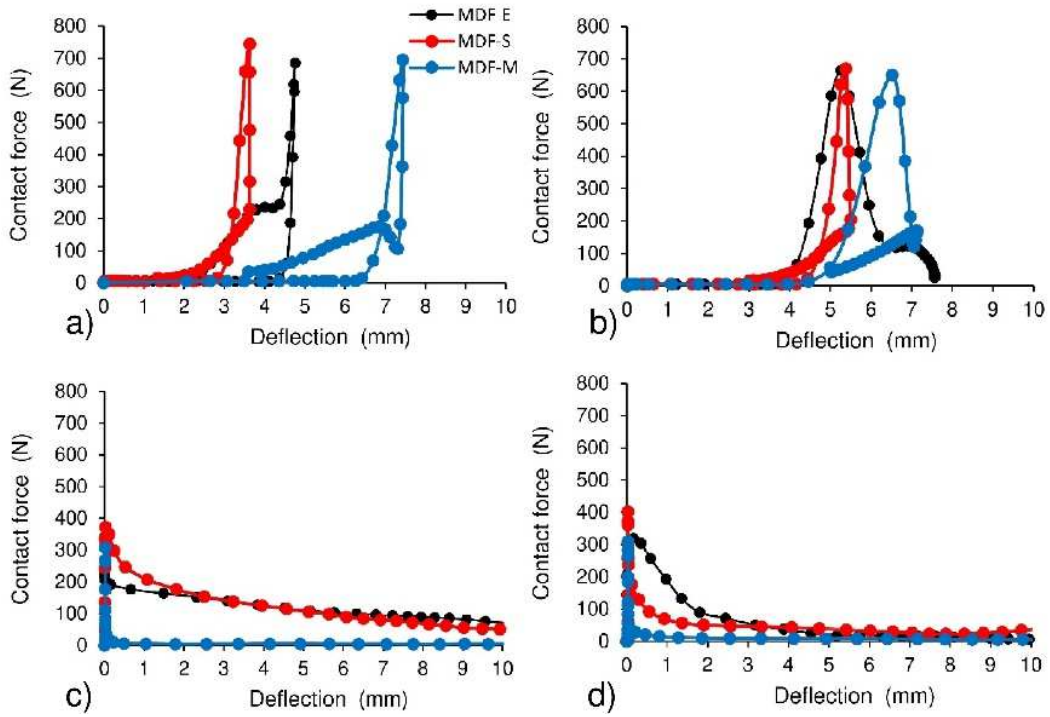
łącznikami *(E)* oraz złączami przesuwno-zaczepowymi *(S)* użyto sił montażowych, które aplikowano analogicznie jak w pracy A1. Czas trwania obciążenia dynamicznego był równy 0.02 (s). Wynikami obliczeń były: siła uderzenia F_c (N), ugięcie H_i (mm), energia zaabsorbowana E_i (J).



Ryc. 33. Modele numeryczne połączeń narożnikowych: 1 impaktor, *S*, *M*, *E* odpowiednio: złącze przesuwno-zaczepowe, złącze skrętno-sprężne, łącznik mimośrodowy.

Wpływ sił montażowych i rodzaju materiału połączenia na siłę uderzenia

Na rycinie 34 przedstawiono zależność siły uderzenia F_c (N) od ugięcia zarejestrowanego w punkcie uderzenia w próbkę H_i (mm). Wynika z niej, że po uderzeniu próbki rozciągane zwykle wróciły do postaci zbliżonej do tej przed uderzeniem, natomiast próbki ściskane uległy trwałemu przemieszczeniu lub całkowitemu zniszczenie po ustaniu obciążenia. Podczas rozciągania największe ugięcia były równe 3.61 (mm), 4.75 (mm), 7.43 (mm) odpowiednio dla połączeń ze złączami typu *(S)*, *(E)*, *(M)* wykonanych z *MDF* oraz 5.38 (mm), 5.25 (mm), 6.51 (mm), odpowiednio dla połączeń ze złączami typu *(S)*, *(E)*, *(M)* wykonanych z *PB*. Podczas ściskania największe ugięcia wiązały się z całkowitym zniszczeniem próbki i przekroczeniem zakresu pomiarowego urządzeń rejestrujących. Dlatego na rycinie 34 c, d dla wszystkich próbek odnotowano równe ugięcia 10 (mm). Przedstawione relacje potwierdzają zależność, że największą sztywność podczas uderzenia z małą prędkością wykazują połączenia ze złączami typu *(S)* następnie *(E)* i *(M)*. Prawidłowość ta wiąże się w oczywisty sposób z wytworzonymi siłami montażowymi F_m (N). Siły montażowe generowane w złączach *(S)* i *(E)* przekładają się na większą ich sztywność w porównaniu do złączy typu *(M)* w którym nie wytworzyły się siły montażowe. Ponadto z ryciny 34 wynika także prawidłowość, że rodzaj materiału wpływa na ugięcia połączeń ściskanych. Dla połączeń ze złączami typu *(S)*, *(M)* wykonanych z *MDF* ugięcie H_i (mm) jest mniejsze odpowiednio o 32.8%, 9.52% w porównaniu do połączeń z płyt *PB*. Natomiast dla połączeń z łącznikami mimośrodowymi wykonanymi z *MDF* ugięcie jest większe o 14.13% w porównaniu do połączeń z płyt *PB*.



Ryc. 34. Zależność siły uderzenia od ugięcia: a) rozciąganie próbek z *MDF*, b) rozciąganie próbek z *PB*, c) ściskanie próbek z *MDF*, d) ściskanie próbek z *PB*.

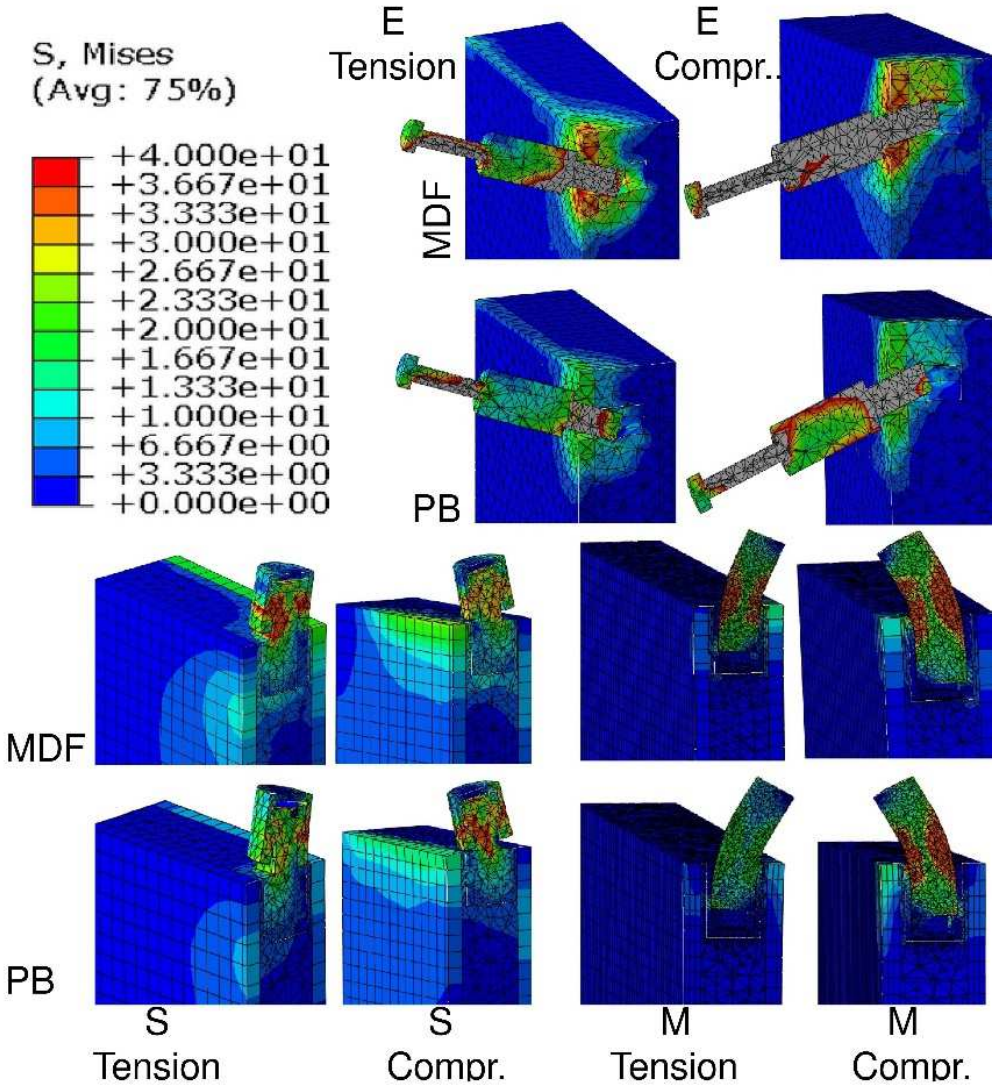
Wpływ sił montażowych i rodzaju materiału połączenia na ilość absorbowanej energii

Podczas uderzenia wywołującego rozciąganie, ilość absorbowanej energii E_i (J) jest wielokrotnie większa od znikomo absorbowanej energii podczas ściskania połączeń. Prawidłowość ta dotyczy każdego typu połączenia oraz materiału. O ile większą zdolność absorbcji energii przez połączenia rozciągane można uznać za cechę korzystną, to w przypadku połączeń ściskanych niewielkie wartości współczynnika K_a (%) od 0.01% do 1.69% przemawiają o ich dużej skłonności do uszkodzeń przy nagłych obciążeniach. Z przedstawionej analizy wynika również, że wykonanie połączeń z płyt *MDF* sprzyja absorbcji energii podczas ich uderzenia z małą prędkością. Ponadto połączenia typu *(M)* pomimo braku sił montażowych dobrze absorbują energię dorównując, a niekiedy przewyższając pod tym względem połączenia w których siły montażowe zostały zainicjowane.

Wpływ sił montażowych i rodzaju materiału połączenia na uszkodzenia połączeń

Podczas ściskania połączeń z łącznikami typu *(E)* z zainicjowanymi siłami montażowymi, trzpienie odkształcają górną powierzchnię gniazda i jego dolną krawędź. Maksymalne naprężenia w płytach *MDF* 40 (MPa) i *PB* 23.3 (MPa) przekraczają wartości dopuszczalne i powodują zniszczenie połączenia. Przy czym podczas rozciągania naprężenia te występują przy krawędzi gniazda i poniżej trzpienia. Zatem połączenie ulegało zniszczeniu przez naruszenie struktury gniazda lub wysunięcie trzpienia z gniazda. Na rycinie 35 przedstawiono również rozkład naprężeń zredukowanych Mises dla połączeń ze złączami typu *(S)* w którym także zainicjowano siły montażowe. Wynika z niej, że największe naprężenia występują w łącznikach, a następnie w zewnętrznych warstwach płyty. Podczas uderzenia łączniki

ulegają zginaniu. Maksymalne naprężenia uzyskują wówczas wartość 33 (MPa) i przekraczają wytrzymałość poliamidu na rozciąganie. Należy jednak zauważyć, że podczas rozciągania naprężenia w płytach *MDF* i *PB* nie przekraczają odpowiednio 21 (MPa) i 13 (MPa). Podczas ściskania największe naprężenia w płytach *MDF* i *PB* są równe odpowiednio 23 (MPa) i 16 (MPa). Dlatego połączenie ulegało zniszczeniu przez złamanie łącznika lub naruszenie struktury płyty.



Ryc. 35. Rozkład naprężeń zredukowanych w połączeniach.

Cechą charakterystyczną połączeń opartych o łączniki typu *(M)* był brak siły montażowej. Z ryciny 35 wynika, że zarówno podczas rozciągania jak i ściskania największe naprężenia koncentrują się wyłącznie w łączniku. Ich wartość 33 – 36 (MPa) przekracza wytrzymałość poliamidu na rozciąganiu. W warstwach zewnętrznych płyt największe naprężenia zredukowane nie przekraczały natomiast wartości 15 (MPa). Z tych powodów połączenia powinny ulegać zniszczeniu przez złamanie łącznika. Z pomiarów eksperymentalnych wynika natomiast, że główną przyczyną uszkodzenia połączeń było wysunięcie łącznika z gniazd. Nie nastąpiło więc uszkodzenie płyty ani też uszkodzenie łącznika.

W pracy osiągnięto główny cel badań, polegający na zweryfikowaniu hipotezy dotyczącej wpływu sił montażowych w połączeniach na ilość energii absorbowanej podczas uderzenia z małą prędkością. Wykazano, że zdolność połączeń do absorbowania energii znacząco zależy od wielkości sił montażowych. Również wykonanie połączeń z płyt *MDF* sprzyja ich zdolności do pochłaniania energii. Dla wszystkich typów materiałów zauważono, że podczas rozciągania dynamicznego połączenia absorbują więcej energii niż podczas ściskania. Zaobserwowanie odbicia młota udarowego od badanej próbki, można uznać jako pierwszy wyraźny sygnał świadczący jakości połączenia. Wykazano również znaczącą, dodatnią korelację pomiędzy wartością sił montażowych w połączeniach, a sztywnością i wytrzymałością tych połączeń. Płyty wiórowe i płyty *MDF* w jednakowym stopniu wpływają na wielkość siły uderzenia powodującej zniszczenie połączeń narożnikowych. Jest to obserwacja odmienna w porównaniu do powszechnie znanych wyników badań z użyciem obciążeń statycznych.

4. Dyskusja wyników i wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań sformułowano szereg wniosków i spostrzeżeń. Pierwsza część badań w postaci badań statycznych, potwierdza hipotezę, że poziom sił montażowych w połączeniu w największym stopniu wpływa na sztywność oraz wytrzymałość połączeń. Korzystna konstrukcja połączenia ze złączami typu *(S)*, z dwoma zaczepami, powoduje równomierny rozkład naprężeń montażowych w porównaniu do skoncentrowanych naprężeń wywołanych przez trzpień i mimośród w połączeniu z łącznikami typu *(E)*. Na podstawie pierwszej serii badań z zakresu właściwości połączeń wykorzystujących złącza *S*, *M* oraz referencyjny *E*, można z pełnym przekonaniem stwierdzić, że największą wytrzymałość wykazują połączenia ze złączami *(S)* następnie *(E)*, a najmniejszą wytrzymałością charakteryzują się połączenia ze złączami *(M)* w których nie wywołano siły montażowej. Zastosowanie płyt *MDF* zdecydowanie poprawia wytrzymałość wszystkich połączeń w próbach rozwierania oraz wytrzymałość połączenia mimośrodowego w próbie zwierania. Właściwość ta wynika z mniejszej niejednorodności płyty *MDF* w stosunku do płyty wiórowej *PB*. Sztywniejsze warstwy płyty *MDF* korzystniej wzmacniają połączenia meblowe. Wykazano również, że sztywność połączeń opartych o złącza *(S)* oraz mimośrody *(E)* dominuje nad sztywnością połączeń ze złączami *(M)*, u których nie wywołano sił montażowych. Ponadto sztywność połączeń nie ma bezpośredniego przełożenia na jego wytrzymałość. Dlatego w ocenie jakości połączeń meblowych nadal należy stosować dwa kwantyfikatory. Wytrzymałość połączeń należy zdecydowanie oceniać przy zastosowaniu maksymalnego momentu zginającego, zaś sztywność połączenia używając współczynnika sztywności. Wykonane z poliamidu prototypy złączy przesuwno-zaczepowych *(S)* stanowią atrakcyjny zamiennik dla łączników mimośrodowych *(E)* dodatkowo zapewniając zewnętrzną niewidoczność i montaż bez użycia narzędzi. Nieuzasadnione jest zatem stosowanie do montażu mebli wyłącznie połączeń metalowych. Nadal uzasadnione jest poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych łączników, wykonanych z tańszych i ekologicznych materiałów, o kształcie gwarantującym duże siły montażowe, solidność osadzenia w elementach mebla i wymaganą wytrzymałość połączenia.

Druga część badań zakładała zaprojektowanie oraz wykonanie prototypów połączeń bazujących na mechanizmie skrętno-naprężnym, cel osiągnięto poprzez opracowanie rozwiązania składającego się z dwóch identycznych muf oraz trzpienia generującego energię powstałą w wyniku osiowego skręcania. Osiągnięcie celu w postaci wyznaczenia sztywności oraz wytrzymałości połączeń bazujących na złączu skrętno-naprężnym pozwoliło na porównanie wyników z innymi wynikami badań zaczerpniętymi ze źródeł naukowych. Analiza wyników drugiej części badań, skupiających się na właściwościach złącza skrętno-naprężnego pozwoliła zweryfikować hipotezę, że zdolność do generowania sił montażowych w połączeniu jest istotniejszym czynnikiem determinującym sztywność oraz wytrzymałość połączeń aniżeli sam materiał łącznika. Powyższe stwierdzenie jest poparte faktem, iż udało się wykonać połączenia o satysfakcjonującej sztywności w porównaniu do połączeń montowanych przy użyciu łączników powszechnie stosowanych na rynku oraz innych ocenionych jako łączniki o dużym potencjale wdrożeniowym. Prawdą jest, iż materiał łączonych elementów różnił się znacząco, jednak materiały zastosowane w łącznikach również, w opisywanym przypadku na niekorzyść rozwiązania będącego obiektem badań. W związku z powyższym, wnioski

sformułowano traktując połączenie jako kompleksową propozycję, na którą składa się złącze oraz łączone elementy.

Trzecia seria badań dotyczyła właściwości połączeń wykonanych przy użyciu złącza przesuwno-rozporowego *(D)*. Złącze przesuwno-rozporowe *(D)* jest wynikiem realizacji celu w postaci zaprojektowania niewidocznego złącza meblowego generującego siły montażowe. Istotnym wnioskiem płynącym z badań jest weryfikacja hipotezy, że siły montażowe generowane w połączeniu można uznać za najważniejsze kryterium wpływające na sztywność i wytrzymałość połączeń. Należy pamiętać o fakcie, że dla zaprojektowanego złącza rodzaj materiału z jakiego wykonane były łączone elementy pośrednio wpłynął na właściwości wytrzymałościowe połączeń. Jednak to generowane siły montażowe miały bezpośredni wpływ na sztywność oraz wytrzymałość połączeń. Widać także, że im większa gęstość materiałów, tym większa wartość wspomnianych sił. W połączeniach wykonanych ze sklejki bukowej i *HDF* siła mocowania jest większa o 5,9%, 10% i 15,5% w porównaniu z siłami występującymi w połączeniach wykonanych odpowiednio z płyty *MDF*, drewna bukowego i płyty wiórowej. Siły montażowe zapobiegają wysuwaniu się złączy z gniazd. Zbliżone wartości sił montażowych uzasadniają wniosek, że sztywność i wytrzymałość połączeń zależy od rodzaju użytych materiałów, a zwłaszcza od wartości modułów sprężystości liniowej. Największą wytrzymałością charakteryzują się połączenia wykonane z drewna bukowego przy rozwieraniu i przy zwieraniu. W połączeniach wykonanych ze sklejki bukowej wytrzymałość na zginanie płyt *HDF*, *MDF* i płyt wiórowych jest niższa od 9,3% do 67,1%. Połączenia charakteryzują się dużą sztywnością początkową rejestrowaną dla odkształcenia kątowego $\varphi = 0{,}0005$ radianów. W przypadku połączeń wykonanych ze sklejki największy współczynnik sztywności był równy 6,56 (kNm/rad) przy rozwieraniu i 1,56 (kNm/rad) przy zwieraniu. Wszystkie wyniki badań eksperymentalnych wykazały zgodność do wyników obliczeń numerycznych. Wskazuje to, że opisane zjawiska wymuszeń montażowych oraz charakter interakcji pomiędzy elementami złącznymi w połączeniach są prawidłowe. Badania wykazały przydatność druku *3D* do produkcji eksperymentalnych złączy. W praktyce przemysłowej proponuje się jednak zastosowanie tańszej technologii wtrysku. Ten łącznik pozwala szybko zamontować i zdemontować elementy mebli bez użycia narzędzi. Można je łatwo włożyć do wcześniej wykonanych gniazd/otworów poprzez wsunięcie. Ponadto kształt łączników jest symetryczny i nie wymaga żadnego pozycjonowania względem innych elementów lub otworów. Przedstawiona metoda dotyczy tylko połączeń, w których generowane są siły montażowe. Dlatego jego zastosowanie w przypadku połączeń klejowych będzie nieskuteczne. Nowym kierunkiem badań wykorzystującym opracowaną metodę będzie zastosowanie metamateriałów o ujemnym współczynniku Poissona do modelowania narastających sił montażu w złączach meblowych.

Kolejna część badań zawiera w sobie analizę porównawczą, wykonaną pomiędzy korpusami meblowymi w środowisku *MES*. Symulacja komputerowa pozwoliła zweryfikować hipotezę, że siły montażowe w dużym stopniu wpływają na sztywność korpusów mebli skrzyniowych poddanych obciążeniu. Wykorzystanie metody porównawczej wykorzystującej zastępczy moduł sprężystości obliczony i przypisany jako właściwość uproszczonych modeli łączników, okazuje się skutecznym sposobem prowadzenia analiz porównawczych w relatywnie krótkim czasie. Podobnie jak w pozostałych badaniach, analizie poddano wyniki badań uzyskane podczas testowania połączeń wykorzystujących mimośrody. Brak istotnych

różnic pomiędzy właściwościami połączeń opartych na złączach tworzywowych, a właściwościami połączeń opartych na łącznikach mimośrodowych pozwala stwierdzić, że generowane przez łączniki siły montażowe wpłynęły korzystnie na zmarginalizowanie wpływu materiału łącznika. Na podstawie wyników, można stwierdzić, iż np. złącze przesuwno-zaczepowe mogłoby być dobrą alternatywą dla łącznika mimośrodowego i w praktyce projektowania połączeń należy przedłożyć mechanikę działania złącza oraz siły w nim generowane ponad materiał z jakiego jest wykonany.

Ostatnia część pracy stanowi weryfikację hipotezy dotyczącej wpływu sił montażowych w połączeniach typu L, na wytrzymałość tych połączeń rozumianą jako ilość energii pochłoniętej podczas odziaływania siły dynamicznej. Wykazano, że zdolność połączeń do absorbowania energii znacząco zależy od wielkości sił montażowych. Przeanalizowano zmianę siły uderzenia, ugięcie próbki oraz ilość pochłoniętej energii, przy jednoczesnym dokumentowaniu zachowania się połączeń w próbach zwierania i rozwierania. W ramach analizy numerycznej metodą elementów skończonych stworzono modele symulacyjne oraz przeanalizowano zachowanie połączeń w momencie zniszczenia. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zdolność połączeń do pochłaniania energii istotnie zależy od poziomu sił montażowych. Ponadto tworzenie połączeń meblowych opartych o płytę *MDF* zwiększa ich zdolność do absorbowania energii. W przypadku wszystkich rodzajów materiałów zauważono, że podczas rozwierania dynamicznego, połączenia pochłaniają więcej energii niż podczas zwierania. Zaobserwowane w próbkach wgniecenia po uderzeniu młota udarowego można uznać za pierwszy wyraźny sygnał potwierdzający dobrą jakość połączenia. Stwierdzono istotną dodatnią korelację pomiędzy siłami montażowymi w połączeniach, a sztywnością i wytrzymałością połączeń. Badania wykorzystujące obciążenia dynamiczne wykazały zależność zauważoną podczas badań wykorzystujących obciążenia statyczne, że połączenia zwierane wykazują odpowiednio połowę sił niszczących w porównaniu z połączeniami rozwieranymi. Płyta wiórowa oraz *MDF* w równym stopniu wpływają na poziom siły niszczącej połączenie. Ta obserwacja różni się od powszechnie znanych wyników testów wykorzystujących obciążenia statyczne. Specyficzna forma uszkodzenia połączeń typu L zależy od schematów obciążeń i rodzaju użytego materiału. Wykazano przydatność wykorzystania modelu Johansona-Cooka w obliczeniach numerycznych połączeń wykonanych w materiałach drewnopochodnych. Zasugerowano jednak przeprowadzanie odrębnych badań w celu określenia dokładniejszych parametrów tego modelu.

5. Literatura

[1] M. Podskarbi, J. Smardzewski, Numerical modelling of new demountable fasteners for frame furniture, Eng. Struct. 185 (2019) 221–229. doi:10.1016/j.engstruct.2019.01.135.

[2] J.-L. Yhang, C.A. Eckelman, Rational design of multi-dowel corner joints in case construction, For. Prod. J. 43 (1993) 52–58.

[3] A. Kasal, J. Zhang, M. Yüksel, Y.Z. Erdil, Effects of screw sizes on load bearing capacity and stiffness of five-sided furniture cases constructed of particleboard and medium density fiberboard, For. Prod. J. 58 (2008) 25–32.

[4] N. Tankut, Effect of various factors on the rigidity of furniture cases, African J. Biotechnol. 8 (2009) 5265–5270.

[5] M. Atar, A. Ozcifci, M. Altinok, U. Celikel, Determination of diagonal compression and tension performances for case furniture corner joints constructed with wood biscuits, Mater. Des. 30 (2009) 665–670. doi:10.1016/j.matdes.2008.05.023.

[6] M. Atar, H. Keskin, A. Ustundag, A. Togay, Z. Candan, H. Peker, Impacts of different joint angles and adhesives on diagonal tension performances of box-type furniture, BioResources. 5 (2009) 343–355. doi:10.15376/biores.5.1.343-355.

[7] A.N. Tankut, N. Tankut, Evaluation the effects of edge banding type and thickness on the strength of corner joints in case-type furniture, Mater. Des. 31 (2010) 2956–2963. doi:10.1016/j.matdes.2009.12.022.

[8] J. Smardzewski, B. Rzepa, H. Kiliç, Mechanical properties of externally invisible furniture joints made of wood-based composites, BioResources. 11 (2016) 1224–1239. doi:10.15376/biores.11.1.1224-1239.

[9] J. Smardzewski, S. Dzięgielewski, Stability of cabinet furniture backing boards, Wood Sci. Technol. 28 (1993) 35–44. doi:10.1007/BF00193874.

[10] C.A. Eckelman, R. Rabiej, A comprehensive method of analysis of case furniture, For. Prod. J. 35 (1985) 62–68.

[11] V. Jivkov, A. Marinova, Investigation on ultimate bending strength and stiffness under compression of corner joints from particleboard, in: Int. Sci. Conf. Inter. Furnit. Des. 10th Aniversary Celebr. Eng. Des. Bulg., Sofia, 2005: pp. 155–163.

[12] V. Vassiliou, I. Barboutis, Bending strength of furniture corner joints constructed with insert fittings, Ann. WULS - SGGW, For. Wood Technol. 274 (2009) 268–274.

[13] A. Kasal, M. Yüksel, E. Yusuf Ziya, T. Kuşkun, Effects of the panel and fastener type on bending moment capacity of L-type joints for furniture cases, Pro Ligno. 11 (2016) 426–431.

[14] Ç.N. Yerlikaya, Effects of glass–fiber composite, dowel, and minifix fasteners on the failure load of corner joints in particleboard case-type furniture, Mater. Des. 39 (2012) 63–71. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.024.

[15] I.H. Demici, The experimental and finite element analysis of diagonal tensile tests conducted on frame type constructed corner joints, Technology. 14 (2011) 11–21.

[16] J. Smardzewski, R. Kłos, Modeling of joint substitutive rigidity of board elements, Ann. WULS - SGGW, For. Wood Technol. 73 (2011) 7–15.

[17] Ł. Krzyżaniak, J. Smardzewski, Modeling of externally invisible cabinet furniture joints, in: 28th Int. Conf. Wood Modif. Technol. 2017, Implement. Wood Sci. Woodwork. Sect., Zagreb, 2017: pp. 191–197.

[18] V. Kamperidou, I. Barboutis, V. Vassiliou, Correlation between bending and tension strength of corner and middle joints constructed with beech and poplar wood, Ann. WULS - SGGW, For. Wood Technol. 50 (2011) 44–50.

[19] M. Atar, A. Ozcifci, The effects of screw and back panels on the strength of corner joints in case furniture, Mater. Des. 29 (2008) 519–25.

[20] I. Kureli, M. Altinok, Determination of mechanical performances of the portable fasteners used on case furniture joints, 6 (2011) 4893–901. doi.org/10.5897/AJAR11.284.

[21] S. Maleki, A.R. Haftkhani, M. Dalvand, M. Faezipour, M. Tajvidi, Bending moment resistance of corner joints constructed with spline under diago-nal tension and compression, J For Res 23 (2012) 481–90.

[22] Ç.N. Yerlikaya, Kabin tipi demonte mobilyalarda birles¸tirmelerin eğilme momenti üzerine kavela ve minifiksin etkisi, J For Fac 14 (2013) 36–49.

[23] M. Derikvand, C.A. Eckelman, Bending moment capacity of L-shaped mitered frame joints constructed of MDF and particleboard, BioResources. 10 (2015) 5677–90. doi.org/10.15376/biores.10.3.5677-5690.

[24] S. Demirci, H. Diler, A. Kasal, Z.Y. Erdil, Effects of wood species, number of teeth, and adhesive type on moment capacities of box-joints, BioResources. 15 (2020) 3136–46. doi.org/10.15376/biores.15.2.3136-3146.

[25] S. Hajdarević, S. Martinović, Effect of tenon length on flexibility of mortise and tenon joint, Procedia Eng 69 (2014) 678–85.

[26] J. Smardzewski, W. Lewandowski, İmirzi H.Ö. İmirzi, Elasticity modulus of cabinet furniture joints, Mater. Des. 60 (2014) 260–6.

[27] P. Joščák, P. Krasula, P. Vimpel, Strength properties of corner joints and extending joints on honeycomb boards, Ann. WULS - SGGW, For. Wood Technol. 87 (2014) 97–104.

[28] V. Záborský V, A. Sikora, M. Gaff, V. Kašičková, V. Borůvka, Erdil, Effect of selected factors on stiffness of dowel joints, BioResources. 13 (2018) 5416–31.

[29] S. Heimbs, M. Pein, Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts, Compos. Struct. 89 (2009) 575–88.

[30] J. Smardzewski, The reliability of joints and cabinet furniture, Wood Res. 54 (2009) 67–76.

[31] A.N. Tankut, N. Tankut, Investigations the effects of fastener, glue, and composite material types on the strength of corner joints in case-type furniture construction, Mater. Des. 30 (2009) 4175–82. d

[32] I. Horman, S. Hajdarević, S. Martinović, N. Vukas, Numerical analysis of stress and strain in a wooden chair, Drv. Ind. 61 (2010) 151–8.

[33] Ç.N. Yerlikaya, A. Aktas, Enhancement of load-carrying capacity of corner joints in case-type furniture, Mater. Des. 37 (2012) 393–401.

[34] Ç.N. Yerlikaya, Failure load of corner joints, which are reinforced with glass-fiber fabric in case-type furniture, Sci Res Essays 8 (2013) 325–39. doi.org/10.5897/SRE12.419.

[35] Ç.N. Yerlikaya, Investigation into the effect of some factors on the failure load of corner joints reinforced with glass-fiber fabric in case-type furniture, Wood Res. 58 (2013) 307–18.

[36] M. Derikvand, G. Ebrahimi, Finite element analysis of stress and strain distributions in mortise and loose tenon furniture joints, J For Res 25 (2014) 677–81.

[37] J. Smardzewski, M. Słonina, M. Maslej, Stiffness and failure behaviour of wood based honeycomb sandwich corner joints in different climates, Compos. Struct. 168 (2017) 153–163. doi:10.1016/j.compstruct.2017.02.047.

[38] Ł. Krzyżaniak, J. Smardzewski, Strength and stiffness of new designed externally invisible and demountable joints for furniture cases, Eng. Struct. 199 (2019) 109674. doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109674.

[39] EN-322, Wood-based panels. Determination of moisture content, 1993.

[40] EN-323, Wood-based panels. Determination of density, 1993.

[41] EN-310, Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength, 1993.

[42] J. Smardzewski, Furniture design, Springer, Cham, 2015. doi:10.1007/978-3-319-19533-9.

[43] G.R. Johnson, W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proc. 7th Symp. Ballist., Hague, Nether (1983) 541–47.

[44] A.S. Milani, W. Dabboussi, J.A. Nemes, R.C. Abeyaratne, An improved multi-objective identification of Johnson–Cook mate-rial parameters, Int J Impact Eng, 36 (2) (2009), pp. 294-302

[45] A. Shrot, M. Bäker, Determination of Johnson–Cook parameters from machining simula-tions, Comput Mater Sci, 52 (1) (2012), pp. 298-304

[46] A.V. Sobolev, M.V. Radchenko, Use of Johnson–Cook plasticity model for numerical simulations of the SNF shipping cask drop tests, Nucl Energy Technol, 2 (4) (2016), pp. 272-276

[47] A. Banerjee, S. Dhar, S. Acharyya, D. Datta, N. Nayak, Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel, Mater Sci Eng, A, 640 (2015), pp. 200-209

[48] S. Sahu, D. Pada Mondal, M. Dass Goel, M. Zahid Ansari, Finite element analysis of AA1100 elasto-plastic behaviour using Johnson-Cook model, Mater Today: Proc, 5 (2) (2018), pp. 5349-5353

[49] M. Murugesan, D.W. Jung, Johnson cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications, Materials (Basel) 2019;12 doi:10.3390/ma12040609.

[50] S. Gupta, S. Abotula, A. Shukla, Determination of Johnson-Cook parameters for cast aluminum alloys, J Eng Mater Technol, 136 (2014), p. 34502, 10.1115/1.4027793

[51] S. Akram, S. Jeffery, M. Khan, M. Fahand, A. Mubashar, L. Ali, Numerical and experimental investigation of Johnson–Cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach, Adv Mech Eng 2018;10:1–14. doi:10.1177/1687814018797794

[52] M. Šimek, E. Haviarová, C.A. Eckelman, The end distance effect of knock-down furniture fasteners on bending moment resistance of corner joints, Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun (2008), 56, 203–209, doi:10.11118/actaun200856020203

[53] A. Kasal, Effect of the number of screws and screw size on moment capacity of furniture corner joints in case construction, For. Prod. J. 58 (2008) 36–44.

[54] A. Kasal, Estimation equations for moment resistances of L-type screw corner joints in case goods furniture, For. Prod. J. 58 (2008) 21–27.

[55] J. Smardzewski, S. Prektat, Furniture Joints with Neodymium Magnets, Implementation of wood science in woodworking sector 2(1), (2015) 201–207.

[56] Abaqus Inc. ABAQUS/Standard output variable identifiers," Section 4.2.1 of the ABAQUS Analysis User's Manual 2020.

[57] Abaqus Inc. ABAQUS/Explicit output variable identifiers," Section 4.2.2 of the ABAQUS Analysis User's Manual 2020.

6. Streszczenie

Zastosowanie odpowiednich technologii łączenia elementów umożliwia dystrybucję mebli w postaci płaskich paczek. Technologie te powinny wykorzystywać łączniki, które są funkcjonalne, estetyczne, trwałe i bezpieczne w użytkowaniu. Postanowiono wykonać prototypy innowacyjnych złączy meblowych i poprzez odpowiednie badania ocenić ich jakość w porównaniu z najpopularniejszymi łącznikami mimośrodowymi. Celem poznawczym badań było określenie wpływu sił montażowych na sztywność i wytrzymałość kątowych połączeń meblowych z nowo zaprojektowanymi złączami. Zaprojektowano 2 rodzaje złączy: przesuwno-zaczepowy (S) oraz skrętno-sprężny (M), które wykonano w technice druku 3D SLS z poliamidu. Wytworzone złącza oraz łączniki mimośrodowe zostały zamontowane w połączeniach kątowych wykonanych z płyt wiórowych, płyt pilśniowych o średniej gęstości, klejonych płyt pilśniowych dużej gęstości, sklejce oraz drewnie odpowiednio do typu złącza. Opracowano metody wyznaczania i sposoby pomiaru sił wewnętrznych ujawniających w złączach podczas ich montażu w połączeniach. Zmontowane połączenia poddano próbom zwierania i rozwierania z użyciem obciążenia statycznego i dynamicznego. Wyznaczono sztywność, wytrzymałość oraz ilość energii absorbowanej przez wybrane połączenia meblowe podczas zwierania i rozwierania. Metodą elementów skończonych opracowano modele numeryczne wykonanych połączeń meblowych. Wykorzystano prostopadłościenne i tetrahedralne elementy skończone, nieliniowość geometryczną i materiałową oraz interakcje pomiędzy elementami połączenia w celu dokładnego skalibrowania wszystkich modeli numerycznych. Do obciążenia modeli wykorzystano wartości sił i ugięć pomierzonych w trakcie badań eksperymentalnych. Łącznie na podstawie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych wyjaśniono przyczyny uszkodzeń w połączeniach w zależności od rodzaju i wartości sił montażowych, materiału złączy i zastosowanych schematów obciążeń. Porównano właściwości mechaniczne nowo zaprojektowanych złączy z tradycyjnymi łącznikami mimośrodowymi montowanymi w połączeniach kątowych mebli skrzyniowych. W wykazano, że największy wpływ na sztywność i wytrzymałość połączenia mają siły montażowe. Nowo zaprojektowane złącza przesuwno-zaczepowe pozwoliły uzyskać siły montażowe, wywołujące docisk powierzchni łączonych elementów, jednak w zdecydowanie mniejszym stopniu w porównaniu do złączy mimośrodowych. Połączenia wykonane w oparciu o złącza skrętno-sprężne nie pozwoliły na zarejestrowanie istotnych sił montażowych. Największą sztywnością i wytrzymałością podczas zwierania oraz rozwierania, zaraz po połączeniach z mimośrodami wyróżniały się połączenia ze złączami przesuwno-zaczepowymi. Wykazano również, że zdolność połączeń do pochłaniania energii uderzenia istotnie zależy od wartości sił montażowych oraz rodzaju użytych materiałów. Ponadto potwierdzono dodatnią korelację między siłami montażowymi a sztywnością wytrzymałością połączeń, zauważoną wcześniej w badaniach statycznych.

7. Abstract

The distribution of furniture in the form of flat packages is possible thanks to the use of appropriate technologies of joining elements. These technologies should use fasteners that are functional, aesthetic, durable and safe to use. It was decided to make prototypes of innovative furniture joints and through appropriate tests to assess their quality in comparison with the most popular eccentric connectors. The aim of the research was to determine the influence of assembly forces on the stiffness and strength of angular furniture connections with newly designed connectors. Two types of connectors were designed: slide-catch (S) and tension-twist (M), which were made in the 3D SLS printing technology from polyamide. Prototyped connectors and eccentric joints were mounted in angular joints made of particle boards, medium-density fibreboards, glued high-density fibreboards, plywood and wood according to the type of the connector. Methods of determining and measuring the internal forces revealed between connectors and joints during their assembly in joints have been developed. The assembled connections were subjected to compression and tension tests with the use of static and dynamic loads. Stiffness, strength and the amount of energy absorbed by selected furniture joints during closing and opening were determined. Using the finite element method, numerical models of the furniture connections made were developed. They used cuboidal and tetrahedral finite elements, geometric and material nonlinearities, and interactions between the connection elements to accurately calibrate all numerical models. The values of forces and deflections measured during the experimental tests were used to load the models. In total, on the basis of the results of experimental tests and numerical calculations, the causes of damage in connections were explained depending on the type and value of assembly forces, joint material and applied load patterns. The mechanical properties of the newly designed fasteners were compared with the traditional eccentric fasteners mounted in the corner joints of chest furniture. It has been shown that assembly forces have the greatest impact on the stiffness and strength of the connection. The newly designed slide-catch connectors allowed to obtain assembly forces that exert pressure on the surfaces of the joined elements, but to a much lesser extent compared to eccentric connectors. Connections made on the basis of tension-twist couplings did not allow for recording significant assembly forces. The greatest stiffness and strength during short-circuiting and opening, right after the eccentric connections, were distinguished by the slide-catch connections. It has also been shown that the ability of the joints to absorb impact energy significantly depends on the value of assembly forces and the type of materials used. Moreover, a positive correlation between assembly forces and stiffness, and strength of connections, previously observed in static tests, was confirmed.

8. Kopia artykułów stanowiących cykl publikacji

9. Pisemne oświadczenia

Współautorów prac tworzących cykl o wyrażeniu zgody na wykorzystanie danych publikacji dla potrzeb przeprowadzenia przewodu doktorskiego oraz określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie publikacji.