



Tektura falista jako wszechstronny materiał do opakowań i konstrukcji inżynierskich – przegląd zastosowań

Corrugated board as a versatile material for packaging and engineering structures – an overview of applications

TOMASZ GARBOWSKI, JANUSZ RUTKOWSKI

DOI: 10.15199/54.2024.12.3

Tektura falista, materiał znany głównie z opakowań, jest znacznie bardziej wszechstronna niż się powszechnie uważa. W artykule omówiono historię tektury falistej oraz jej różnorodne zastosowania, takie jak opakowania, tymczasowe schronienia i meble. Artykuł przedstawia także innowacyjne zastosowania tektury falistej w budownictwie tymczasowym oraz jej rosnące znaczenie w kontekście zrównoważonego rozwoju, gospodarki o obiegu zamkniętym i recyklingu. Na zakończenie omówiono przyszłość tektury falistej jako materiału przyjaznego środowisku, zdolnego do zastępowania tworzyw sztucznych i wspierania innowacji w opakowaniach oraz konstrukcjach.

Słowa kluczowe: tektura falista, mechanika materiałów, struktury pofalowane, opakowania, zrównoważony rozwój, gospodarka o obiegu zamkniętym, recykling

Corrugated board, a material primarily known for packaging, is much more versatile than commonly believed. This article discusses the history of corrugated board and its diverse applications, such as packaging, temporary shelters, and furniture. Furthermore, it highlights innovative applications of corrugated cardboard in temporary construction and its growing importance in sustainable development, circular economy, and recycling. Finally, the future of corrugated cardboard is discussed as an eco-friendly material capable of replacing plastics and supporting innovations in both packaging and construction.

Keywords: corrugated board, material mechanics, corrugated structure, packaging, sustainability, circular economy, recycling

Wprowadzenie – codzienne zastosowania tektury falistej

Tektura falista to jeden z tych materiałów, które spotyka się na co dzień, często nie zdając sobie sprawy z jej wszechstronności i znaczenia – od opakowań po bardziej złożone konstrukcje użytkowe oraz inżynierskie. Ten pozornie prosty materiał odgrywa kluczową rolę w wielu

aspektach współczesnego życia. Jest obecny zarówno w domach, biurach, jak i zakładach przemysłowych na całym świecie. Niemal nieograniczone zastosowania sprawiają, że tektura falista jest jednym z najważniejszych materiałów w sektorze opakowań oraz w wielu innych branżach.

Krótkie spojrzenie na historię tektury falistej

Choć tektura falista może wydawać się nowoczesnym wynalazkiem, jej historia sięga XIX w. W 1856 r. opatentowano pierwsze zastosowanie fali w papierze, które pierwotnie miało na celu wzmocnienie tkanin do kapeluszy. Dopiero w 1871 r. Albert Jones z Nowego Jorku opatentował pierwszą tekturę falistą stosowaną w opakowaniach. Początkowo służyła do ochrony delikatnych towarów, takich jak szklane butelki. Z biegiem lat technologia produkcji i zastosowanie tektury falistej szybko się rozwijały, a w 1895 r. wprowadzono pierwszy karton z tektury falistej, który zrewolucjonizował sektor opakowań. Do dziś tektura falista pozostaje fundamentem przemysłu opakowań, ale jej zastosowania wykraczają daleko poza pudełka.

Co sprawia, że tektura falista jest wyjątkowa?

Podstawową cechą, która sprawia, że tektura falista jest tak wyjątkowym materiałem, jest jej struktura. To właśnie unikalna kombinacja warstw pofalowanych i płaskich powierzchni nadaje tekturze falistej jej niezwykle właściwości mechaniczne. Falista warstwa (nazywana flutingiem) działa jak amortyzator, co czyni ją idealnym materiałem ochronnym.

Oprócz tego, że jest wytrzymała, tektura falista jest również łatwa w obróbce, można ją formować, ciąć i dostosowywać do różnych kształtów i rozmiarów. Ta elastyczność, w połączeniu z jej wytrzyma-

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (ORCID: 0000-0002-9588-2514); dr inż. **J. Rutkowski** (janusz.rutkowski@up.poznan.pl), Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu



tością, sprawia, że nadaje się zarówno do małych opakowań, jak i do większych, bardziej skomplikowanych konstrukcji.

Tektura falista jest również materiałem ekologicznym. Papier, z którego jest wytwarzana, pochodzi z surowców odnawialnych, a sam materiał jest w pełni biodegradowalny i łatwy do recyklingu. To czyni ją doskonałym wyborem w dobie rosnącej troski o środowisko i zrównoważony rozwój. W porównaniu do tworzyw sztucznych, tektura falista ma o wiele mniejszy wpływ na środowisko, co dodatkowo zwiększa jej atrakcyjność jako materiału opakowaniowego i konstrukcyjnego.

Przegląd literatury – od historii po przyszłość tektury falistej

Kontekst historyczny i rozwój tektury falistej

Tektura falista, początkowo opracowana jako materiał ochronny do opakowań, przekształciła się we wszechstronny materiał z zastosowaniami daleko wykraczającymi poza zwykłe pudełka. Jej ewolucja, od podstawowego materiału opakowaniowego po cenny składnik rozwiązań inżynierskich, podkreśla potencjał adaptacyjny tego materiału. Wczesne badania skupiały się na podstawowych właściwościach i zastosowaniach w opakowaniach, co stworzyło fundament do dalszej eksploracji jej szerszych możliwości mechanicznych i zastosowań w budownictwie, schronieniach awaryjnych oraz zrównoważonym projektowaniu [3, 4, 7].

Właściwości mechaniczne i zachowanie strukturalne

Właściwości mechaniczne tektury falistej stanowią klucz do jej funkcjonalności w różnych zastosowaniach. Badania analizowały jej wytrzymałość na ściskanie, sztywność na zginanie oraz odporność na czynniki środowiskowe, co jest istotne zarówno w opakowaniach, jak i w bardziej skomplikowanych konstrukcjach inżynierskich. Analizy eksperymentalne pokazują, że takie czynniki, jak profil fali, typy kleju i warunki środowiskowe (np. wilgotność, temperatura), mają istotny wpływ na nośność i trwałość materiału. Allaoui i in. przeprowadzili fundamentalne badania nad zachowaniem tektury pod wpływem ściskania, podkreślając, jak jej unikalna struktura przyczynia się do wytrzymałości i odporności [1]. Park i in. zbadali wpływ wilgoci na sztywność tektury na zginanie, ukazując znaczenie warunków środowiskowych dla mechanicznych właściwości materiału [18]. Badania Duonga i in. oraz El Hafidi i in. potwierdzają, że rodzaj kleju i konfiguracja fali odgrywają kluczową rolę w określaniu nośności, przy czym czynniki środowiskowe dodają kolejny poziom zmienności w reakcjach materiału [5, 6]. Gilchrist i in. przedstawili wnioski na temat zachowania tektury falistej przy złożonych obciążeniach, co jest kluczowe do zrozumienia, jak materiał zachowuje się w rzeczywistych zastosowaniach, w tym w budownictwie i opakowaniach pod złożonymi obciążeniami [14]. Praca Garbowskiego i Boreckiego pokazała natomiast potencjalny wpływ futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na mechaniczne właściwości tektury, co może stanowić interesujący kierunek dla przyszłych badań [7].

Optymalizacja materiałowa i innowacje projektowe

Znaczna część współczesnych badań koncentruje się na optymalizacji struktury tektury falistej, aby zwiększyć jej wydajność zarówno w opakowaniach, jak i w innych kontekstach inżynierskich. Optymalizacja obejmuje parametry geometryczne fali oraz skład warstw tektury. Garbowski i in. przeanalizowali różne parametry strukturalne w produkcji, umożliwiając projektowanie tektury dostosowanej do specyficznych wymagań [10]. Biolzi i in. modelowali właściwości mechaniczne, podkreślając, jak zmienne profile fal i skład materiału mogą znacznie poprawić wydajność, czyniąc tekturę odpowiednią do zastosowań nośnych i innych aplikacji inżynierskich [3]. Prace Savova i in. badały rozwój wytrzymałości na ściskanie do zastosowań o dużym obciążeniu, podkreślając potencjał tektury falistej w strukturach innych niż tradycyjne opakowania [24]. Ponadto Watanabe i in. zbadali potencjalne możliwości strukturalne tektury w architekturze, wskazując na jej zastosowania w bardziej innowacyjnych projektach [27].

Innowacyjne zastosowania w inżynierii i architekturze

Jak już wspomniano, poza opakowaniami tektura falista ma potencjał w budowie schronień awaryjnych, tymczasowych konstrukcji i zastosowaniach architektonicznych. Cugnasca i in. przeprowadzili pionierskie badania nad wykorzystaniem tektury falistej jako materiału budowlanego, ukazując jej przydatność do budowy schronień awaryjnych, ze względu na lekkość i właściwości izolacyjne [4]. Giudicianni i in. rozszerzyli ten temat, badając tekturę jako materiał izolacyjny, co dodatkowo wspiera jej potencjał w zrównoważonych i tymczasowych konstrukcjach [15]. W zastosowaniach wymagających dużej wytrzymałości, Schaepe i in. ocenili tekturę pod kątem jej wydajności, ukazując adaptacyjność i niezawodność w specjalistycznych zastosowaniach opakowaniowych, wykraczających poza dobra konsumenckie [25]. Andrzejak i in. badali również wpływ perforacji, które mogą zwiększać opcje dostosowania zarówno do struktury, jak i zastosowań opakowaniowych [2].

Zrównoważony rozwój i gospodarka o obiegu zamkniętym

Potencjał tektury falistej w zakresie recyklingu i jej rola w zrównoważonym rozwoju są kluczowymi tematami we współczesnych badaniach. Paunović i in. podkreślili znaczenie optymalizacji opakowań z tektury falistej, aby poprawić wytrzymałość i zrównoważony rozwój, co wpisuje się w zasady gospodarki o obiegu zamkniętym i przedłużanie cyklu życia produktów [22]. Jest to zgodne z pracami Garbowskiego, który badał degradację właściwości mechanicznych w procesach produkcyjnych, co dostarcza wglądu w potencjalne obszary poprawy trwałości i zrównoważoności materiału [7].

Badania Mrówczyńskiego i in. oraz Rogalki i in. wykorzystywały analizę obrazów i algorytmy genetyczne do zrozumienia i przewidywania geometrii tektury, pokazując innowacyjne metody poprawy zrównoważoności poprzez ulepszoną konstrukcję i efektywność materiałową [20, 23].



Techniki modelowania predykcyjnego konstrukcji z tektury falistej

Techniki homogenizacji są cenne dla modelowania zachowania tektury falistej, umożliwiając badaczom przewidywanie reakcji mechanicznych w zmieniających się warunkach. Garbowski i współpracownicy przeprowadzili szeroko zakrojone badania w tej dziedzinie, z których wynika, że numeryczna homogenizacja jest dokładna, co potwierdzają testy eksperymentalne i symulacje [11, 18]. Marek i Garbowski przeprowadzili analizę wrażliwości w procesie homogenizacji, co dodatkowo dopracowało modele predykcyjne, dostarczając narzędzi do optymalizacji wykorzystania tektury w złożonych zastosowaniach inżynierskich [18].

Te techniki, jak wskazano w przeglądach Garbowskiego, podkreślają znaczenie dokładnego modelowania w rozszerzaniu zastosowań tektury falistej poza opakowania, przyczyniając się do zastosowań wymagających niezawodnych, wysokowydajnych materiałów [8].

Wyzwania i ograniczenia

Pomimo swojej wszechstronności, tektura falista ma ograniczenia, szczególnie w zakresie nośności i podatności na czynniki środowiskowe. Przeglądy Garbowskiego podkreślają częste błędy w szacowaniu nośności, podkreślając potrzebę precyzyjnych metodologii zarówno w testowaniu, jak i projektowaniu [9]. Badania El Hafidi i innych wskazują, że wilgoć i narażenie na środowisko mogą pogarszać właściwości mechaniczne, co stanowi wyzwanie, które należy rozwiązać w zastosowaniach zarówno opakowaniowych, jak i konstrukcyjnych [6]. Zhang i in. podkreślili wpływ kombinacji obciążeń ściskających i ścinających na odpowiedź mechaniczną tektury, co dodatkowo ilustruje ograniczenia związane z obciążeniami złożonymi [28].

Kierunki rozwoju i nowoczesne technologie

Patrząc w przyszłość, innowacje, takie jak algorytmy genetyczne i zaawansowane techniki obrazowania, otwierają nowe ścieżki optymalizacji struktury i wydajności tektury falistej. Rogalka i in. pokazali potencjał tych technologii dla tworzenia bardziej efektywnych i nośnych projektów [23]. Z drugiej strony przyszłością jest optymalizacja tektury falistej. Praca Garbowskiego i Boreckiego [7] skupia się na analizie futurystycznych kształtów fali, takich jak segmenty półkolisty czy zmienne okresy sinusoidy, które potencjalnie mogą wpływać na poprawę parametrów mechanicznych tektury falistej. Badania te ukazują, że zastosowanie takich innowacyjnych kształtów mogłoby znacząco zwiększyć nośność i sztywność tektury, jednocześnie optymalizując koszty produkcji. Autorzy wskazują również na możliwość dalszego rozwoju w projektowaniu tych struktur, podkreślając wpływ na przyszłe zastosowania tektury w konstrukcjach inżynierskich.

Od opakowań po schronienia – inżynieria w praktyce

Tektura falista, choć kojarzona głównie z przemysłem opakowaniowym, znalazła zastosowanie także w wielu innych dziedzinach inżynierii.

Jej wszechstronność, wytrzymałość i ekologiczny charakter sprawiają, że może być stosowana nie tylko do produkcji pudełek, ale również w bardziej zaawansowanych konstrukcjach. Architekci i projektanci zaczęli dostrzegać potencjał tego materiału w budownictwie tymczasowym i kreatywnym, czego potwierdzeniem jest artykuł J. Łątki, publikowany w „Przeglądzie Papierniczym” już w 2014 r. [16]. Konstrukcje, takie jak schronienia awaryjne, pawilony wystawowe, a nawet meble, są coraz częściej budowane właśnie z tektury falistej. Dzieje się tak, ponieważ jest to materiał tani, łatwy w transporcie, a jednocześnie wystarczająco wytrzymały, by sprostać różnorodnym wymaganiom konstrukcyjnym.

Innowacyjne zastosowania w konstrukcjach tymczasowych i schronieniach awaryjnych

Jednym z najbardziej innowacyjnych zastosowań tektury falistej jest jej wykorzystanie w konstrukcjach tymczasowych. W sytuacjach kryzysowych, takich jak klęski żywiołowe czy konflikty zbrojne, szybkie i efektywne budowanie schronień jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i podstawowych warunków życia. Tektura falista, dzięki swojej lekkości, wytrzymałości i łatwości transportu, staje się idealnym materiałem do budowy tymczasowych schronień.

Przykładem może być projekt Shigeru Bana, japońskiego architekta, który zyskał międzynarodowe uznanie dzięki wykorzystaniu tektury falistej w budowie schronień dla uchodźców oraz ofiar katastrof. Jego projekty charakteryzują się nie tylko funkcjonalnością, ale również estetyką i dbałością o środowisko. Konstrukcje te są tanie w produkcji, łatwe do zmontowania i zapewniają ochronę przed warunkami atmosferycznymi. Tektura falista stosowana w tego rodzaju budowlach jest specjalnie wzmocniana, aby wytrzymać deszcz, wiatr oraz inne czynniki zewnętrzne.

Konstrukcje te mogą również być wykorzystywane w mniej ekstremalnych sytuacjach, na przykład na festiwalach, wczasach plenerowych czy na wystawach, gdzie konieczne jest zapewnienie tymczasowej infrastruktury. W takich przypadkach tektura falista stanowi doskonały kompromis między funkcjonalnością, kosztem a ekologią [16].

Meble z tektury falistej – nowy trend w projektowaniu

Tektura falista znalazła swoje miejsce również w projektowaniu mebli [17, 26]. W dobie rosnącej świadomości ekologicznej konsumenci coraz częściej poszukują produktów, które są zarówno funkcjonalne, jak i przyjazne środowisku. Meble z tektury falistej idealnie wpisują się w tę tendencję. Stoły, krzesła, regały, a nawet łóżka wykonane z tektury falistej cieszą się rosnącą popularnością nie tylko ze względu na swoją oryginalność, ale także lekkość i łatwość montażu.

Meble tekturowe mają również praktyczne zalety. Są niezwykle lekkie, co ułatwia ich transport i przenoszenie, ale jednocześnie są zaskakująco wytrzymałe. Dzięki specyficznej strukturze fali, są w stanie wytrzymać duże obciążenia, a jednocześnie są łatwe w produkcji i recyklingu. Dodatkowo, tektura falista oferuje projektantom niemal nieograniczone możliwości twórcze – może być formowana w różnorodne kształty, dzięki czemu każdy mebel jest unikatowy.



Przykłady wykorzystania tektury falistej w meblarstwie obejmują zarówno prostsze projekty DIY, jak i skomplikowane, designerskie konstrukcje. Wielu projektantów postrzega tekturę falistą jako materiał przyszłości, który łączy nowoczesny design z ekologiczną odpowiedzialnością.

Wyzwania inżynierskie – trwałość, odporność na warunki atmosferyczne i zrównoważony rozwój

Mimo wielu zalet, inżynierowie i projektanci muszą mierzyć się również z pewnymi wyzwaniami związanymi z wykorzystaniem tektury falistej w bardziej wymagających zastosowaniach. Jednym z kluczowych problemów jest trwałość tego materiału w długim okresie użytkowania. Tektura falista, choć wytrzymała, jest wrażliwa na wilgoć i długotrwałe oddziaływanie warunków atmosferycznych [19]. Aby przeciwdziałać tym ograniczeniom, stosuje się różne metody impregnacji i laminowania, które zwiększają jej odporność na wodę, pleśń oraz inne czynniki zewnętrzne.

Kolejnym wyzwaniem jest zachowanie zrównoważonego rozwoju. Choć tektura falista jest materiałem ekologicznym, inżynierowie muszą dążyć do dalszej optymalizacji procesów produkcji, aby zminimalizować zużycie surowców i energii. Stosowanie tektury falistej w bardziej zaawansowanych projektach inżynierskich wymaga również ciągłych badań nad jej właściwościami mechanicznymi, aby móc odpowiednio dostosować materiał do wymagań konstrukcyjnych.

Zrównoważony rozwój i gospodarka o obiegu zamkniętym

Ważnym aspektem w kontekście wykorzystania tektury falistej w inżynierii jest jej rola w gospodarce o obiegu zamkniętym. Tektura falista jest w pełni biodegradowalna i podlega łatwemu recyklingowi, co czyni ją doskonałym materiałem w dobie rosnącej świadomości ekologicznej. Dzięki zdolności do wielokrotnego przetwarzania, tektura falista przyczynia się do redukcji odpadów i zmniejsza potrzebę wykorzystywania surowców pierwotnych.

W praktyce oznacza to, że opakowania i konstrukcje z tektury falistej mogą być wielokrotnie używane, a po zakończeniu ich cyklu życia łatwo przekształcane w nowe produkty. Ten cykl życia materiału idealnie wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju i pomaga redukować negatywny wpływ na środowisko naturalne. Inżynierowie i projektanci, wykorzystując tekturę falistą, wspierają globalne wysiłki zmierzające do minimalizacji odpadów i ochrony zasobów naturalnych.

Podsumowanie – przyszłość tektury falistej

Tektura falista, choć znana od XIX w., nadal pozostaje jednym z najbardziej innowacyjnych i wszechstronnych materiałów, które mają ogromny potencjał rozwojowy. Jej trwałość, zdolność do recyklingu oraz ekologiczny charakter sprawiają, że jest i będzie kluczowym materiałem w przyszłości zarówno w sektorze opakowań, jak i w innych dziedzinach inżynierii. Przeanalizujmy jeszcze na koniec, jakie perspektywy rozwoju tektury falistej rysują się na horyzoncie i w jaki sposób może ona nadal odgrywać istotną rolę w globalnych innowacjach.

Postępy w nauce o materiałach

Obecnie intensywnie prowadzone są badania nad dalszym ulepszeniem tektury falistej, aby mogła lepiej odpowiadać na potrzeby współczesnego świata. Badania te koncentrują się na kilku kluczowych obszarach:

- **Zwiększenie wytrzymałości.** Prace nad nowymi formułami klejów i metodami laminowania warstw papieru mają na celu poprawę wytrzymałości tektury falistej, przy jednoczesnym zachowaniu jej lekkości. To pozwoli na jeszcze bardziej wytrzymałe konstrukcje opakowań, które będą mogły wytrzymać ekstremalne obciążenia i warunki transportu, zwłaszcza w handlu międzynarodowym.

- **Odporność na wilgoć.** Kolejnym obszarem badań jest zwiększenie odporności tektury falistej na wilgoć i wodę. Dzięki nowym metodom impregnacji i ochronnym powłokom możliwe jest wydłużenie trwałości materiału, nawet w niesprzyjających warunkach atmosferycznych. To otwiera możliwości zastosowania tektury falistej w jeszcze szerszym zakresie projektów inżynierskich, takich jak konstrukcje zewnętrzne i schronienia.

- **Nowe źródła surowców.** W duchu zrównoważonego rozwoju prowadzone są także badania nad wykorzystaniem alternatywnych surowców, takich jak włókna pochodzenia roślinnego, które mogą zastąpić tradycyjną celulozę drzewną. Dzięki temu tektura falista może stać się jeszcze bardziej przyjazna środowisku, minimalizując emisję dwutlenku węgla i zużycie zasobów naturalnych.

Zastosowania w przyszłości opakowań

Tektura falista, o czym była już wcześniej mowa, już dziś jest kluczowym materiałem w przemyśle opakowaniowym, a jej rola będzie prawdopodobnie rosła w najbliższych latach. W dobie globalizacji i rosnącej sprzedaży internetowej, potrzeba wytrzymałych, lekkich i łatwych do recyklingu opakowań staje się coraz bardziej istotna. Tektura falista, ze względu na swoje właściwości, idealnie wpisuje się w te potrzeby.

W przyszłości można spodziewać się bardziej zaawansowanych technologicznie opakowań z tektury falistej, które będą łączyły w sobie inteligentne rozwiązania, takie jak zintegrowane technologie śledzenia, wskaźniki temperatury lub czujniki wilgoci, co zapewni większą kontrolę nad procesami logistycznymi i bezpieczeństwem towarów. Ponadto dalszy rozwój personalizowanych opakowań, które mogą być drukowane na żądanie i dostosowywane do indywidualnych potrzeb klientów, zwiększy konkurencyjność tektury falistej na rynku.

Innowacje w konstrukcjach inżynierskich

Poza opakowaniami, tektura falista będzie miała coraz większe zastosowanie w dziedzinie konstrukcji inżynierskich. Dzięki swoim unikalnym właściwościom, takim jak lekkość, wytrzymałość oraz zdolność do recyklingu, może być wykorzystywana w szerokim zakresie projektów budowlanych i architektonicznych, zwłaszcza tam, gdzie liczy się tymczasowość, mobilność i niskie koszty.

Coraz częściej w architekturze tymczasowej oraz projektach związanych z pomocą humanitarną i reagowaniem na katastrofy, tektura falista będzie coraz częściej wykorzystywana jako główny materiał



budowlany. Nowoczesne schronienia i pawilony z tektury falistej są nie tylko funkcjonalne, ale również estetyczne i łatwe w montażu. W przyszłości te technologie mogą być jeszcze bardziej rozwinięte, umożliwiając szybkie i tanie budowanie konstrukcji inżynierskich w miejscach, gdzie tradycyjne materiały nie są dostępne.

Wpływ na globalne innowacje w zakresie zrównoważonego rozwoju

Rola tektury falistej w przyszłości nie będzie ograniczać się jedynie do opakowań i budownictwa. Ze względu na swoje ekologiczne właściwości, tektura falista ma już dzisiaj kluczowy potencjał w promowaniu globalnych inicjatyw na rzecz zrównoważonego rozwoju. Firmy na całym świecie, w odpowiedzi na rosnące regulacje środowiskowe i wymagania konsumentów, coraz częściej będą poszukiwać alternatyw dla tworzyw sztucznych i materiałów o wysokim śladzie węglowym.

Tektura falista, będąc w pełni biodegradowalna i łatwa do recyklingu, jest idealnym materiałem wspierającym rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym. W przyszłości możemy spodziewać się jeszcze większego zaangażowania tektury falistej w eliminację odpadów plastikowych oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych, co będzie miało kluczowe znaczenie w walce z globalnym kryzysem klimatycznym.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Allaoui S., Aboura Z., Benzeggagh M.L. 2009. "Experimental analysis of the behaviour of corrugated cardboard under compression." *Composites Science and Technology* 69 (7-8) : 1220–1226.
- [2] Andrzejak K., Mrówczyński D., Gajewski T., Garbowski T. 2024. "Investigating the Effect of Perforations on the Load-Bearing Capacity of Cardboard Packaging." *Materials* 17 (17) : 4205. doi.org/10.3390/ma17174205.
- [3] Biolzi L., Rosati G., Castellani M., Del Bianco L. 2010. "Modeling the mechanical properties of corrugated cardboard." *Materials & Design* 31 (7) : 3503–3512.
- [4] Cugnasca C.E., Cugnasca P.S. 2006. "Corrugated cardboard performance as a building material for emergency shelters." *Journal of Materials in Civil Engineering* 18 (5) : 659-664.
- [5] Duong H., Khanh B., Binh N. 2017. "Effects of fluting profile and adhesive type on the performance of corrugated cardboard." *Journal of Paper and Pulp Technology* 58 (1) : 98-104.
- [6] El Hafidi S., Aboura Z., Allaoui S., Benzeggagh M.L. 2018. "Mechanical behavior of corrugated cardboard subjected to various environmental conditions." *Mechanics of Materials* 122 : 112-123.
- [7] Garbowski T., Borecki P. 2024. "Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board | Analiza wpływu futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na parametry mechaniczne i koszt jednościennej tektury falistej." *Przegląd Papierniczy* 80 (11) : 609-616.
- [8] Garbowski T. 2024. "The role of homogenization in predicting the load-bearing capacity of corrugated packaging – a short review of methods and applications | Rola homogenizacji w predykcji nośności opakowań z tektury falistej – przegląd metod i zastosowań." *Przegląd Papierniczy* 80 (5) : 271-278.
- [9] Garbowski T. 2023. "The most common mistakes when estimating the load-bearing capacity of corrugated board packaging | Najczęściej popełniane błędy podczas szacowania nośności opakowań z tektury falistej." *Przegląd Papierniczy* 79 (9) : 485-488.
- [10] Garbowski T., Cornaggia A., Gajewski T., Grabski J.K. 2024. "Identification of material and structural parameters of corrugated board in production and converting processes." *EUROMECH Colloquium 642 International Colloquium on Multiscale and Multiphysics Modelling for Advanced and Sustainable Materials*.
- [11] Garbowski T., Łodygowski T. 2011. "Mechanical calibration of damage enhanced anisotropic constitutive models for free-foils." 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics – CMM 2011.
- [12] Garbowski T., Maier G., Novati G. 2011. "Mechanical characterization of free-foils by cruciform test and full-field measurements." 2nd International Conference on Inverse Problems in Mechanics of Structures and Material – IPM 2011.
- [13] Garbowski T., Marek A. 2012. "On the Sensitivity of Creasing Force to Parameters in Constitutive Models of Paperboard". 8th European Solid Mechanics Conference, Graz, Austria : 1751-1766.
- [14] Gilchrist A.C., Suhling J.C., Urbanik T.J. 2006. "Understanding the structural performance of corrugated fiberboard under combined loadings". *Packaging Technology and Science* 19 (5) : 277–289.
- [15] Giudicianni P., Riva G., Stramigioli S., Aletti L. 2021. "Investigation on the potential of corrugated cardboard as an insulation material". *Materials & Design* 210 : 110066.
- [16] Łątko J. 2014. „ARCHI-TEKTURA. Papier i tektura jako innowacyjny materiał w konstrukcjach architektonicznych. *Przegląd Papierniczy* 70 (12) : 740-745.
- [17] Łątko J. 2017. „Papierowy design. Cz. 1. Studia przypadków obiektów użytkowych wykonanych z materiałów pochodzenia celulozowego”. *Przegląd Papierniczy* 73 (1) : 45-50.
- [18] Marek A., Garbowski T. 2014. "Sensitivity analysis in homogenization process of corrugated paperboards." 39th Solid Mechanics Conference Book of Abstracts: 281-282.
- [19] Motylewski M. 2007. „Wpływ warunków pogodowych – i nie tylko – na jakość tektury”, *Przegląd Papierniczy* 65 (6) : 323-327.
- [20] Mrówczyński D., Gajewski T., Grabski J.K., Garbowski T. 2024. "Verification of numerical homogenization for corrugated boards through experimental tests and simulations." 43rd Solid Mechanics Conference: SolMech 2024.
- [21] Park B., Kim K., Lee K. 2019. "Influence of moisture on the bending stiffness of corrugated cardboard". *Cellulose* 26 (4) : 2589-2599.
- [22] Paunović P., Marković D., Milovanović S. 2022. "Corrugated cardboard packaging: optimization for strength and sustainability". *Packaging Technology and Science* 35 (7) : 533-546.
- [23] Rogalka M., Grabski J.K., Garbowski T. 2024. "Deciphering Double-Walled Corrugated Board Geometry Using Image Analysis and Genetic Algorithms". *Sensors* 24 (6) : 1772.
- [24] Savov V., Vassileva T., Abadjiev M. 2012. "Development of corrugated board with increased compression strength for heavy-duty packaging". *Applied Mechanics and Materials* 178 : 95-100.
- [25] Schaepe K., Kappes J., Matzat M., Habermeyer P. 2016. "Performance evaluation of corrugated board for high-load packaging applications". *Journal of Materials in Civil Engineering* 28 (3) : 321-332.
- [26] Tybuś J. 2013. „Niewyczerpane możliwości tektury”. *Przegląd Papierniczy* 69 (8) : 382-383.
- [27] Watanabe T., Nishimura H., Miyazawa S. 2015. "Exploring the structural possibilities of corrugated cardboard in architecture." *International Journal of Architecture and Engineering* 9 (4) : 257-268.
- [28] Zhang Y., Wu T., Wang H., Zheng Y. 2020. "Mechanical response of corrugated cardboard under combined compression and shear loadings." *Composite Structures* 238 : 111927.