



# Współczynnik ścinania w warstwowym płytach z tektury falistej

## Shear correction factor in corrugated board layered plates

TOMASZ GARBOWSKI, JULIA GRACZYK

DOI: 10.15199/54.2025.12.3

Płyty warstwowe z rdzeniem pofalowanym stanowią istotną grupę lekkich konstrukcji stosowanych w opakowaniach, przegrodach budowlanych, konstrukcjach transportowych oraz panelach inżynierskich. Odpowiedź mechaniczna takich układów w dużej mierze zależy od geometrii periodycznego rdzenia, która determinuje podatność na ścinanie poprzeczne, a tym samym efektywną sztywność postaciową płyty. Podczas gdy klasyczne współczynniki korekcyjne ścinania są dobrze znane w rdzeniach płaskich, brak jest ujednoliconej formuły analitycznej dla rdzeni pofalowanych o dowolnym kształcie. W niniejszej pracy przedstawiono zwięzłą formułę matematyczną umożliwiającą wyznaczenie współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$  dla płyt warstwowych z periodycznym rdzeniem pofalowanym o różnych kształtach, takich jak: fala sinusoidalna, trapezowa, półkolistą, elipsoidalną i trójkątną. Podstawą analizy jest zasada równoważności energii odkształcenia postaciowego przekroju rzeczywistego i jego odpowiednika w teorii Timoshenki. Pole naprężeń stycznych rekonstruowane jest na podstawie ogólnego opisu geometrycznego profilu fali i całkowane w obrębie jednej komórki periodycznej. Zaproponowana metoda pokazuje, w jaki sposób kształt pofalowania wpływa bezpośrednio na mechanizm przenoszenia ścinania poprzez rozkład szerokości efektywnej oraz moment statyczny. Bez wchodzenia w zagadnienia optymalizacji, czy szczegółowej walidacji numerycznej, praca koncentruje się na strukturze matematycznej współczynnika  $k_s$  oraz jego wrażliwości geometrycznej. Uzyskane zależności stanowią przejrzyste narzędzie do analiz porównawczych oraz projektowania nowych rdzeni w płytach warstwowych, takich jak tektura falista.

**Słowa kluczowe:** tektura falista, współczynnik korekcyjny ścinania, periodyczna geometria rdzenia, konstrukcje warstwowe, modelowanie analityczne

Sandwich plates with corrugated cores represent an important class of lightweight structural systems used in packaging, building envelopes, transport structures and engineered panels. The mechanical response of such systems is strongly influenced by the geometry of the periodic core, which governs transverse shear deformation and, consequently, the effective shear stiffness of the plate. While classical shear correction factors are well established for flat sandwich cores, no unified analytical framework exists for corrugated cores of arbitrary shape. This short contribution presents a concise mathematical formulation for the evaluation of the shear correction factor  $k_s$  in sandwich plates with periodic corrugated cores of various geometries, including sinusoidal, trapezoidal, semicircular, elliptical and triangular waveforms. The formulation is based on energetic equivalence between the true cross-sectional shear strain energy and the corresponding Timoshenko plate idealization. The shear-stress field is reconstructed using a generalized geometric description of the corrugation profile and integrated over one periodic cell. The proposed framework highlights how the corrugation shape directly influences the shear-transfer mechanism through the first moment of area and the effective material width distribution. Without focusing on numerical optimization or detailed finite element validation, the paper emphasizes the mathematical structure of  $k_s$  and its geometric sensitivity. The derived expressions provide compact analytical insight into the role of corrugation shape and may serve as a transparent tool for preliminary design and comparative studies of new cores in corrugated boards.

**Keywords:** corrugated board, shear correction factor, periodic core geometry, sandwich structures, analytical modeling

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl; ORCID: 0000-0002-9588-2514), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu;

inż. **J. Graczyk** (julia.graczyk@student.put.poznan.pl), Instytut Analizy Konstrukcji, Politechnika Poznańska



## Wprowadzenie

Tektura falista należy do najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych w obszarze opakowań, zabezpieczeń logistycznych oraz lekkich konstrukcji użytkowych. Jej popularność wynika z unikalnego połączenia niskiej masy własnej, wysokiej efektywności materiałowej, podatności na recykling oraz możliwości kształtowania właściwości mechanicznych poprzez odpowiedni dobór geometrii rdzenia. Kluczowym elementem decydującym o zachowaniu mechanicznym tektury falistej jest właśnie jej periodyczny rdzeń pofalowany, który pełni funkcję dystansującą okładziny, a jednocześnie odpowiada za przenoszenie znacznej części obciążeń postaciowych [1-5, 9].

W klasycznym ujęciu inżynierskim tektura falista traktowana jest jako płyta warstwowa [7, 8, 10], w której okładziny przenoszą głównie naprężenia normalne związane ze zginaniem, natomiast rdzeń odpowiada za przenoszenie ścinania poprzecznego [3]. Taki podział ról prowadzi w naturalny sposób do stosowania uproszczonych modeli belkowych i płytowych typu Timoshenki lub Reissnera-Mindlina, w których deformacje postaciowe są uwzględniane w sposób uśredniony. Kluczowym parametrem tych modeli jest wówczas współczynnik korekcyjny ścinania  $k_s$ , który wiąże rzeczywistą, niejednorodną pracę rdzenia z jednorodnym polem odkształceń przyjmowanym w modelu jednowymiarowym lub dwuwymiarowym.

Dla rdzeni płaskich oraz jednorodnych rdzeni piankowych istnieją dobrze znane wzory analityczne na współczynnik  $k_s$ , wyprowadzone w oparciu o klasyczne rozkłady naprężeń stycznych. Sytuacja zasadniczo komplikuje się jednak w przypadku rdzeni pofalowanych, których geometria ma charakter periodyczny i silnie nieliniowy. W tekturze falistej kształt fali – sinusoidalny, trapezowy, półkolisty, elipsoidalny czy trójkątny – wpływa bezpośrednio na mechanizm przenoszenia ścinania, rozkład szerokości efektywnej, a także na lokalne koncentracje naprężeń. W efekcie współczynnik  $k_s$  przestaje być wielkością uniwersalną, a staje się funkcją geometrii rdzenia.

W praktyce inżynierskiej wpływ kształtu fali na podatność postaciową tektury falistej bywa często pomijany lub ujmowany w sposób empiryczny, na podstawie badań doświadczalnych lub kalibracji numerycznych. Choć podejście to bywa skuteczne w projektowaniu konkretnych wyrobów, ogranicza ono możliwość analizy porównawczej różnych kształtów fal oraz utrudnia świadome kształtowanie geometrii rdzenia pod kątem żądanych właściwości mechanicznych. W tym kontekście szczególnie użyteczne stają się proste, przejrzyste zależności matematyczne, które pozwalają bezpośrednio powiązać kształt fali z efektywną sztywnością na ścinanie.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zwartej, ujednoliconej metody wyznaczania współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$  dla płyt warstwowych z periodycznym rdzeniem pofalowanym, ze szczególnym uwzględnieniem tektury falistej. Analiza obejmuje różne rodzaje geometrii pofalowania, w tym fale sinusoidalne,

trapezowe, półkoliste, elipsoidalne oraz trójkątne [2-5]. Podstawą wyznaczenia współczynnika  $k_s$  jest zasada równoważności energii odkształcenia postaciowego, w której rzeczywista energia ścinania w obrębie jednej komórki periodycznej jest zrównywana z energią ścinania w uśrednionym modelu Timoshenki.

W przeciwieństwie do rozbudowanych analiz numerycznych [6], celem pracy nie jest szczegółowa walidacja obliczeń przy użyciu metody elementów skończonych ani optymalizacja kształtu rdzenia, lecz uwypuklenie struktury matematycznej problemu oraz pokazanie, w jaki sposób sam kształt fali wpływa na wartość współczynnika  $k_s$ . Przyjęte podejście umożliwia bezpośrednie porównywanie różnych typów pofalowania w sposób czysto analityczny, bez konieczności budowy złożonych modeli dyskretnych.

Zaproponowana metoda może być traktowana jako narzędzie do analiz porównawczych, projektowania wstępnego oraz celów dydaktycznych. Stanowi ona również naturalne uzupełnienie badań numerycznych i doświadczalnych, dostarczając prostych zależności, które pozwalają lepiej zrozumieć mechanizm przenoszenia ścinania w tekturze falistej i jego zależność od geometrii rdzenia.

## Materiały i metody

### Model płyty warstwowej z rdzeniem pofalowanym

Rozważana płyta warstwowa składa się z dwóch okładzin o jednakowych właściwościach mechanicznych oraz z rdzenia pofalowanego o geometrii periodycznej. Oś  $x$  jest osią podłużną płyty, natomiast przekrój poprzeczny warstw pofalowanych analizowany jest w płaszczyźnie  $(y, z)$ . Rdzeń opisany jest jako funkcja periodyczna:

$$z = f(y), f(y + p) = f(y), \quad (1)$$

gdzie  $p$  oznacza okres pofalowania.

Geometria jednej komórki periodycznej jest w pełni określona w przedziale:

$$y \in [0, p]. \quad (2)$$

Wysokość rdzenia wynosi:

$$h = \max(f(y)) - \min(f(y)). \quad (3)$$

Pole przekroju rdzenia w jednej komórce periodycznej określone jest jako:

$$A_c = \int_0^p b(y) dy, \quad (4)$$

gdzie  $b(y)$  oznacza lokalną szerokość efektywną przekroju rdzenia.

Materiał rdzenia charakteryzowany jest modułem ścinania  $G_c$  w funkcji modułu Young'a  $E_i$  oraz współczynnika Poissona  $\nu_{ij}$  (indeksy  $i, j$  oznaczają odpowiednio kierunki MD i CD):

$$G_c = g(E_i, \nu_{ij}). \quad (5)$$



**Definicja energetyczna współczynnika korekcyjnego ścinania**

Rozkład naprężeń  $\tau_{xz}$  stycznych w rdzeniu pod działaniem siły tnącej  $V$  jest niejednorodny i zależy od kształtu funkcji  $f(y)$ . Całkowita energia odkształcenia postaciowego w jednej komórce periodycznej wynosi:

$$U_{\text{shear}} = \frac{1}{2} \int_A \frac{\tau_{xz}^2(y, z)}{G_c} dA. \quad (6)$$

W uśrednionym modelu Timoshenki energia postaciowa w tej samej komórce zapisana jest jako:

$$U_{\text{shear}}^{(T)} = \frac{V^2}{2k_s G_c A_c}, \quad (7)$$

gdzie:

$k_s$  – współczynnik korekcyjny ścinania,

$A_c$  – pole przekroju rdzenia.

Z warunku równoważności energii:

$$U_{\text{shear}} = U_{\text{shear}}^{(T)} \quad (8)$$

otrzymuje się ogólną definicję współczynnika:

$$k_s = \frac{V^2}{A_c \int_A \tau_{xz}^2(y, z) dA}. \quad (9)$$

Z uwagi na jednorodność względem siły, przyjmuje się

$$V = 1. \quad (10)$$

**Rekonstrukcja pola naprężeń ścinających metodą uogólnionego VQ/1**

Dla belkowego przepływu ścinania przyjmuje się klasyczną zależność:

$$\tau_{xz}(y) = \frac{V Q(y)}{I b(y)}, \quad (11)$$

gdzie:

$Q(y)$  – moment statyczny powyżej warstwy  $y$ ,

$I$  – moment bezwładności przekroju względem osi obojętnej,

$b(y)$  – efektywna szerokość materiału w danym położeniu.

Moment statyczny określony jest wzorem:

$$Q(y) = \int_y^p (z(y') - \bar{z}) b(y') dy', \quad (12)$$

a położenie osi obojętnej:

$$\bar{z} = \frac{1}{A_c} \int_0^p z(y) b(y) dy. \quad (13)$$

Moment bezwładności rdzenia w jednej komórce:

$$I = \int_0^p (z(y) - \bar{z})^2 b(y) dy. \quad (14)$$

Po podstawieniu wzorów (12)-(14) do (11) uzyskuje się pole naprężeń jako jawne wyrażenie zależne od funkcji kształtu  $f(y)$ .

**Postać całki energetycznej**

Podstawiając (11) do definicji energii (6), otrzymuje się:

$$U_{\text{shear}} = \frac{1}{2G_c} \int_0^p \left( \frac{Q^2(y)}{I^2 b^2(y)} \right) b(y) dy = \frac{1}{2G_c I^2} \int_0^p \frac{Q^2(y)}{b(y)} dy. \quad (15)$$

Po podstawieniu (15) do (9) dostaje się zwartą postać współczynnika korekcyjnego:

$$k_s = \frac{2I^2}{A_c \int_0^p \frac{Q^2(y)}{b(y)} dy}. \quad (16)$$

Równanie (16) stanowi ogólną postać matematyczną współczynnika  $k_s$  dla dowolnego kształtu pofalowania.

**Opis kształtów fal jako szczególnych przypadków funkcji  $f(y)$** 

Dla kolejnych typów rdzeni funkcję (1) zapisuje się w postaciach szczególnych:

- fala sinusoidalna:

$$z(y) = \frac{h}{2} \sin\left(\frac{2\pi y}{p}\right), \quad (17)$$

- fala trójkątna:

$$z(y) = \begin{cases} \frac{2h}{p} y, & 0 \leq y < \frac{p}{2}, \\ \frac{2h}{p} (p - y), & \frac{p}{2} \leq y \leq p, \end{cases} \quad (18)$$

- fala trapezowa ( $a = p/4$ ):

$$z(y) = \begin{cases} \frac{h}{a} y, & 0 \leq y \leq a, \\ h, & a < y < p - a, \\ \frac{h}{a} (p - y), & p - a \leq y \leq p, \end{cases} \quad (19)$$

- fala prostokątna:

$$z(y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq y < \frac{p}{2}, \\ h, & \frac{p}{2} \leq y \leq p, \end{cases} \quad (20)$$

- fala półkolistą:

$$z(y) = \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi y}{p} \right), \quad (21)$$

- fala elipsoidalna:

$$z(y) = \frac{h}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{2y}{p} - 1 \right)^2}. \quad (22)$$



Po podstawieniu odpowiedniej postaci funkcji  $f(y)$  do wzorów (12)–(16) możliwe jest bezpośrednie, analityczne wyznaczenie współczynnika  $k_s$  dla każdego typu pofalowania.

### Wyniki

Przedstawiono tu wyniki obliczeń współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$  uzyskane na podstawie ujednoliconej metody analitycznej, opisanej we wcześniejszym fragmencie pracy. Analiza obejmuje sześć podstawowych kształtów rdzenia pofalowanego: falę sinusoidalną, trójkątną, trapezową, półkolistą, elipsoidalną oraz prostokątną. Dla wszystkich przypadków przyjęto tę samą wysokość fali  $h$  oraz okres  $p$ , a wyniki przedstawiono w postaci znormalizowanej względem ilorazu  $h/p$ . Obliczenia wykonano dla jednostkowej siły tnącej  $V = 1$ .

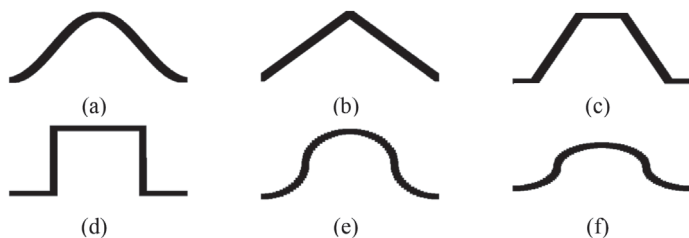
### Porównanie geometrii fal – reprezentacje funkcji $z = f(y)$

Na rysunku 1 przedstawiono zestaw funkcji opisujących pojedynczą komórkę periodyczną  $z = f(y)$  dla wszystkich analizowanych kształtów fal. Rysunek składa się z sześciu podwykresów w jednym układzie współrzędnych  $(y, z)$ , z zachowaniem tej samej skali dla osi  $y$  i  $z$ . Każda krzywa odpowiada jednej postaci szczególnej funkcji, zdefiniowanej wzorami (17)–(22). Rysunek pełni rolę wyłącznie geometryczną i umożliwia bezpośrednie porównanie stopnia krzywizny, obecności odcinków poziomych oraz ostrości przejść między zboczami fali.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry geometryczne dla poszczególnych kształtów fal, w tym: grubość fali  $t$ , wysokość fali  $h$ , okres  $p$ , długość fali  $L$ , pole przekroju rdzenia w jednej komórce  $A_c$  oraz moment bezwładności  $I$ , obliczone na podstawie wzorów (4) i (14). Tabela ta stanowi bazę odniesienia do dalszych wyników energetycznych i pozwala ocenić, w jakim stopniu sama geometria wpływa na wielkości pochodne.

Tabela 1. Wybrane parametry analizowanych kształtów flutingu

|           | $t$ [mm] | $h$ [mm] | $p$ [mm] | $L$ [mm] | $A_c$ [mm <sup>2</sup> ] | $I$ [mm <sup>4</sup> ] |
|-----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------|------------------------|
| Sinus     | 0,2      | 3,0      | 6,0      | 8,782    | 1,7564                   | 1,6884                 |
| Trójkąt   | 0,2      | 3,0      | 6,0      | 12,00    | 2,4000                   | 3,6000                 |
| Trapez    | 0,2      | 3,0      | 6,0      | 9,708    | 1,9416                   | 2,3562                 |
| Prostokąt | 0,2      | 3,0      | 6,0      | 8,425    | 1,6970                   | 1,2728                 |
| Półkole   | 0,2      | 3,0      | 6,0      | 9,425    | 1,8850                   | 2,1206                 |
| Półelipsa | 0,2      | 2,0      | 6,0      | 7,933    | 1,5865                   | 0,8714                 |



Rys. 1. Geometrie analizowanych kształtów flutingu: (a) sinusoidalny, (b) trójkątny, (c) trapezowy, (d) prostokątny, (e) półkolisty, (f) eliptyczny

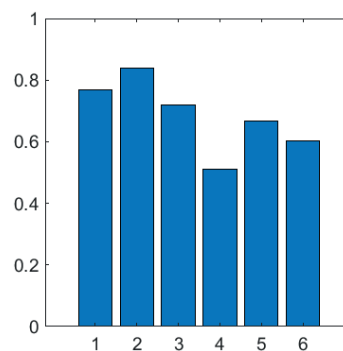
### Wartości współczynnika $k_s$ dla różnych kształtów fal

W tabeli 2 przedstawiono obliczone wartości współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$  dla wszystkich sześciu kształtów fal, przy tej samej relacji geometrycznej  $h/p$ . Tabela zawiera również pomocniczo wartości znormalizowane  $k_s/k_{s,\sin}$ , odniesione do fali sinusoidalnej jako geometrycznego przypadku bazowego. Taki zapis umożliwia bezpośrednie porównanie wpływu samego kształtu pofalowania na wartość współczynnika przy niezmiennych wymiarach globalnych rdzenia.

Tabela 2. Współczynnik korekcyjny ścinania analizowanych kształtów flutingu

|           | $k_s$ [-] | $k_s / k_{s,\sin}$ [-] |
|-----------|-----------|------------------------|
| Sinus     | 0,7673    | 1,000                  |
| Trójkąt   | 0,8385    | 1,092                  |
| Trapez    | 0,7202    | 0,939                  |
| Prostokąt | 0,5093    | 0,664                  |
| Półkole   | 0,6677    | 0,870                  |
| Półelipsa | 0,6022    | 0,785                  |

Na rysunku 2 przedstawiono te same wyniki w postaci wykresu słupkowego, gdzie każdy słupek odpowiada jednemu typowi fali. Oś pionowa przedstawia wartość  $k_s$ , a oś pozioma – kolejno: sinus, trójkąt, trapez, półkole, elipsa oraz prostokąt. Ujęcie to pozwala na szybkie wizualne porównanie poziomów sztywności postaciowej dla różnych geometrii rdzenia.



Rys. 2. Współczynnik korekcyjny ścinania  $k_s$  (na osi pionowej) dla wybranych kształtów flutingu: 1 – sinus, 2 – trójkąt, 3 – trapez, 4 – prostokąt, 5 – półkole, 6 – półelipsa

### Dyskusja

Przedstawione wyniki pokazują w sposób jednoznaczny, że kształt pofalowania rdzenia ma bezpośredni i istotny wpływ na wartość współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$ . Już na poziomie samych rozkładów pierwszego momentu pola  $Q(y)$  oraz naprężeń  $\tau_{xz}(y)$  widoczne są wyraźne różnice między poszczególnymi typami fal. Geometrie o przebiegu gładkim, takie jak fala sinusoidalna, półkolistą czy elipsoidalną, prowadzą do łagodnych rozkładów na-





prężen, natomiast fale o ostrych załamaniach – trójkątna, trapezowa i prostokątna – generują wyraźne koncentracje ścinania w określonych strefach przekroju.

Różnice te znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w wartościach współczynnika  $k_s$ . Dla tej samej relacji  $h/p$  uzyskuje się wyraźnie odmienne poziomy efektywnej sztywności postaciowej, co potwierdza, że współczynnik ścinania nie jest wielkością uniwersalną dla tekstury falistej, lecz w naturalny sposób staje się funkcją kształtu fali. Szczególnie interesujące jest porównanie fal o tej samej amplitudzie, lecz różnej krzywiznie lokalnej, gdzie różnice w  $k_s$  wynikają wyłącznie z geometrii rdzenia. Wskazuje to, że dobór kształtu fali może być w praktyce traktowany jako dodatkowy parametr projektowy, niezależny od samego stosunku wysokości do okresu.

Z punktu widzenia zaproponowanej analizy matematycznej istotne jest również to, że wszystkie uzyskane wyniki wynikają bezpośrednio z jednej ogólnej postaci wzoru (16), a różnice między falami pojawiają się wyłącznie poprzez funkcję  $f(y)$ . Potwierdza to spójność przyjętego podejścia i pokazuje, że zaproponowany model umożliwia jednoznaczne porównywanie różnych geometrii w ramach jednej, wspólnej struktury matematycznej.

### Podsumowanie

W pracy przedstawiono zwarte, ujednolicone sformułowanie matematyczne, służące do wyznaczania współczynnika korekcyjnego ścinania  $k_s$  dla płyt warstwowych z periodycznym rdzeniem pofalowanym, ze szczególnym uwzględnieniem tekstury falistej. Zastosowane podejście, oparte na zasadzie równowagi energii odkształcenia postaciowego, pozwala na opis zagadnienia w sposób w pełni ogólny, niezależny od konkretnego typu pofalowania.

Wyniki obliczeń potwierdzają, że kształt fali  $h/p$  rdzenia stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na efektywną sztywność postaciową konstrukcji. Dla tej samej smukłości fali  $h/p$  uzyskuje się istotnie różne wartości współczynnika  $k_s$ , co oznacza, że nie może on być traktowany jako wielkość uniwersalna dla wszystkich odmian tekstury falistej. Różnice te wynikają bezpośrednio z odmiennego przebiegu funkcji  $f(y)$ , a więc z geometrii rdzenia.

Zaletą zaproponowanego sformułowania jest jego przejrzystość matematyczna oraz bezpośrednie powiązanie współczynnika  $k_s$  z parametrami geometrycznymi fali. Pozwala to na szybkie porównywanie różnych kształtów pofalowania bez konieczności stosowania rozbudowanych analiz numerycznych. W tym sensie przedstawione zależności mogą stanowić użyteczne narzędzie w projektowaniu wstępnym, analizach porównawczych oraz dydaktyce mechaniki konstrukcji warstwowych.

Prezentowana praca ma charakter podstawowy i koncepcyjny. Stanowi ona punkt wyjścia do dalszych badań obejmujących walida-

cję numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych, uwzględnienie własności materiałowych rzeczywistych papierów i klejów, a także analizę wpływu nieliniowości geometrycznej i materiałowej na efektywną podatność postaciową tekstury falistej.

Artykuł recenzowany

### LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 1. The influence of flute crash on basic properties of corrugated board. | Komputerowo wspomagane wyznaczanie nośności opakowań z tekstury falistej. Cz.1. Wpływ zgniecenia tekstury falistej na jej podstawowe parametry". *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388. DOI: 10.15199/54.2018.6.1.
- [3] Garbowski T. 2025. "Numerical analysis of transverse shear in corrugated board with non-standard fluting geometry. | Numeryczna analiza ścinania poprzecznego płyt z tekstury falistej z warstwą pofalowaną o niestandardowej geometrii". *Przegląd Papierniczy* 81 (5) : 249-257. DOI: 10.15199/54.2025.5.1.
- [4] Garbowski T. 2025. "Flat crush analysis of corrugated board with futuristic fluting geometries. | Analiza zgniatania płaskiego tekstury falistej z warstwą pofalowaną o futurystycznych kształtach". *Przegląd Papierniczy* 81 (4) : 205-212. DOI: 10.15199/54.2025.4.1.
- [5] Garbowski T. 2025. "Exploring the Future of Novel Flute Shapes and Their Mechanical Benefits". *BioResources* 20 (2) : 2003-2006. doi.org/10.15376/biores.20.2.2483-2486.
- [6] 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.
- [7] Hoon M.L., Park J.M., 2004. "Flexural stiffness of selected corrugated structures". *Packaging Technology and Science* 17 (5) : 275-286.
- [8] Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kotakowski Z. 2020. "Calculation of honeycomb paperboard resistance to EDGE crush test". *Materials* 13 (7).
- [9] 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.
- [10] Szewczyk W. 2008. "Edge crush test of corrugated board | Odporność tekstury falistej na zgniatanie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 64 (2) : 93-96.