



# Analiza wpływu futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na parametry mechaniczne i koszt trójwarstwowej tektury falistej

## Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI, PRZEMYSŁAW BORECKI

DOI: 10.15199/54.2024.11.1

W artykule przedstawiono teoretyczną analizę wpływu futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na nośność i koszt trójwarstwowej tektury falistej. Analizowane profile, takie jak: „sinus”, „circle”, „spline” oraz „trapez”, posiadają unikalne geometrie i okresy, które mogą pojawić się w przyszłych konstrukcjach, jako alternatywa dla obecnie produkowanego wyłącznie kształtu sinusoidalnego. Oceny wytrzymałości dokonano poprzez test zgniatania kolumnowego (ang. Edge Crush Test – ECT), opierając się na wynikach testów ściskania papieru przy krótkim wpięciu (ang. Short Compression Test – SCT) dla warstwy pofalowanej, górnego i dolnego linera, uwzględniając współczynnik pofalowania (ang. take-up factor). Obliczono również moment bezwładności i sztywność zginania, kluczowe dla nośności opakowań z tektury falistej. Wyniki sugerują, że odpowiedni dobór kształtu warstwy pofalowanej może zwiększyć efektywność i wytrzymałość struktury, wskazując możliwe kierunki przyszłych rozwiązań.

**Słowa kluczowe:** tektura falista, futurystyczne kształty warstwy pofalowanej, analiza teoretyczna, test zgniatania kolumnowego, współczynnik pofalowania, sztywność zginania

*This paper presents a theoretical analysis of the impact of futuristic corrugated layer shapes on the load-bearing capacity and cost of single-wall corrugated board. The analyzed profiles, such as “sinus,” “circle,” “spline,” and “trapezoid,” feature unique geometries and periods, potentially emerging in future constructions as alternatives to the currently produced sinusoidal shape. Strength evaluation was conducted through the Edge Crush Test (ECT), based on the results of the Short Compression Test (SCT) for the corrugated layer, top liner, and bottom liner, taking into account the take-up factor. The moment of inertia and bending stiffness, crucial*

*for the load-bearing capacity of corrugated board packaging, were also calculated. Results indicate that the appropriate selection of corrugated layer shape could enhance structural efficiency and strength, providing guidance for potential future solutions.*

**Keywords:** corrugated board, futuristic fluting shapes, theoretical analysis, Edge Crush Test, take-up factor, bending stiffness

### Wprowadzenie

Tektura falista stanowi jeden z kluczowych materiałów stosowanych w opakowaniach przemysłowych i konsumenckich, dzięki swojej wytrzymałości, lekkości oraz możliwości pełnego recyklingu. Z uwagi na rosnące wymagania dotyczące ochrony środowiska i konieczność minimalizacji zużycia surowców, rozwój bardziej wytrzymałych i ekonomicznych konstrukcji tekturowych staje się priorytetem w badaniach inżynierskich. Wydajność i nośność opakowań zależą nie tylko od jakości materiału, lecz także od geometrii warstwy pofalowanej, która odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu wytrzymałości na zgniatanie oraz sztywności na zginanie. Obecnie stosowany profil sinusoidalny jest powszechny w przemyśle, jednak rozwój technologii produkcji pozwala na poszukiwanie bardziej złożonych kształtów, które mogłyby zwiększyć efektywność konstrukcji opakowań.

Badania nad tekturą falistą koncentrują się na różnych aspektach mechanicznych i strukturalnych, które mają kluczowe znaczenie dla projektowania i oceny wytrzymałości opakowań. W literaturze można wyróżnić kilka głównych obszarów badawczych związanych z analizą parametrów mechanicznych tektury falistej, takich jak: wytrzymałość na zgniatanie, sztywność zginania oraz wpływ kształtu flutingu na te właściwości i koszt. Dodatkowo prace

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. **P. Borecki** (przemyslaw.borecki@up.poznan.pl), Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu (ORCID: 0000-0003-4139-0466)



naukowe często skupiają się nad teksturą falistą i jej właściwościami mechanicznymi w kontekście wielu aspektów, począwszy od wpływu procesu produkcji, aż po projektowanie struktur wytrzymałych na ekstremalne warunki środowiskowe. Kluczową rolę w analizie tekstury falistej odgrywa ocena wytrzymałości na zgniatanie kolumnowe (ECT) oraz sztywności na zginanie, ponieważ te parametry bezpośrednio wpływają na nośność opakowań.

Wytrzymałość na zgniatanie jest jednym z głównych wskaźników nośności tekstury falistej, szczególnie istotnym w kontekście transportu i magazynowania. W licznych badaniach przeanalizowano metody pomiaru oraz czynniki wpływające na wytrzymałość na zgniatanie, w tym wpływ różnych konfiguracji flutingu i parametrów materiałowych [1, 4, 5, 7, 13-15, 19, 26, 29, 32, 33, 35, 41]. Badania te często wskazują na silną zależność między geometrią flutingu a wartością ECT, sugerując, że odpowiednio dobrany kształt flutingu może znacząco zwiększyć wytrzymałość na zgniatanie, przy zachowaniu minimalnego wzrostu kosztów.

Sztywność zginania, określana m.in. poprzez moment bezwładności przekroju tekstury, jest kolejnym istotnym parametrem wpływającym na stabilność struktury tekturowej w warunkach obciążeń bocznych i zginających [9, 10, 12, 23, 28, 30]. Kształt flutingu oraz zmiany geometrii warstwy pofalowanej pozwalają na regulację sztywności, co może być korzystne w kontekście zabezpieczenia zawartości opakowań. W badaniach uwzględniono wpływ różnych kształtów, takich jak sinusoidalny, trapezowy oraz spline, co pozwala na precyzyjne dostosowanie właściwości mechanicznych do specyficznych wymagań aplikacyjnych [2, 17, 25, 31, 37].

Modelowanie numeryczne oraz homogenizacja są powszechnie stosowane w celu uproszczenia analiz strukturalnych tekstury falistej. Pozwalają one na skuteczne przewidywanie zachowania tekstury przy różnych obciążeniach, bez potrzeby szczegółowego modelowania flutingu [3, 11, 15, 19-22, 33, 34, 40]. Dzięki tym metodom możliwe jest opracowanie optymalnych geometrii, które pozwalają na minimalizację kosztów produkcji i poprawę właściwości wytrzymałościowych. W literaturze podkreślono, że metody te są szczególnie użyteczne przy analizie przyszłościowych, bardziej złożonych kształtów warstwy pofalowanej.

Zastosowanie sztucznej inteligencji oraz zaawansowanych metod analizy obrazu w procesie klasyfikacji i optymalizacji tekstury falistej staje się coraz bardziej popularne. Badania wykazują, że techniki te mogą pomóc w automatyzacji produkcji, co prowadzi do lepszej kontroli jakości oraz dokładniejszego dostosowania parametrów strukturalnych [18, 27, 36, 38, 39]. Dzięki zastosowaniu sieci neuronowych i algorytmów genetycznych możliwe jest tworzenie i analizowanie bardziej zaawansowanych kształtów flutingu, co potencjalnie umożliwia redukcję kosztów produkcji przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności materiału.

Koszty związane z produkcją tekstury falistej są bezpośrednio zależne od geometrii flutingu, ponieważ bardziej złożone kształty wymagają zaawansowanych procesów produkcyjnych. W literaturze analizowano, w jaki sposób zmiana kształtu flutingu wpływa na koszty, z uwzględnieniem wpływu materiałów, grubości i gęstości falowania [4, 6, 8, 35, 42, 43]. Dążenie do optymalizacji kosztów i parametrów mechanicznych jest kluczowym aspektem przy projektowaniu przyszłościowych rozwiązań opakowaniowych.

Z dotychczasowych badań wynika, że wybór odpowiedniego kształtu flutingu ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne tekstury falistej oraz koszty jej produkcji. Metody numeryczne, modelowanie homogenizacji oraz rozwój sztucznej inteligencji oferują nowe możliwości w zakresie tworzenia bardziej zaawansowanych geometrii warstwy pofalowanej, które mogłyby w przyszłości stać się alternatywą dla obecnych standardów produkcyjnych.

W kontekście niniejszej pracy, badania nad wpływem alternatywnych kształtów flutingu, takich jak „spline” i „trapez”, są stosunkowo rzadkie i ograniczają się głównie do teoretycznych rozważań [1, 36]. Andrzejak i in. [1] zbadali wpływ perforacji na nośność opakowań tekturowych, co sugeruje, że zmiany w geometrii flutingu mogą znacząco wpływać na właściwości wytrzymałościowe. Natomiast Mrówczyński i in. [36] przeprowadzili symulacje, uwzględniając różne konfiguracje strukturalne opakowań, co wskazuje na potencjał rozwoju nowych geometrii flutingu, które mogłyby zwiększyć nośność konstrukcji. Rozważania te stanowią punkt wyjścia do analizy nowych, futurystycznych kształtów flutingu, które mogą w przyszłości stać się alternatywą dla tradycyjnego profilu sinusoidalnego. Potencjał alternatywnych geometrii flutingu był badany w kontekście wytrzymałości i efektywności produkcji. Praca Mrówczyńskiego i in. [35] omawia testy wytrzymałościowe na zgniatanie przy różnych konfiguracjach strukturalnych, co może być inspiracją do dalszych badań nad nowymi kształtami flutingu. Wyniki sugerują, że odpowiedni dobór profilu może znacznie poprawić nośność, co jest celem teoretycznej analizy przeprowadzonej w niniejszej pracy.

Celem pracy jest teoretyczna analiza wpływu różnych, futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na wytrzymałość i koszt trójwarstwowej tekstury falistej. W badaniu uwzględniono profile: „sinus”, „circle”, „spline” oraz „trapez”, które mogą stać się przyszłościowymi alternatywami dla obecnie stosowanego kształtu sinusoidalnego. Analiza ta obejmuje obliczenia zmian współczynnika pofalowania, wartości ECT i BNT w porównaniu z flutingiem referencyjnym oraz oszacowanie kosztów produkcji dla różnych kształtów warstwy pofalowanej. Praca ma na celu nie tylko porównanie właściwości wytrzymałościowych różnych profili, ale także wskazanie potencjalnych korzyści i kierunków rozwoju konstrukcji opakowań z tekstury falistej, odpowiadających na potrzeby przyszłego rynku.

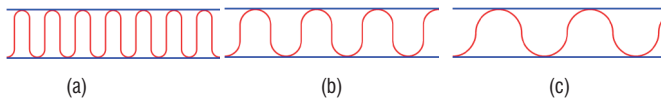


## Opis badanych profili warstwy pofalowanej

### Charakterystyka geometrii badanych profili

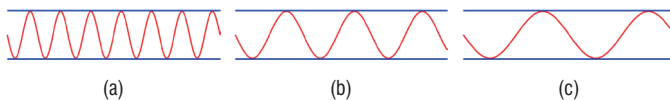
W tej części szczegółowo przedstawimy geometrię i parametry każdego z analizowanych kształtów warstwy pofalowanej. W artykule uwzględniono następujące profile:

- **Circle:** Profil składający się z półokręgów o promieniu od 0,5 mm do 1,5 mm (rys. 1) na wierzchołkach fal, połączonych pionowymi odcinkami. Zmienne wartości promienia umożliwiają dostosowanie struktury do różnych obciążeń pionowych.



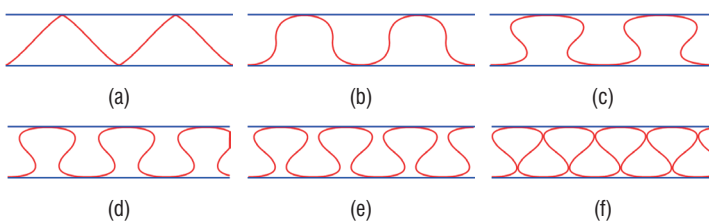
Rys. 1. Kształt pofalowania typu „circle”: (a) fluting z promieniem 0,5 mm, okres fali 2 mm, (b) fluting z promieniem 1 mm, okres fali 4 mm, (c) fluting z promieniem 1,5 mm, okres fali 6 mm

- **Sinus (referencyjny):** Profil sinusoidalny o okresie 6 mm, będący odpowiednikiem fali B, czyli najczęściej stosowanym kształtem w produkcji tektury falistej. Charakteryzuje się regularnym, łagodnym falowaniem, co zapewnia równomierne rozłożenie obciążeń. Przyjęto zmienność okresu pofalowania sinusoidalnego od 2 do 7 mm (rys. 2).



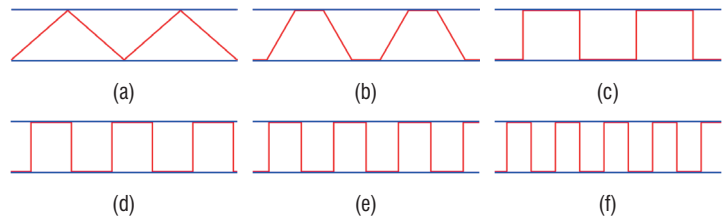
Rys. 2. Kształt pofalowania typu „sinus”: (a) sinus z okresem 2 mm, (b) sinus z okresem 4 mm, (c) sinus z okresem 6 mm

- **Spline:** Kształt oparty na krzywej spline, przyjmujący formy od trójkątnej do „balonikowej”. Charakterystyczna zmienność kształtu pozwala na kontrolowanie sztywności i potencjalne zastosowanie w konstrukcjach wymagających większej sprężystości. Przyjęto stałą wartość okresu 6 mm (rys. 3a-b), a także zmienny okres dla kształtu „balonikowego”, odpowiednio 5 mm (rys. 3d), 4 mm (rys. 3e) oraz 3 mm (rys. 3f).



Rys. 3. Kształt pofalowania typu „spline”: (a) fluting o kształcie podobnym do trójkąta, (b) fluting o kształcie podobnym do „circle”, (c) fluting balonikowy, okres 6 mm, (d) fluting balonikowy, okres 5 mm, (e) fluting balonikowy, okres 4 mm, (f) fluting balonikowy, okres 3 mm

- **Trapez:** Profil trapezoidalny ze stałym okresem 6 mm, ewoluujący od trójkąta (rys. 4a) przez trapez (rys. 4b) do prostokąta (rys. 4c). Wariant prostokąta jest analizowany przy różnych okresach, od 5 do 3 mm (rys. 4c-f).



Rys. 4. Kształt pofalowania typu „trapez”: (a) fluting o kształcie trójkąta, okres 6 mm, (b) fluting o kształcie trapezu, okres 6 mm, (c) fluting o kształcie prostokąta, okres 6 mm, (d) fluting prostokątny z okresem 5 mm, (e) fluting prostokątny z okresem 4 mm, (f) fluting prostokątny z okresem 3 mm

Dla wszystkich profili przyjęto stałą wysokość, która wynosi 3 mm, co umożliwia bezpośrednie porównanie właściwości mechanicznych wynikających z różnic w geometrii.

### Współczynnik pofalowania

Współczynnik pofalowania jest definiowany jako stosunek rzeczywistej długości warstwy pofalowanej do jej okresu. Współczynnik ten odgrywa kluczową rolę w analizie wytrzymałościowej, ponieważ określa poziom kompresji i adaptacji flutingu do obciążeń pionowych. Zastosowanie futurystycznych kształtów, takich jak „spline” i „circle”, pozwala na uzyskanie różnych wartości współczynnika pofalowania, co w dalszej analizie wpływa na wytrzymałość całej konstrukcji.

Ogólny wzór pozwalający policzyć współczynnik pofalowania przyjmuje postać:

$$f = \frac{1}{P} \int_0^P \left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx$$

gdzie:

$y$  – funkcja opisująca kształt warstwy pofalowanej,  
 $p$  – pełny okres funkcji.

### Parametry mechaniczne i analiza wytrzymałościowa

W badaniu wytrzymałości na zgniatanie zastosowano uproszczony wzór na ECT:

$$ECT = 0.7 \cdot (SCT_{L1} + f \cdot SCT_f + SCT_{L2})$$

gdzie:

$SCT_{L1}$  – wytrzymałość na ściskanie (SCT) górnego linera,  
 $SCT_f$  – wytrzymałość na ściskanie warstwy pofalowanej (flutingu),  
 $SCT_{L2}$  – wytrzymałość na ściskanie dolnego linera,  
 $f$  – współczynnik pofalowania, zależny od geometrii flutingu.

ECT jest kluczowym wskaźnikiem nośności opakowania, pozwalającym na ocenę jego odporności na zgniatanie przy piono-

wym obciążeniu. Wyniki analizy dla różnych kształtów warstwy pofalowanej pozwolą na porównanie ich przydatności w potencjalnych zastosowaniach.

Przy założeniu, że oba linery mają taką samą wytrzymałość na ściskanie oraz SCT flutingu jest o 25% niższa niż obu linerów powyższy wzór można uprościć do:

$$ECT = 0,7 \cdot SCT_f(1,25 + f + 1,25)$$

### Moment bezwładności i sztywność zginania

Moment bezwładności przekroju został obliczony dla każdego kształtu warstwy pofalowanej w celu wyznaczenia sztywności na zginanie, która bezpośrednio wpływa na nośność i stabilność tektury falistej. Wyższy moment bezwładności oznacza większą odporność na odkształcenia przy zginaniu, co jest istotne dla zastosowań wymagających wytrzymałych opakowań. Sztywność zginania w kierunku MD zależy jedynie od sztywności i grubości linerów oraz wysokości fali, która jest w tym przykładzie stała, dlatego sztywność ta została pominięta w dalszych analizach. Wzór na sztywność zginania w kierunku CD przyjmuje postać:

$$BNT = \frac{1}{P} \left[ 2E_l t_l \frac{H^2}{4} + E_f t_f \int_0^P y(f)^2 dx \right]$$

gdzie:

$E_l$  – moduł sztywności lineru,

$t_l$  – grubość lineru,

$E_f$  – moduł sztywności flutingu,

$t_f$  – grubość flutingu,

$H$  – wysokość fali.

Przy założeniu, że warstwa pofalowana ma grubość mniejszą o 20% niż grubość linerów oraz że moduł sztywności linerów w kierunku CD jest o 25% większy, powyższy wzór upraszcza się do następującej postaci:

$$BNT = \frac{E_f t_f}{P} \left[ \frac{3}{4} H^2 + \int_0^P y(f)^2 dx \right]$$

### Analiza kosztowa

W końcowej fazie analizy przeprowadzono estymację kosztów produkcji dla każdego z kształtów, biorąc za punkt odniesienia profil sinusoidalny (referencyjny) o okresie 6 mm. Zakładamy, że koszt lineru jest o 50% wyższy niż koszt warstwy pofalowanej, co pozwala na oszacowanie różnicy kosztów produkcji dla alternatywnych geometrii flutingu. Analiza ta ma na celu określenie opłacalności wprowadzenia nowych profili flutingu w przyszłości. Zmianę ceny wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta \epsilon = 100 \cdot \left( \frac{2 \cdot 1,5 \epsilon_f + \epsilon_f f}{2 \cdot 1,5 \epsilon_f + \epsilon_f f_{ref}} - 1 \right) = 100 \cdot \left( \frac{3 + f}{3 + f_{ref}} - 1 \right)$$

gdzie  $f_{ref}$  jest współczynnikiem pofalowania dla flutingu o kształcie sinusa i okresie 6 mm, natomiast  $\epsilon_f$  to przyjęta cena flutingu.

## Wyniki i dyskusja

### Wpływ kształtu warstwy pofalowanej na parametry mechaniczne i koszt produkcji

Analiza wyników przedstawionych na wykresach dla różnych kształtów flutingu: „circle” (rys. 5), „sinus” (rys. 6), „spline” (rys. 7), „trapez” (rys. 8) pokazuje wyraźne zależności pomiędzy geometrią warstwy pofalowanej a wartościami ECT i BNT oraz kosztem produkcji.

Zmiana wartości ECT i BNT wyznaczona jest względem flutingu sinusoidalnego z okresem 6 mm wg wzoru:

$$\Delta ECT = 100 \cdot \left( \frac{ECT}{ECT_{ref}} - 1 \right) = 100 \cdot \left( \frac{2,5 + f}{2,5 + f_{ref}} - 1 \right)$$

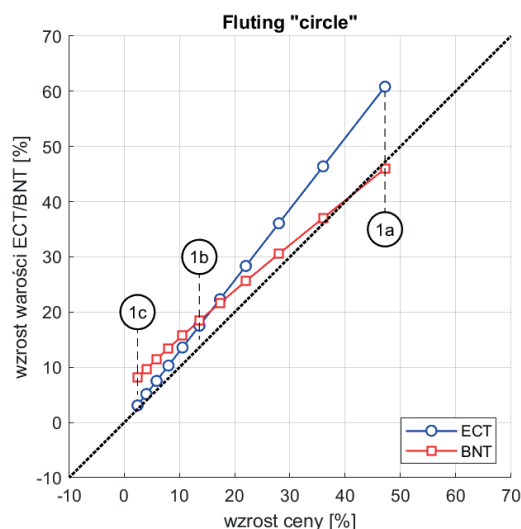
oraz

$$\Delta BNT = 100 \cdot \left( \frac{BNT}{BNT_{ref}} - 1 \right) = 100 \cdot \left( \frac{3H^2/4 + \int_0^P y(f)^2 dx}{3H^2/4 + \int_0^P y(f_{ref})^2 dx} - 1 \right)$$

Dla każdego kształtu wykres przedstawia wzrost wartości ECT i BNT w stosunku do wzrostu kosztów produkcji, co pozwala na ocenę efektywności alternatywnych geometrii pod kątem ekonomicznym i wytrzymałościowym.

### Fluting „circle”

W przypadku profilu „circle” wzrost wartości ECT jest wyraźnie wyższy w porównaniu do wzrostu BNT, co wskazuje na dużą poprawę wytrzymałości na zgniatanie przy stosunkowo niskim wzroście sztywności. Koszt wprowadzenia tego profilu jest znaczący, jednak z punktu widzenia parametrów ECT może okazać się korzystny dla zastosowań wymagających dużej odporności na zgniatanie (np. transport ciężkich ładunków). Poszczególne punkty na rysunku 5



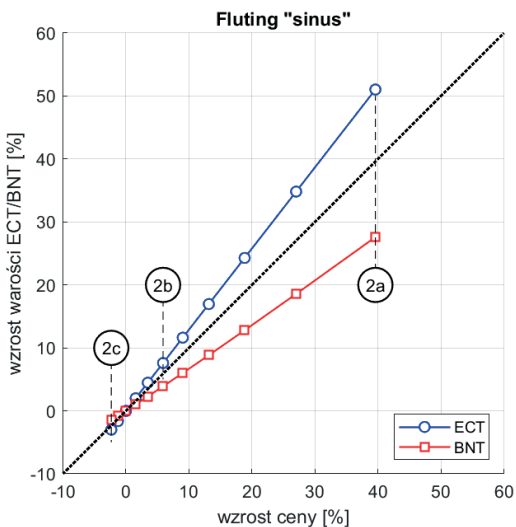
Rys. 5. Zależności pomiędzy wartościami ECT i BNT oraz kosztem produkcji dla flutingu typu „circle”



(1a, 1b, 1c) pokazują różnice dla różnych wariantów geometrii „circle”, gdzie punkt 1a odpowiada geometrii pokazanej na rysunku 1a, punkt 1b odpowiada geometrii flutingu pokazanej na rysunku 1b, natomiast punkt 1c – geometrii pokazanej na rysunku 1c.

### Fluting „sinus”

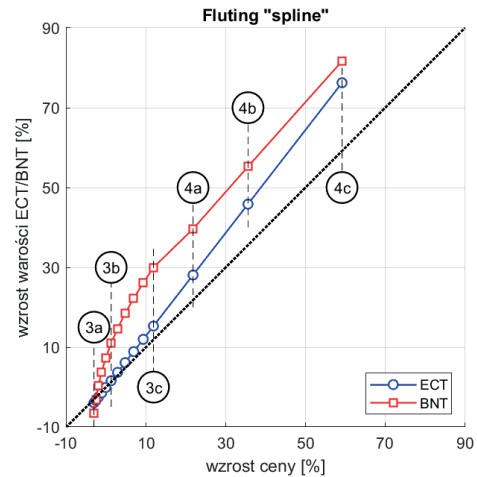
Wykres dla profilu „sinus” pokazuje, że wzrost wartości ECT i BNT jest relatywnie równomierny w stosunku do wzrostu ceny. W porównaniu do innych kształtów, „sinus” cechuje się umiarkowanym przyrostem obu parametrów przy wzroście kosztów produkcji, co sprawia, że jest to profil wyważony pod względem stosunku kosztu do wydajności. Przykładowe punkty na rysunku 6 (2a, 2b, 2c) pokazują różnice dla różnych okresów flutingu sinusoidalnego, gdzie punkt 2a odpowiada geometrii pokazanej na rysunku 2a, punkt 2b odpowiada geometrii flutingu pokazanej na rysunku 2b, natomiast punkt 2c – geometrii pokazanej na rysunku 2c.



Rys. 6. Zależności między wartościami ECT i BNT oraz kosztem produkcji dla flutingu typu „sinus”

### Fluting „spline”

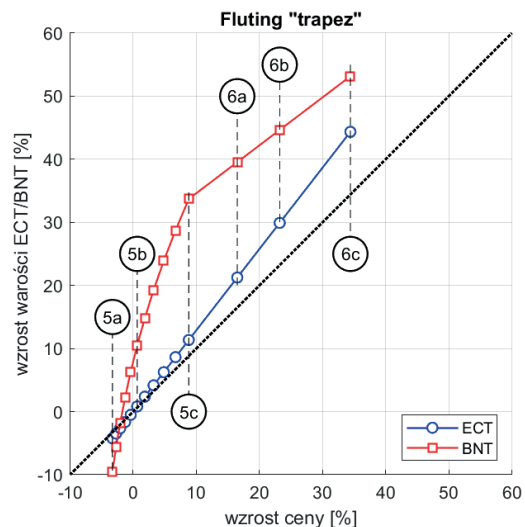
Profil „spline” charakteryzuje się najwyższym wzrostem BNT przy stosunkowo umiarkowanym wzroście ECT, co sugeruje, że jest bardziej efektywny w aplikacjach wymagających większej sztywności na zginanie niż odporności na zgniatanie. Punkty na rysunku 7 (3a, 3b, 3c oraz 4a, 4b i 4c) wskazują, że różne warianty tego kształtu mogą dostarczyć znacznie wyższej sztywności na zginanie, co czyni „spline” interesującą opcją w kontekście stabilnych konstrukcji opakowaniowych o niższym ryzyku zgniatania. Na rysunku 7 punkt 3a odpowiada geometrii pokazanej na rysunku 3a, punkt 3b odpowiada geometrii flutingu pokazanej na rysunku 3b, natomiast punkt 3c – geometrii pokazanej na rysunku 3c, dodatkowo punkty 4a-4c odpowiadają odpowiednio geometriom flutingu pokazanym na rysunkach 3d-3f.



Rys. 7. Zależności między wartościami ECT i BNT oraz kosztem produkcji dla flutingu typu „spline”

### Fluting „trapez”

W przypadku profilu „trapez” można zaobserwować, że wzrost BNT jest wyższy niż wzrost ECT, przy czym wzrost ceny jest stosunkowo umiarkowany. Tego typu kształt może być efektywny w aplikacjach wymagających równocześnie podwyższonej sztywności na zginanie i odporności na zgniatanie, choć w mniejszym stopniu niż w profilu „circle”. Punkty na rysunku 8 (5a, 5b, 5c oraz 6a, 6b i 6c) pokazują, że różne warianty kształtu „trapez” dostarczają szerokiego zakresu właściwości mechanicznych, umożliwiając wybór optymalnego kompromisu między ECT a BNT przy umiarkowanym koszcie. Na rysunku 8 punkt 5a odpowiada geometrii pokazanej na rysunku 4a, punkt 5b odpowiada geometrii flutingu pokazanej na rysunku 4b, natomiast punkt 5c – geometrii pokazanej na rysunku 4c. Dodatkowo punkty 6a-6c odpowiadają odpowiednio geometriom flutingu pokazanym na rysunkach 4d-4f.



Rys. 8. Zależności między wartościami ECT i BNT oraz kosztem produkcji dla flutingu typu „trapez”



## Analiza kosztów

Analiza kosztów pokazuje, że każdy z kształtów ma unikalny wpływ na relację koszt–wydajność. Profile „circle” i „trapez” wydają się bardziej kosztowne, jednak oferują istotne korzyści w zakresie wytrzymałości mechanicznej. Z kolei profil „sinus” oferuje stabilny kompromis, a „spline” może być interesującą opcją dla aplikacji wymagających większej sztywności.

Wybór odpowiedniego kształtu warstwy pofalowanej zależy od specyficznych wymagań aplikacyjnych, takich jak potrzeba wyższej sztywności na zginanie (BNT) lub wytrzymałości na zgniatanie (ECT). Profile „circle” i „trapez” mogą być bardziej efektywne w aplikacjach wymagających dużej wytrzymałości, natomiast „spline” i „sinus” zapewniają bardziej zrównoważone właściwości mechaniczne.

## Wnioski

Analiza teoretyczna wykazała, że geometria warstwy pofalowanej ma znaczący wpływ na wartości parametrów ECT (wytrzymałość na zgniatanie) oraz BNT (sztywność zginania) w trójwarstwowej tekturze falistej. Profile o bardziej złożonych kształtach, takie jak „circle” i „trapez”, mogą znacząco poprawić parametry wytrzymałościowe, jednak kosztem wzrostu ceny produkcji. Profil „spline” natomiast szczególnie wyróżnia się wysoką sztywnością na zginanie, co może być korzystne w zastosowaniach wymagających stabilności strukturalnej.

Wyniki analizy kosztów wskazują, że choć profile takie jak „circle” i „trapez” wiążą się z wyższymi kosztami produkcji, oferują one wyraźne korzyści w zakresie nośności, co może być uzasadnione w specyficznych zastosowaniach wymagających zwiększonej wytrzymałości. Profil „sinus” zapewnia stabilny kompromis pomiędzy kosztami a efektywnością, co sprawia, że jest on atrakcyjny dla standardowych zastosowań.

Przeprowadzona analiza stanowi wyjście naprzeciw potencjalnym przyszłym możliwościom produkcji bardziej zaawansowanych kształtów warstwy pofalowanej, które obecnie nie są stosowane. Uzyskane wyniki wskazują kierunek dalszych badań, obejmujących badania eksperymentalne oraz rozwój technologii produkcji, które pozwolą na wdrożenie tych bardziej złożonych geometrii flutingu. Ponadto, wyniki sugerują potrzebę dalszych prac nad optymalizacją kosztową tych profili.

Nowe profile, takie jak „circle” i „trapez”, mogą znaleźć zastosowanie w opakowaniach przeznaczonych do transportu ciężkich ładunków, gdzie priorytetem jest wytrzymałość na zgniatanie. Profil „spline” może być wykorzystywany tam, gdzie wymagana jest wysoka sztywność zginania, np. w opakowaniach stabilizujących zawartość lub o większej odporności na odkształcenia.

Ostateczny wybór kształtu warstwy pofalowanej powinien być uzależniony od specyficznych wymagań mechanicznych i ekonomicznych danego zastosowania. Wyniki tej analizy sugerują,

że przyszły rozwój tektury falistej może zmierzać w kierunku bardziej złożonych geometrii flutingu, co pozwoli na lepsze dostosowanie opakowań do różnorodnych potrzeb przemysłowych.

Artykuł recenzowany

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Anastas J.V. 1998. "Edgewise compression test". International Corrugated Containers Conference & Trade Fair, Proceedings.
- [3] Brittain J. 2003. "ECT: Edge crush test | ECT: Prueba de aplastamiento del borde". *Mari Papel y Corrugado* 16 (3) : 49-50.
- [4] Cáceres-Naranjo D., Bernad C., Calvo S., Royo J.M. 2023. "Assessment and modelling of corrugated board dynamic properties under impact loads. Application to edge crush disposition". *Results in Engineering* 18.
- [5] Chalmers I.R. 2007. "The use of MD shear stiffness by the torsional stiffness technique to predict corrugated board properties and box performance". *Appita Annual Conference* 1 : 145-150.
- [6] Chalmers I.R. 2007. "The use of MD shear stiffness by the torsional stiffness technique to predict corrugated board properties and box performance". *Appita Journal* 60 (5) : 357-361.
- [7] Coffin D.W., Wade K., Hussain S. 2019. "Links between BCT and lifetime for corrugated boxes". Paper Conference and Trade Show, PaperCon 2019 2 : 1334-1348.
- [8] Cummings J.A., Burkart A.P. 1995. "Investigation of the relationship between board cure time and top-to-bottom compression performance". *Tappi Journal* 78 (7) : 183-190.
- [9] Di Russo F.M., Desole M.M., Gisario A., Barletta M. 2023. "Evaluation of wave configurations in corrugated boards by experimental analysis (EA) and finite element modeling (FEM): the role of the micro-wave in packaging design". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126 (11-12) : 4963-4982.
- [10] Frank B. 2006. "ECT as a tool". *International Paper Board Industry* 49 (8) : 28-30.
- [11] Frank B., Cash D. 2022. "Edge crush testing methods and box compression modeling". *Tappi Journal* 21 (8) : 418-433.
- [12] Frank B., Kruger K. 2021. "Assessing variation in package modeling". *Tappi Journal* 20 (4) : 231-238.
- [13] Garbowski T. 2018. "Degradation of mechanical properties of cardboard due to manufacturing and converting processes". TAPPI Progress in Paper Physics Seminar PPS2018.
- [14] Garbowski T. 2023. "Evaluating safety factors in corrugated packaging for extreme environmental conditions | Ocena czynników bezpieczeństwa opakowań z tektury falistej w ekstremalnych warunkach środowiskowych". *Packaging Review* 2 (4) : 6-15. doi.org/10.15199/42.2023.4.1.
- [15] Garbowski T. 2023. "Safety factors in the design of corrugated board packaging | Współczynniki bezpieczeństwa w projektowa-



- niu opakowań z tektury falistej”. *Packaging Review* 2 (3) : 16-22. doi.org/10.15199/42.2023.3.2.
- [16] 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. doi.org/10.15199/54.2023.9.1.
- [17] 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. doi.org/10.15199/54.2024.5.1.
- [18] Garbowski T. 2023. “The use of artificial intelligence for the optimal production of corrugated board | Zastosowanie sztucznej inteligencji do optymalnej produkcji tektury falistej”. *Przegląd Papierniczy* 79 (5) : 279-288. doi.org/10.15199/54.2023.5.2.
- [19] Garbowski T. 2024. “Revolutionizing Corrugated Board Production and Optimization with Artificial Intelligence”. *BioResources* 19 (2) : 2003-2006. doi.org/10.15376/biores.19.2.2003-2006.
- [20] Garbowski T., Borysiewicz A. 2014. “The stability of corrugated board packages | Stateczność opakowań z tektury falistej”. *Przegląd Papierniczy* 70 (8) : 452-458.
- [21] Garbowski T., Cornaggia A., Gajewski T., Grabski J.K. 2023. “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*, Rome, Italy, September 23-27.
- [22] Garbowski T., Gajewski T. 2020. “Transverse shear modulus in corrugated materials | Moduł ścinania poprzecznego tektury falistej”. *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. doi.org/10.15199/54.2020.2.1.
- [23] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. “Sensitivity analysis of edge crush test | Analiza wrażliwości w teście krawędziowego zgniatania”. *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [24] 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 : pp:1751-1766. [11]
- [25] Gilchrist A.C., Suhling J.C., Urbanik T.J. 1999. “Nonlinear finite element modeling of corrugated board”. *American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD* 231 : 101-106.
- [26] Haj-Ali R., Choi J., Wei B.-S., Popil R., Schaepe M. 2009. “Refined nonlinear finite element models for corrugated fiberboards”. *Composite Structures* 87 (4) : 321-333.
- [27] Hiller B. 2017. “Optical strain field analysis an innovative test method to analyse the mechanical properties of fibre-based materials”. *International Paperworld IPW 2017-Janua* (11-12) : 11-13.
- [28] Hoon M.L., Park J.M. 2004. “Flexural stiffness of selected corrugated structures”. *Packaging Technology and Science* 17 (5) : 275-286.
- [29] Jamsari A., Nevins A., Kueh C., Gray-Stuart E., Dahm K., Bronlund J. 2020. “Modelling the Edge Crushing Performance of Corrugated Fibreboard Under Different Moisture Content Levels”. *Mechanisms and Machine Science* 75 : 609-620.
- [30] Jamsari M.A., Kueh C., Gray-Stuart E.M., Dahm K., Bronlund J.E. 2020. “Modelling the impact of crushing on the strength performance of corrugated fibreboard”. *Packaging Technology and Science* 33 (4-5) : 159-170.
- [31] Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kotakowski Z. 2020. “Calculation of honeycomb paperboard resistance to EDGE crush test”. *Materials* 13 (7).
- [32] Łęcka M., Mania R., Marynowski K. 2006. “New method of the ECT index of corrugated board determination | Nowa metoda wyznaczenia odporności na zgniatanie krawędziowe tektury falistej”. *Przegląd Papierniczy* 62 (4) : 207-210.
- [33] Marek A., Garbowski T. 2014. “Sensitivity analysis in homogenization process of corrugated paperboards”. 39th Solid Mechanics Conference Book of Abstracts : 281-282.
- [34] Mikami E., Ibaraki T., Kodaka I. 2005. “Optimum design of flute structure for edgewise compression of corrugated fiberboard”. *Kami Pa Gikyoshi/Japan Tappi Journal* 59 (10) : 94-100.
- [35] 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, Wrocław, Poland, September 16-18.
- [36] Mrówczyński D., Gajewski T., Pośpiech M., Garbowski T. 2024. “Estimation of the Compressive Strength of Cardboard Boxes Including Packaging Overhanging on the Pallet”. *Applied Sciences* 14 (2) : 819. doi.org/10.3390/app14020819.
- [37] Rogalka M., Grabski J.K., Garbowski T. 2024. “A Comparison of Two Artificial Intelligence Approaches for Corrugated Board Type Classification”. *Engineering Proceedings* 56 (1) : 272. doi.org/10.3390/ASEC2023-15925.
- [38] Rogalka M., Grabski J.K., Garbowski T. 2024. “Deciphering Double-Walled Corrugated Board Geometry Using Image Analysis and Genetic Algorithms”. *Sensors* 24 (6) : 1772. doi.org/10.3390/s24061772.
- [39] Rogalka M., Grabski J.K., Garbowski T. 2024. “In-Situ Classification of Highly Deformed Corrugated Board Using Convolution Neural Networks”. *Sensors* 24 (4) : 1051. doi.org/10.3390/s24041051.
- [40] Schramper K.E., Whitsitt W.J. 1988. “Faster, alternative ECT test procedure”. *Corrugated Containers Conference, Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry* : 65-69.
- [41] Szewczyk W. 2008. “Edge crush test of corrugated board | Odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe”. *Przegląd Papierniczy* 64 (2) : 93-96.
- [42] Szewczyk W., Bieńkowska M. 2020. “Effect of corrugated board structure on mechanical properties”. *Wood Research* 65 (4) : 653-662.
- [43] Tutak D., Özakhun C., Akgul A. 2007. “The examination of the impact of humidity on cardboard endurance in the offset printed and laminated packages”. *Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts, TAGA* : 575-584.