

# Digitalizacja tektury falistej

## Digitization of corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2022.12.2

*Digitalizacja tektury falistej jest zagadnieniem bardzo aktualnym i często podejmowanym przez naukowców w ostatnich dekadach. Jest to niewątpliwie związane z ogólnosiwiatowym trendem dotyczącym optymalizacji produktu, jak również z optymalnym zużyciem surowców, czyli pośrednio także z ochroną środowiska. W niniejszej pracy pokazano dwie ścieżki postępowania w procesie digitalizacji tektury falistej. W pierwszej wykorzystuje się podstawowe badania laboratoryjne papieru, dodatkowo należy precyzyjnie ukształtować geometrię warstw przekroju, wykorzystując odpowiednie techniki numeryczne i dobrać poprawny model materiałowy do każdej warstwy. Druga ścieżka oparta jest na badaniach samej tektury falistej – w tym przypadku najistotniejszy jest odpowiedni dobór badań laboratoryjnych, tak aby uzyskać wszystkie parametry konstytutywne niezbędne do zbudowania zdigitalizowanego modelu tektury falistej. Celem niniejszej pracy było szczegółowe przeanalizowanie obydwu technik oraz wskazanie wad i zalet związanych z ich stosowaniem.*

**Słowa kluczowe:** tektura falista, badania laboratoryjne, metoda elementów skończonych

*Digitization of corrugated board is a very current issue and often taken up by scientists in recent decades. This is undoubtedly related to the global trend for product optimization and thus also to the optimal use of raw materials, and indirectly also to environmental protection. This paper shows two ways of proceeding in the process of digitizing corrugated board. In the first of the possible paths, basic laboratory tests of paper are used, additionally, the geometry of the cross-section layers should be precisely while using appropriate numerical techniques and, in the last step, the correct material model for each layer should be selected. The second path is based on testing the corrugated board itself – in this case, the most important thing is, of course, the appropriate selection of laboratory tests in order to obtain all the constitutive parameters necessary to build a digitized model of corrugated board. In this paper, both paths are analyzed in detail, and the advantages and disadvantages associated with the use of both techniques are indicated.*

**Keywords:** corrugated board, laboratory tests, finite element method

### Wprowadzenie

Modelowanie numeryczne tektury falistej staje się coraz bardziej powszechne w środowisku naukowym i inżynierskim. W ostatnich latach w literaturze naukowej pojawia się coraz więcej artykułów, w których autorzy prezentują różne modele obliczeniowe opakowań i rozmaitych konstrukcji z tektury falistej [5, 17, 18, 31, 33, 34]. Jest to związane z ciągłym zwiększaniem świadomości producentów tektury, którzy nieustannie pracują nad optymalizacją swoich produktów, czym w oczywisty sposób stymulują naukowców i inżynierów do bardziej wyłożonych starań, aby wprowadzać coraz lepsze narzędzia i modele do symulacji tektury falistej. Warto podkreślić, że celem tych symulacji może być na przykład dobór optymalnego składu tektury falistej.

Temat optymalnej tektury falistej był już poruszany we wrześniowym tegorocznym numerze „Przeglądu Papierniczego” [9]. Nieśtetę pojęcie „optymalna tektura” może być niejednoznaczne, gdyż odnosi się do produktu optymalnego tylko w pewnych warunkach. Optymalna tektura falista odnosi się do stwierdzeń: najlepsza do zadanej pracy konstrukcji (typu lub sposobu obciążenia); najlepsza do konkretnej konstrukcji geometrycznej opakowania; najlepsza w pewnych określonych warunkach klimatycznych przechowywania lub transportu. Jednak bez względu na fakt, czy wiadomo jak uzyskać optymalną tekturę falistą, w pierwszej kolejności należy ją poprawnie zamodelować. Dzięki numerycznym modelom możliwe jest nie tylko symulowanie pracy konstrukcji wykonanych z tektury falistej, ale także analizowanie i dobieranie najlepszego składu samej tektury. Jak wiadomo, poszczególne jej warstwy pełnią różne role w przekroju, np. podczas zginania tylko warstwy płaskie (linery) decydują o sztywności przekroju, natomiast warstwy pofalowane (fluting) pełnią jedynie rolę wspierającą – utrzymują linery w określonej odległości od siebie. Dlatego każde uszkodzenie flutingu (np. poprzez nadruk fleksograficzny [1]) skutkuje słabszym

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań; ORCID: 0000-0002-9588-2514



podtrzymaniem warstw płaskich i – co się z tym wiąże – spadkiem sztywności tektury falistej [8, 12, 14]. Podobny spadek sztywności obserwuje się, gdy warstwy płaskie są wstępnie wybocone [4, 21]. Rola poszczególnych warstw rozkłada się zupełnie inaczej w teście zgniatania krawędziowego, w których wszystkie warstwy są jednakowo istotne.

Warto podkreślić, że wszystkie te efekty można uwzględnić w modelu numerycznym i następnie analizować wielkość imperfekcji linerów czy uszkodzenia flutingu, przy których projektowana tektura przestanie spełniać stawiane przed nią wymagania wytrzymałościowe. Umiejętność poprawnego modelowania numerycznego tektury falistej wydaje się być zatem kluczowa w procesie jej projektowania. Oczywiście istniejące uproszczone modele analityczne czy empiryczne mogą być pomocne we wstępnym procesie doboru składu tektury falistej. Jednakże modele uproszczone najczęściej służą jedynie do wyznaczania parametru ECT, określającego odporność próbki tektury na zgniatanie kolumnowe [7, 10, 11, 13, 32]. Nie jest to jednak jedyny istotny parametr tektury falistej, który definiuje jej jakość.

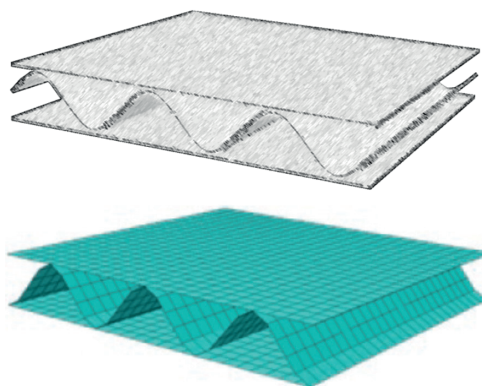
W celu uporządkowania wiedzy dotyczącej procesu digitalizacji tektury falistej w pracy przedstawiono schemat postępowania w dwóch różnych wariantach: opartym na badaniach papieru oraz opartym na badaniach samej tektury falistej. Oba te warianty znacznie różnią się od siebie i wymagają zupełnie różnych technik numerycznych.

W pierwszym wariantcie istnieje możliwość zamodelowania pełnego przekroju z wszystkimi szczegółami geometrycznymi każdej warstwy. Model ten doskonale nadaje się do szczegółowej analizy i optymalizacji papierów składowych [28, 29]. Tu należy poprawnie zamodelować również połączenie między warstwami, które nie jest badane i należy je dobrać *a priori* bez możliwości weryfikacji. To największa wada tego wariantu. Dodatkowo, jeżeli jest potrzeba wykorzystania modelu tektury w obliczeniach większych konstrukcji, niezbędne jest zhomogenizowanie go do jednej płaskiej warstwy, która ma zastępcze właściwości mechaniczne, odpowiadające tym, którymi charakteryzował się model pierwotny. W literaturze można znaleźć szereg metod homogenizacji [2, 3, 19, 20, 27]. W procesie homogenizacji można uwzględnić wszelkie dodatkowe efekty, np. imperfekcje [30], nacięcia i perforacje [22], zgniecenie [8, 14] itp.

W drugim wariantcie model jest automatycznie homogenizowany w trakcie digitalizacji tektury falistej. Oznacza to że, wszystkie opisane wyżej efekty dodatkowe są już uwzględnione w modelu, ponieważ badana tektura jest fizycznie wytworzona i zawiera zarówno imperfekcje, jak i uszkodzenia materiału [15, 16]. W zdigitalizowanym w ten sposób modelu wszystkie efekty klejenia warstw są również uwzględnione i nie ma już potrzeby dodatkowego modelowania połączeń między warstwami. Jest to bezsporna zaleta tego modelowania. Największą wadą jest fakt, że nie jest możliwe wariantowanie składu, ponieważ wszystkie warstwy tektury falistej zostały wstępnie zhomogenizowane w trakcie digitalizacji.

### Numeryczny model tektury falistej oparty na badaniach próbek papieru – model szczegółowy

W procesie digitalizacji tektury falistej do modelu szczegółowego niezbędne jest zamodelowanie wszystkich detali tektury, tj. wszystkich jej warstw, połączenia między warstwami i ewentualnych imperfekcji (rys. 1).



Rys. 1. Digitalizacja do modelu szczegółowego

Schemat postępowania w tym procesie można podzielić na trzy główne etapy:

- Wykonanie szeregu badań laboratoryjnych każdej warstwy tektury i dobranie odpowiedniego modelu materiałowego do każdego papieru składowego;
- Wykonanie pełnego modelu numerycznego odzwierciedlającego dokładną geometrię tektury falistej;
- Określenie wszelkich niedoskonałości tektury i uwzględnienie ich w modelu.

Badania laboratoryjne wszystkich papierów składowych sprwadają się do testów rozciągania (TR) w trzech głównych kierunkach ortotropii papieru, tj. w kierunku maszynowym (MD), w kierunku poprzecznym (CD) i w kierunku obróconym o 45° w stosunku do kierunku MD. Dodatkowo w każdym z wymienionych kierunków wykonuje się test ściskania przy krótkim wpięciu (SCT). Od poprawności i kompletności tych badań zależy jak dokładny model materiałowy można dobrać do każdej warstwy. W literaturze naukowej prezentowano wiele modeli odnoszących się do papieru lub tektury, np. [23, 24, 25, 26, 35, 36]. Najprostsze modele konstytutywne Hill czy Tsai-Wu można skalibrować na niekompletnych danych eksperymentalnych, to znaczy na wynikach testów TR w kierunku MD i CD oraz SCT tylko w jednym kierunku (np. CD). Brakujące parametry w modelu można znaleźć w literaturze. Warto zauważyć, że wszystkie zbadane parametry papierów przed produkcją tektury falistej (parametry pierwotne) mogą różnić się od parametrów tych papierów po produkcji (parametry wtórne). Niestety, nie ma możliwości sprawdzenia efektu degradacji tych parametrów. Dlatego analizy numeryczne wykorzystujące model

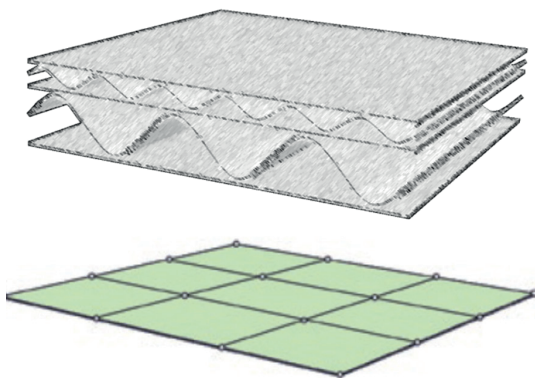
szczegółowy zbudowany na parametrach pierwotnych może dawać nieco zawyżone wyniki wytrzymałościowe.

Wykonanie pełnego modelu wiąże się z dokładnym odwzorowaniem geometrii przekroju tektury falistej, czyli dokładnym zmierzeniem geometrii warstw pofalowanych oraz grubości wszystkich warstw. Wskazane jest również zdigitalizowanie dokładnego kształtu fali, ponieważ przyjmowanie *a priori* sinusoidalnego kształtu pofalowania, choć jest bardzo praktyczne, może prowadzić do zaburzenia wyników analiz wytrzymałościowych. Największą wadą tego rodzaju modelowania jest potrzeba przyjęcia pewnych założeń połączenia między warstwami tektury. Najczęściej przyjmuje się pełne połączenie bez uwzględniania podatności kleju – ponownie, jak w wyżej opisanych przypadkach, przyjęcie takich uproszczeń prowadzi do przeszacowania sztywności i wytrzymałości modelowanej tektury falistej.

Jeżeli znane są procesy przetwórcze, przez jakie przeszła tektura falista, to możliwe jest uwzględnienie tych efektów w procesie jej digitalizacji. Szersze omówienie tych efektów i metod pozwalających na ich uwzględnienie w modelowaniu można znaleźć w pracach [8, 14, 30].

### Numeryczny model tektury falistej oparty na badaniach próbek tektury falistej – model uproszczony

Dużo mniej skomplikowana jest digitalizacja tektury falistej do modelu uproszczonego. Do jej poprawnego przeprowadzenia wymagany jest jednak odpowiedni zestaw testów. Do tego celu można wykorzystać np. urządzenie firmy FEMAT [6], które zostało zaprojektowane do digitalizacji tektury falistej do modelu uproszczonego (rys. 2). Teoretycznie możliwe jest wykorzystanie dowolnego zestawu testów, który zapewni pozyskanie wszystkich niezbędnych parametrów.



Rys. 2. Digitalizacja do modelu uproszczonego

Zdigitalizowana w ten sposób tektura falista charakteryzuje się dużo prostszą geometrią, ponieważ numeryczny model tektury sprowadzony jest do jednej warstwy, co pozwala na wykorzystywanie modelu do obliczeń dużych i skomplikowanych konstrukcji. Dodat-

kowo wykorzystanie metody pozwala na wybór dowolnego modelu materiałowego. Bardzo ważną zaletą tego rodzaju modelowania jest fakt, że model zawiera już w sobie wszystkie możliwe efekty wpływające na tekturę w trakcie jej produkcji i przerobu, tj. wszystkie wspomniane wcześniej imperfekcje, uszkodzenia, efekty nawilżania i suszenia warstw pofalowanych, a także wpływ kleju na sztywność i wytrzymałość tektury falistej.

## Dyskusja

Podsumowanie powyższych opisów i schematów postępowania w procesie digitalizacji tektury falistej w formie zebranych wad i zalet zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wady i zalety prezentowanych technik digitalizacji tektury falistej

Model szczegółowy	Model uproszczony
+ wymaganych jest tylko kilka prostych testów papierów składowych	– wymaga kilku różnych badań laboratoryjnych
+ możliwa jest szeroka przestrzeń dla optymalnego projektu tektury falistej	– brak możliwości optymalizacji składu
– nie znane są a priori wpływ sklejania, zamoczenia, wysuszenia, uszkodzenia, imperfekcji itp.	+ wszystkie składniki (klej, wilgoć, ewentualne uszkodzenia) są „wtopione” w modelu numerycznym
– konieczne jest zastosowanie zaawansowanych technik matematycznych do homogenizacji	+ możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie modelu do obliczeń skomplikowanych konstrukcji opakowań

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono dwa schematy postępowania w procesie digitalizacji tektury falistej, ze wszystkimi ich zaletami i wadami. Z zaprezentowanych opisów i przeprowadzonej dyskusji nie można jednak wyciągnąć jednoznacznego wniosku, który z procesów jest lepszy lub bardziej dokładny. Oba procesy digitalizacji pozwalają zbudować inne modele numeryczne, mające zastosowanie do innych rodzajów analizy. Model dokładny doskonale nadaje się do optymalizacji składu tektury falistej, lecz nie jest praktyczny w procesie szacowania nośności opakowań czy też innych konstrukcji z tektury falistej. Model uproszczony uwzględnia wszystkie efekty, tj. uszkodzenia, imperfekcje i wpływ klejenia – jest przeznaczony do obliczeń wytrzymałościowych dużych i skomplikowanych modeli opakowań, jednakże nie ma zastosowania w optymalizacji składu tektury falistej.

Artykuł recenzowany

## LITERATURA

- [1] Andrzejak K., Garbowski T. 2021. "The influence of analog and digital printing on the strength parameters of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 77 (11) : 593-599. <https://doi.org/10.15199/54.2021.11.2>

- [2] Biancolini M.E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Comp. Struct.* 69 : 322-328.
- [3] Buannic N., Cartraud P., Quesnel T. 2003. "Homogenization of corrugated core sandwich panels". *Comp. Struct.* 59 : 299-312.
- [4] Czechowski L., Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Gralewski J., Bieńkowska M. 2021. "Numerical and experimental study of five-layer non-symmetrical paperboard panel stiffness". *Materials* 14, 7453.
- [5] Fadji T., Ambaw A., Coetzee C.J., Berry T.M., Opara U.L. 2018. "Application of finite element analysis to predict the mechanical strength of ventilated corrugated paperboard packaging for handling fresh produce". *Biosyst. Eng.* 174 : 260-281.
- [6] <http://fematsystems.pl/bse-system/>
- [7] Frank B., Cash D. 2022. "Edge crush testing methods and box compression modeling". *Tappi Journal* 21 (8) : 418-433.
- [8] Gajewski T., Garbowski T., Staszak N., Kuca M. 2021. "Crushing of Double-Walled Corrugated Board and Its Influence on the Load Capacity of Various Boxes". *Energies* 14, 4321. <https://doi.org/10.3390/en14144321>
- [9] Garbowski T. 2022. "Optimal corrugated board - what does it mean". *Przegląd Papierniczy* 78 (9) : 517-524. <https://doi.org/10.15199/54.2022.9.1>
- [10] Garbowski T. 2022. "Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (6) : 337-341. <https://doi.org/10.15199/54.2022.6.1>
- [11] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (4) : 210-216. <https://doi.org/10.15199/54.2022.4.1>
- [12] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 1. The influence of flute crush on basic properties of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388. <https://doi.org/10.15199/54.2018.6.1>
- [13] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "From paper to corrugated board - modeling the edge crush test". *Przegląd Papierniczy* 78 (5) : 271-277. <https://doi.org/10.15199/54.2022.5.1>
- [14] Garbowski T., Gajewski T., Mrówczyński D., Jędrzejczak R. 2021. "Crushing of Single-Walled Corrugated Board during Converting: Experimental and Numerical Study". *Energies* 14, 3203. <https://doi.org/10.3390/en14113203>
- [15] Garbowski T., Garbowska L. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 2. The sensitivity analysis in selected laboratory tests of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 74 (8) : 435-440.
- [16] Garbowski T., Garbowska L. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 3. Laboratory-numerical procedure for an identification of elastic properties of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 74 (9) : 577-585.
- [17] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 1. Theoretical Assumptions in Numerical Modeling of Paperboard Packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (4) : 219-222.
- [18] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 2. Experimental tests and numerical analysis of paperboard packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (5) : 277-281.
- [19] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [20] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [21] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A. 2022. "Analytical determination of the bending stiffness of a five-layer corrugated cardboard with imperfections". *Materials* 15 (2) : 663. <https://doi.org/10.3390/ma15020663>
- [22] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Mrówczyński D. 2021. "Numerical Homogenization of Multi-Layered Corrugated Cardboard with Creasing or Perforation". *Materials* 14, 3786. <https://doi.org/10.3390/ma14143786>
- [23] Harrysson A., Ristinmaa M. 2008. "Large strain elasto-plastic model of paper and corrugated board". *International Journal of Solids and Structures* 45 : 3334-3352.
- [24] Hill R. 1948. "A theory of the yielding and plastic flow in anisotropic metals". *Proc. Royal Soc.* 193 : 281-297.
- [25] Hoffman O. 1967. "The brittle strength of orthotropic materials". *Journal of Composite Materials* 1 : 200-206.
- [26] Makela P., Ostlund S. 2003. "Orthotropic elasticplastic material model for paper materials." *Int. J. Solids Structures* 40 : 5599-5620.
- [27] Marek A., Garbowski T. 2015. "Homogenization of sandwich panels". *Computer Assisted Methods in Engineering and Science* 22 (1) : 39-50.
- [28] Mrówczyński D., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2022. "Non-local sensitivity analysis and numerical homogenization in optimal design of single-wall corrugated board packaging". *Materials* 15 (3) : 720. <https://doi.org/10.3390/ma15030720>
- [29] Mrówczyński D., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2022. "Optimal Design of Double-Walled Corrugated Board Packaging". *Materials* 15, 2149. <https://doi.org/10.3390/ma15062149>
- [30] Mrówczyński D., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2022. "Numerical Homogenization of Single-Walled Corrugated Board with Imperfections". *Applied Sciences* 12, 9632. [doi.org/10.3390/app12199632](https://doi.org/10.3390/app12199632)
- [31] Park J., Chang S., Jung H.M. 2020. "Numerical prediction of equivalent mechanical properties of corrugated paperboard by 3D finite element analysis". *Appl. Sci.* 10, 7973.
- [32] Park J., Park M., Choi D.S., Jung H.M., Hwang S.W. 2020. "Finite element-based simulation for edgewise compression behavior of corrugated paperboard for packing of agricultural products". *Appl. Sci.* 10, 6716.
- [33] Pidl R., Fehér L., Böröcz P. 2022. "The Effect of Side Wall Cutout Sizes on Corrugated Box Compression Strength in the Function of Length-to-Width Ratios—An Experimental Study". *Appl. Sci.* 12, 6939. <https://doi.org/10.3390/app12146939>
- [34] Suarez B., Muneta M.L.M., Sanz-Bobi J.D., Romero G. 2021. "Application of homogenization approaches to the numerical analysis of seating made of multi-wall corrugated cardboard". *Compos. Struct.* 262, 113642.
- [35] Tsai S.W., Wu E.M. 1971. "A general theory of strength for anisotropic materials". *Journal of Composite Materials* 5 : 58-80.
- [36] Xia Q.S., Boyce M.C., Parks D.M. 2002. "A constitutive model for the anisotropic elasticplastic deformation of paper and paperboard". *International Journal of Solids and Structures* 39 : 4053-4071.