



Optymalna tektura falista – czyli jaka?

Optimal corrugated board – what does it mean?

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2022.9.1

Tektura falista charakteryzuje się doskonałym stosunkiem nośności do objętości. Oznacza to, że przy stosunkowo niskiej masie materiał ten posiada zaskakująco wysoką wytrzymałość, na co największy wpływ ma zastosowanie naprzemiennie warstw płaskich i pofalowanych. Geometria i struktura tektury falistej przypomina ortotropowe płyty typu sandwich, które cechuje bardzo wysoka odporność na ściskanie, a także sztywność zginania w obu kierunkach. Nośność tektury falistej zależy w dużej mierze od doboru odpowiednich papierów, które są produkowane z różną zawartością celulozowych włókien pierwotnych i pochodzących z recyklingu włókien wtórnych, co bezpośrednio wpływa na ich właściwości mechaniczne, szczególnie w skali mikro. Na wytrzymałość tektury falistej wpływa również kształt warstwy pofalowanej, która może przyjmować różne formy typowych funkcji periodycznych, różniących się zarówno okresem, jak i amplitudą fal. Jeżeli do wszystkich wymienionych czynników, wpływających na nośność tektury falistej, dodamy jeszcze możliwość budowania jej przekroju z wielu warstw pofalowanych (każda w różnej konfiguracji geometrycznej i z różnych materiałów), to ostatecznie otrzymujemy praktycznie nieograniczoną przestrzeń jej możliwych złożeń. W niniejszym artykule podjęto próbę znalezienia odpowiedzi na pytanie, czy możliwe jest wytypowanie tektury optymalnej w nieskończonym zbiorze rozwiązań w oparciu o jej właściwości mechaniczne i ograniczenia technologiczne.

Słowa kluczowe: tektura falista, wytrzymałość na zgniatanie krawędziowe, imperfekcje, sztywność zginania

Corrugated board is characterized by an excellent ratio of load capacity to its volume. This means that with a relatively low weight, this material has surprisingly high strength, which is most influenced by its multi-layer structure, in particular the use of alternating flat and corrugated layers. The geometry and structure of the corrugated board resembles an orthotropic sandwich panels, which are characterized by very high compressive strength and bending stiffness in both directions. The load-bearing capacity of the corrugated board depends to a large extent on the selection (for its individual layers) of appropriate papers, which are produced with different contents of primary cellulose fibers and recycled secondary fibers, which directly affects their mechanical properties, especially in the micro scale. The strength of the corrugated board is also influenced by the shape of the corrugated layer itself, which can assume various forms of typical periodic functions, differing in both the period and the amplitude of the waves. As we add to all the above-mentioned factors influencing the load-bearing capacity of the corrugated board, the possibility of assembling its cross-section from many corrugated layers (each in a different geometric configuration), ultimately we get a practically unlimited space of its possible assemblies. This article attempts to find an answer to the question whether it is possible to select the optimal cardboard in an infinite set of solutions based on its mechanical features and technological limitations

Keywords: corrugated board, edge crush resistance, imperfections, bending stiffness

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), ORCID: 0000-0002-9588-2514
Associate Professor **T. Garbowski** (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Poznan University of Life Sciences, Faculty of Environmental and Mechanical Engineering, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, POLAND



Wprowadzenie

Nowe trendy

Opakowania towarów handlowych, przyciągające wzrok klientów wysokiej jakości grafikami, czy bardzo nowoczesne konstrukcje pudełek z produktami, gotowe do ekspozycji na półkach sklepów, lub też typowe pudła transportowe – zaledwie w niewielkim stopniu przypominają swoje pierwowzory sprzed dziesięciu, dwudziestu lat. Również materiał stosowany do ich produkcji różni się od tego z początku XXI w. Nowe tendencje i świadomość rozwiniętych gospodarczo społeczeństw zmieniły i wciąż zmieniają przemysł opakowań z tektury falistej. Priorytetem stały się ochrona środowiska i dbanie o zasoby, podobnie jak nowe kierunki: „zero waste”, biodegradowalność czy ekoprzyjazność. Tektura falista doskonale wpisuje się we wszystkie nowoczesne trendy, które nie są już postrzegane jako przejściowa moda – są jednym z najważniejszych kierunków rozwoju, a w najbliższej przyszłości będą głównym celem. Młodzi ludzie doskonale rozumieją aktualne potrzeby, czują konieczność zmiany i jej oczekują. To właśnie oni będą wkrótce głównymi kreatorami branży opakowań z materiałów odnawialnych jako klienci i odbiorcy, a także jako przyszła kadra zarządzająca w firmach produkujących papier, tekturę falistą i opakowania.

W nowoczesnym świecie, szczególnie w zderzeniu z kreatywnymi wizjonerami, często można się natknąć na nietypowe i zadziwiające zastosowania papieru i tektury falistej. Doskonałym przykładem może być największy na świecie ekran z tektury falistej bez końca o powierzchni blisko 200 m², który powstał latem tego roku w ramach „Perspektywy – 9 Hills Festival” w Chełmnie. Autorem pomysłu był Marek Motylewski z Mondi Świecie S.A. [31]. Zbudowanie tak zaawansowanej konstrukcji z ekranem z tektury falistej wymagało zaangażowania wielu specjalistycznych firm: od konstrukcyjno-scenicznych, przez artystyczne, po wyspecjalizowane w analizach numerycznych, m.in. tektury falistej [5]. Coraz częściej można też spotkać bardzo praktyczne i użytkowe zastosowania tektury falistej, np. jako materiału do produkcji mebli, takich jak krzesła, stoły, ławki, ławy konferencyjne itp. Wiele ośrodków naukowych w Europie i na świecie współpracuje z przedsiębiorcami produkującymi takie konstrukcje i wspomaga ich w obliczeniach wytrzymałościowych produktów [38]. Zastosowanie tektury w formie plastra miodu jako wypełniacz do płyt meblowych [29], czy też konstrukcja europalety w całości wykonana z papieru i tektury [37] przestaje już zadziwiać. Superlekkie konstrukcje domów wykonane z papieru, choć wciąż bardzo futurystyczne [4], są już produkowane i sprzedawane. Oznacza to, że lada dzień konstruktorzy będą musieli bardziej świadomie projektować i używać informacji o właściwościach papieru i tektury falistej.

Warstwy i interfejsy tektury falistej – jaką rolę pełnią

Papier, jako główny składnik tektury falistej w oczywisty sposób determinuje jej właściwości mechaniczne. Z uwagi na ortotropię,

Introduction

New trends

Packaging of commercial goods, eye-catching customers with high-quality graphics, or very modern constructions of boxes with products ready for display on store shelves, or even the most ordinary transport boxes, only slightly resemble their prototypes from ten or twenty years ago. The material used for their production differs also from the one we remember from the beginning of the 21st century. New trends and awareness of economically developed societies have changed and are still changing the corrugated board packaging industry. Environmental protection and taking care of resources have become a priority, as have new directions: zero waste, biodegradability and eco-friendliness. Corrugated board fits perfectly into all modern trends, which are no longer perceived as a fad - they are one of the most important directions of development and will become the main goal in the near future. Young people perfectly understand the current needs, feel the demand for change and expect it, and they will soon be the main creators of the renewable materials packaging industry as customers and recipients, as well as future management staff in companies producing paper, corrugated board and packaging.

In the modern world, especially when confronted with creative visionaries, one can often come across unusual and amazing uses of paper or corrugated board. For example, this summer, as part of the Perspektywy – 9 Hills Festival in Chełmno, the world's largest endless corrugated board screen with an area of almost 200 m² was created. The author of the idea was Marek Motylewski from Mondi Świecie S.A. [31]. Building such an advanced structure with a corrugated board screen required the involvement of many specialized companies: from construction and stage companies, through art, to companies specialized in numerical analyzes, including corrugated board [5]. More and more often, one can also find very practical and useful applications of corrugated cardboard, e.g. as a material for the production of furniture, i.e. chairs, tables, benches, conference counters, etc.. Many research centers in Europe and around the world cooperate with entrepreneurs producing such structures and support them in the strength calculations of their products [38]. The use of cardboard or paper in the form of a honeycomb as a filler for furniture boards [29] or the construction of an euro pallet entirely made of paper and cardboard [37] slowly ceases to amaze. Super light house structures made of paper, although still very futuristic [4], are already produced and sold. This means that any day soon designers will have to design and use information about the properties of paper and corrugated board more consciously.

Corrugated board layers and interfaces – their mechanical role

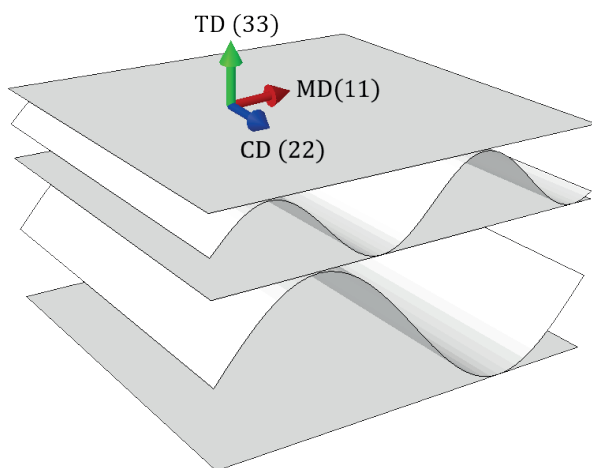
Paper, as the main component of corrugated board, clearly determines its mechanical properties. Due to the orthotropy, there are two main directions in the paper that define the stiffness and strength



w papierze można wyróżnić dwa główne kierunki, które definiują sztywność i wytrzymałość próbki, mianowicie wzdłuż włókien (*Machine Direction* – MD) oraz w poprzek włókien (*Cross Direction* – CD). Analogicznie jest w tekturze falistej (rys. 1). Charakterystyczna kierunkowość właściwości mechanicznych w papierze jest bezpośrednio związana z układaniem się włókien celulozy w procesie produkcji wstęgi. Właśnie z uwagi na ułożenie włókien sztywność papieru w kierunku MD jest ok. 2-3 razy wyższa niż w kierunku CD. Ponadto, technologia produkcji tektury sprawia, że wszystkie jej warstwy ułożone są w tym samym kierunku, co dodatkowo potęguje różnice w sztywności i wytrzymałości między oboma kierunkami. Zastosowanie jednej lub więcej warstw pofalowanych wzdłuż kierunku MD zmniejsza te dysproporcje, powodując, że ostatecznie tektura w skali makro ma podobne właściwości w obu kierunkach.

Obie warstwy, wewnętrzna oraz zewnętrzna płaska okładzina tektury falistej (*inner/outer liner*), w odróżnieniu od warstwy pofalowanej (*fluting*), pełnią bardzo ważną rolę podczas zginania próbki tektury. To właśnie sztywność tych warstw ma kluczowy wpływ na sztywność zginania całego złożenia, szczególnie w kierunku MD (rys. 1). Fluting w przypadku zginania ma za zadanie przytrzymać warstwy płaskie w zadanej odległości. Dlatego każde przegniecie tektury, które zazwyczaj koncentruje się w warstwie pofalowanej w postaci delaminacji i degradacji flutingu, wpływa na spadek jej sztywności zginania i/lub skręcania. Innymi słowy, każde skrócenie odległości między linerami (przegniecie lub zmiana na niższą falę) zmniejsza sztywność tektury falistej. Geometria fali oraz materiał wykorzystany na fluting wpływają bezpośrednio na odporność tektury na zgniatanie krawędziowe w kierunku CD, tj. na wartość parametru ECT (którego branżowa nazwa pochodzi od angielskiej nazwy testu *Edge Crush Test*).

Tektura, z uwagi na wspomnianą ortotropię oraz istotny wpływ temperatury i wilgotności na jej właściwości mechaniczne, jest



Rys. 1. Kierunki materiałowe w tekturze falistej
Fig. 1. Material directions in corrugated board

of the sample, namely along the fiber (*Machine Direction* – MD) and across the fiber (*Cross Direction* – CD). Therefore, analogously, in the corrugated board, two directions, marked with the symbols MD and CD are distinguished (Fig. 1). The characteristic directivity of the mechanical properties in paper is directly related to the casting of the cellulose fibers during the papermaking process. Precisely due to the arrangement of the fibers, the paper stiffness in the machine direction is about 2-3 times higher than in the cross direction. In addition, the cardboard production technology means that all its layers are arranged in the same direction, which further enhances the differences in stiffness and strength between both orthogonal directions. The implementation of one or more undulating layers along the MD direction reduces these disproportions, which makes that cardboard in the macroscale level have similar properties in both directions.

Both layers, the inner and outer flat liners of corrugated cardboard, unlike the fluting layer, play a very important role when bending the cardboard sample – it is the stiffness of these layers that has a key impact on the bending stiffness of the entire assembly, especially in the MD direction (Fig. 1). Fluting, in case of bending, is designated to hold the flat layers at a given distance. Therefore, each crushing of the cardboard, which is usually concentrated in the corrugated layer in the form of delamination and fluting degradation, reduces its bending and/or twisting stiffness. In other words, any shortening of the distance between the liners (crushing or changing to a lower wave) reduces the stiffness of the corrugated board. The wave geometry and the material used for fluting directly affect the strength of the cardboard against the edge crushing in CD, i.e. the value of the ECT parameter, the abbreviation of which is derived from the name of the *Edge Crush Test*.

Cardboard, due to the aforementioned orthotropy and the significant influence of temperature and humidity on its mechanical properties, is a very demanding material for strength analyzes. The constitutive description of paper and cardboard is much more complicated than the description of such materials as steel or concrete. Ten to twenty material parameters are needed to correctly describe the behavior of paper and / or board [27, 28, 39, 40, 26]. Therefore, for the full and correct characterization of corrugated board, very specialized laboratory tests are required, carried out in precisely determined climatic conditions.

Important mechanical tests of corrugated board

Edge Crush Test (ECT)

The edge crush test is the most popular laboratory test in the corrugated packaging industry. The parameter obtained in this test, commonly known as ECT, defines the compressive load capacity of the sample towards CD. This parameter has been successfully used since the 1960s to estimate the column crush resistance of typical flap packages [30]. Of course, it is the McKee formula, which is still very popular today, although its applicability is limited only to simple

bardzo wymagającym materiałem do analiz wytrzymałościowych. Opis konstytutywny papieru i tektury jest znacznie bardziej skomplikowany od opisu takich materiałów jak stal czy beton. Do poprawnego opisu zachowania papieru i/lub tektury potrzebnych jest od dziesięciu do dwudziestu parametrów materiałowych [27, 28, 39, 40, 26]. Do pełnej i poprawnej charakterystyki tektury falistej wymagane są zatem bardzo specjalistyczne badania laboratoryjne, wykonane w precyzyjnie ustalonych warunkach klimatycznych.

Najważniejsze badania mechaniczne tektury falistej

Test zgniatania krawędziowego (ECT)

Test zgniatania krawędziowego jest najpopularniejszym badaniem laboratoryjnym w branży opakowań z tektury falistej. Uzyskany w tym badaniu parametr, popularnie zwany ECT, definiuje wytrzymałość na ściskanie próbki w kierunku CD. Parametr ten, już od lat 60. ubiegłego stulecia, jest skutecznie wykorzystywany do szacowania odporności na zgniatanie kolumnowe typowych opakowań klapowych [30]. Jest to tzw. formuła McKee, która do dziś cieszy się dużą popularnością, choć jej stosowalność ograniczona jest tylko do prostych pudeł klapowych. W literaturze branżowej można znaleźć wiele prac naukowych, w których autorzy podejmują próby budowania modeli analityczno-numerycznych do estymacji opakowań z otworami [15], z perforacjami [16], czy z offsetami [32], jednakże nowoczesne metody numeryczne [21, 22, 3, 35, 36] zaczynają wypierać metody tradycyjne. Obszerne zestawienie tych metod można znaleźć w pracy przeglądowej [8]. Do opisu różnych modeli obliczeniowych, w każdym przypadku, niezbędna jest znajomość wytrzymałości materiału na ściskanie (ECT), którą można zmierzyć z wykorzystaniem różnych standardów. Odpowiedź na praktyczne pytanie – Który z tych standardów jest lepszy? – nie jest, niestety, jednoznaczna. W ostatniej pracy B. Frank wskazuje różnice jakościowe między różnymi standardami testów zgniatania krawędziowego [9].

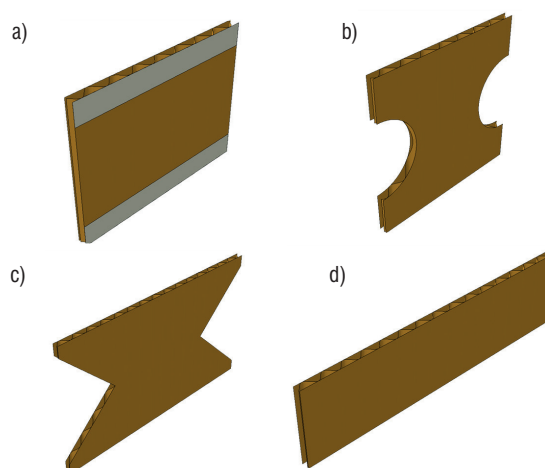
Różne normy badań ECT – ważne różnice

Normy związane z pomiarem parametru ECT różnią się od siebie nie tylko sposobem przygotowania próbek do testu, ale również wymogami związanymi z warunkami pomiaru. Na rysunku 2 zestawiono wybrane próbki według różnych standardów. Widoczna jest tu wyraźna różnica geometryczna próbek, jednakże różnią się one także sposobem przygotowania krawędzi. Według normy ISO 13821 zarówno krawędzie górne, jak i dolne próbek są woskowane, aby zabezpieczyć je przed lokalną utratą stateczności. Powoduje to jednak, że próbka musi być wyższa, co zwiększa ryzyko globalnej utraty stateczności. Normy TAPPI T 838 i KS M 7063-1 Method A sugerują aby próbka miała charakterystyczne wycięcia w środku wysokości (rys. 2b i 2c). Celem takiej konfiguracji jest oczywiście wymuszenie koncentracji naprężeń w części środkowej próbki, niestety, poprawne wycięcie

flap boxes. In the literature, one can find many scientific papers in which the authors attempt to build analytical and numerical models for the estimation of packages with holes [15] perforations [16], or offsets [32] however, modern numerical methods [21, 22, 3, 35, 36] are starting to displace traditional methods. A comprehensive summary of these methods can be found in the review [8]. To describe the different calculation models, in each case, it is necessary to know the compressive strength of the material (ECT), which can be measured according to different standards. The answer to the practical question "which of these standards is better?" is, unfortunately, ambiguous. In the most recent work, B. Frank indicates the qualitative differences between the various standards of edge crush tests [9].

Various tests standards – important differences

The standards related to the measurement of the ECT parameter differ from each other not only in terms of sample preparation for the test, but also in the requirements related to the measurement conditions. Figure 2 lists selected samples according to various standards. The figure shows a clear geometric difference between the samples, but they also differ in the way of edge preparation. According to the ISO 13821 standard, both the top and bottom edges of the samples are waxed to protect them against local loss of stability. However, this implies that the sample has to be higher, which increases the risk of global loss of stability. The TAPPI T 838 and KS M 7063-1 Method A standards suggest that the sample should have characteristic notches in the middle of the height (Fig. 2b and Fig. 2c) – the purpose of such a configuration is of course forcing the stress concentration in the middle part of the sample, unfortunately, the correct cutting of the sample is not a simple task. According to the European FEFCO 8 standard, the samples for the ECT test are relatively small, i.e. they are 25 mm high and 100 mm



Rys. 2. Próbkę do testu zgniatania krawędziowego: (a) norma ISO 13821, (b) norma TAPPI T 838, (c) norma KS M 7063-1 Method A, (d) norma FEFCO Testing Method no. 8

Fig. 2. Sample geometry for the Edge Crush Test: (a) ISO 13821, (b) TAPPI T 838, (c) KS M 7063-1 Method A, (d) FEFCO 8.



próbki nie jest zadaniem prostym. Według europejskiej normy FEFCO 8 próbki do testu ECT są stosunkowo niskie – mają wysokość 25 mm i długość 100 mm. Do ich poprawnego przygotowania potrzebna jest jednak specjalistyczna wycinarka, której zadaniem jest zapewnienie równoległości ciętych krawędzi tak, aby (podobnie jak za pomocą wosku) zminimalizować efekty krawędziowe.

Co dokładnie mierzone jest w teście zgniatania krawędzi?

Choć nazwa badania nie wskazuje tego jednoznacznie, parametr ECT specyfikuje nośność tektury falistej na ściskanie w kierunku CD. W kierunku tym ściskane są zarówno warstwy płaskie (linery), jak i pofalowane (fluting). Dlatego nośność na ściskanie całego przekroju jest ważoną sumą nośności wszystkich warstw, przy czym nośność warstwy pofalowanej jest dodatkowo zwiększana przez zastosowanie odpowiedniego współczynnika pofalowania. Dla odmiany, w kierunku MD, w którym materiał jest nawet dwukrotnie bardziej wytrzymały, ściskane są tylko warstwy płaskie (fluting nie jest tutaj aktywny). Pojawienie się w trakcie badania wszelkich efektów krawędziowych, czy też utrata stateczności poszczególnych ścianek ściskanego przekroju tektury powoduje, że suma wytrzymałości na ściskanie poszczególnych warstw jest redukowana o pewien empiryczny współczynnik, który najczęściej przyjmuje wartość 0,7. W literaturze branżowej można znaleźć prace, w których współczynnik redukujący nośność jest inny dla każdej warstwy, zarówno dla przekrojów jednościennych [13], jak i dwuściennych [14]. Tematyka ta była również dyskutowana w pracy [20], w której w badaniu ECT wykorzystywany był również pomiar przemieszczeń i odkształceń technikami wizualnymi, oraz w pracy [24], gdzie próbka ECT była dodatkowo wycinana pod różnymi kątami do kierunku fali w celu identyfikacji wszystkich parametrów sztywności tektury falistej.

Czteropunktowy test zginania (sztywność zginania)

W badaniu tym próbka jest zginana tak, aby w jej części środkowej (pomiędzy podporami wewnętrznymi) aktywny był jedynie moment zginający (rys. 3a). Pozwala to na łatwe rozdzielanie efektów zginania od efektów ścinania. Rozdzielenie sztywności zginania i ścinania nie jest możliwe w teście 3-punktowego zginania (rys. 3b). Sztywność zginania jest zależna od geometrii próbki, czyli jej długości i szerokości, geometrii podpór oraz kierunku włókien w badanej próbce – badanie to jest wykonywane w dwóch niezależnych kierunkach MD i CD. Dodatkowo, w przypadku przekrojów niesymetrycznych, badanie powtarza się w dwóch ułożeniach próbki na podporach dla każdego kierunku.

Dlaczego ważny jest pomiar sztywności zginania?

Podobnie jak parametr ECT, również sztywności zginania w kierunkach MD i CD są podstawowymi parametrami mechanicznymi tektury falistej. Dopiero pełny zestaw tych parametrów daje możliwość poprawnego wyznaczenia nośności opakowania na

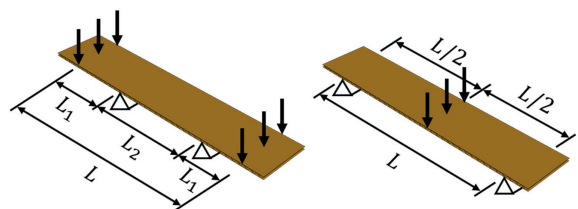
long. For their proper preparation, however, a specialized cutter is needed, the task of which is to ensure the parallelism of the cut edges so as to minimize edge effects (similarly to using wax).

What do we exactly measure in edge crush test?

Although the name of the test does not clearly indicate it, the ECT parameter specifies the compressive load capacity of the corrugated board in the direction of CD. Both flat (liners) and fluting layers are compressed in this direction. Therefore, the compressive strength of the entire cross-section is a weighted sum of the load-bearing capacities of all the layers, whereas the load-bearing capacity of the corrugated layer is further increased by applying a suitable take-up factor. In contrast, in the MD direction, where the material is even twice as strong, only flat layers are compressed (fluting is not active). The appearance of any edge effects during the test, or the loss of stability of individual walls of the compressed cardboard cross-section, causes that the sum of the compressive strengths of individual layers is reduced by a certain empirical coefficient, which most often takes the value of 0.7. In the literature, one can find articles, in which the coefficient reducing the load capacity is different for each layer, both for single-wall [hump-review-3] and double-wall [hump-review-5] sections. This subject was also discussed in the work [20], in which during the edge crush test also the full field measurements of displacements and deformations using visual techniques are used, and in the work [24], where the ECT sample was additionally cut at different angles to wave direction to identify all parameters of the stiffness of the corrugated board.

Four-point bending test (Bending Stiffness)

In this test, the sample is bent so that only the bending moment is active in its central part (between internal supports) (Fig. 3a). This allows the bending effects to be easily separated from the shear effects. Separation of bending and shear stiffness is not possible in the 3-point bending test (Fig. 3b). The bending stiffness depends on the sample geometry, i.e. its length and width, the geometry of the supports and the direction of the fibers in the tested sample – this test is performed in two independent directions MD and CD. Additionally, in the case of unsymmetrical sections, this test is repeated with two sample positions on the supports for each direction.



Rys. 3. Geometria testu sztywności zginania. (lewy) 4-punktowe zginanie, (prawy) 3-punktowe zginanie

Fig. 3. Bending stiffness tests: (left) 4-point bending, (right) 3-point bending



ściskanie. Parametr ECT decyduje o wytrzymałości na ściskanie poszczególnych ścian opakowania, natomiast sztywność zginania tektury falistej decyduje o wartości siły krytycznej ściskanych ścian opakowania. W opakowaniach krępych ważniejszą rolę pełni parametr ECT, natomiast w pudłach wysokich lub zbudowanych z przekrojów o niskiej fali to właśnie sztywność zginania jest kluczowa. Trudno zatem stwierdzić, który z tych parametrów jest ważniejszy w definicji wytrzymałości pudła – ich rola uzależniona jest bowiem od smukłości analizowanego opakowania [17].

Różnica w sztywności zginania tektury niesymetrycznej

Sztywność zginania próbki tektury falistej z niesymetrycznym złożeniem jest uzależniona nie tylko od kierunku, w którym zginana jest próbka, zależy również od sposobu ułożenia próbki w urządzeniu laboratoryjnym. Jeżeli próbka tektury ma pięć warstw i składa się z dwóch warstw pofalowanych, z których jedna jest wyraźnie niższa od drugiej, to sztywność zginania będzie niższa, gdy próbka będzie umieszczona na podporach niższą falą do góry. Jeżeli próbka zostanie ułożona niższą falą do dołu, to ściskane będą dwie warstwy płaskie tektury, w związku z czym jest mniejsze prawdopodobieństwo wyoboczenia tych warstw. Szczegóły tych obserwacji można znaleźć w pracach [2, 23].

Co jeszcze wpływa na jakość tektury falistej?

Istotność niedoskonałości

Niezależnie jaki standard zostanie ostatecznie wybrany do badania ECT, czy też jaka geometria próbki dobrana w teście 4-punktowego zginania – w każdym przypadku wpływ niedoskonałości materiału (wstępnych krzywizn, delaminacji, uszkodzeń) w poszczególnych warstwach tektury falistej będzie znaczący na mierzone parametry. Wynika to z faktu, że warstwy tektury tworzy materiał o bardzo małej grubości (papier), który jest bardzo podatny na wszelkie niedoskonałości (geometryczne i materiałowe). Wstępne imperfekcje dowolnej warstwy powodują, że ściskana tektura falista ulega wyoboczeniu, a przez to traci swoją wytrzymałość. Podobnie kształtuje się spadek sztywności zginania w funkcji niedoskonałości warstw płaskich. Wpływ imperfekcji na parametr ECT w tekturze trój- i pięciowarstwowej był analizowany w pracy [12].

Źródła i skutki przegniatania tektury

Problem przegniatania tektury falistej był rozważany w wielu pracach, zarówno w prasie branżowej, jak i w naukowych opracowaniach. Dowiedziono, że główną przyczyną zgnięcia przekroju tektury są wszelkie procesy przetwórcze. Wpływ przegniecenia wskutek docisku na wałach przetwórczych został szczegółowo opisany, m.in. w pracach [19, 10]. W publikacji [1] analizowany był wpływ nadruku fleksograficznego w konfrontacji z cyfrowym, natomiast w pracy [18] przestudiowano wpływ procesów wycinania, zarówno technikami analogowymi, jak i cyfrowymi za pomocą lasera. Wpływ bigowania

Why it is important to measure bending stiffness?

Similarly the ECT parameter, also the bending stiffness in MD and CD are the basic mechanical parameters of the corrugated board. Only the full set of these parameters makes it possible to correctly determine the compressive load capacity of the packaging. The ECT parameter determines the compressive strength of the individual walls of the packaging, while the bending stiffness of the corrugated board determines the value of the critical force of the compressed walls of the packaging. In stocky packaging, the ECT parameter plays a more important role, while in high boxes or boxes made of low-wave sections, it is the bending stiffness that is crucial. Therefore, it is difficult to say which of these parameters is more important in the definition of box strength - their role depends on the slenderness of the analyzed packaging [17].

Difference in bending stiffness of nonsymmetric cardboard

The bending stiffness of a corrugated board sample with unsymmetrical cross-section depends not only on the direction in which the sample is bent, but also on the way the sample is arranged in the laboratory device. If the cardboard sample has five layers and consists of two corrugated layers, one of which is clearly lower than the other, the bending stiffness will be lower when the sample is placed on supports with the lower wave up. If the sample is laid with the lower wave down, the two flat layers of cardboard will be compressed, and therefore these layers are less likely to buckle. Details of these observations can be found in [2, 23].

What else affects the performance of the corrugated board?

Importance of imperfections

Regardless of which standard for the edge crush test will be finally chosen, or what geometry of the sample will be selected in the 4-point bending test – in each case, the influence of material imperfections (initial curvatures, delamination, damage) in the individual layers of the corrugated board will have a significant impact on the measured parameters. This is due to the fact that the cardboard layers are made of a very thin material (i.e. paper), which is very susceptible to any imperfections (geometric and material). Initial imperfections of any layer cause the compressed corrugated board to buckle and thus to lose its strength. The decrease in bending stiffness as a function of imperfection of flat layers is similar. The effect of imperfection on the ECT parameter in the three- and five-layer cardboard was analyzed in [12].

Sources and causes of cardboard crushing

The problem of creasing of the corrugated board has been considered in many studies, both in the trade press and in scientific studies. It has been proved that all processing operations are the main cause of crushing the cardboard's cross-section. The impact of crushing due to pressure on processing rollers has been described in detail,



i nacinania tektury falistej na spadki jej sztywności przedstawiono w pracy [25]. Z przywołanych opracowań jednoznacznie wynika, że zastosowanie cyfrowych procesów przetwórczych zdecydowanie zmniejsza lub wręcz całkowicie eliminuje przegniecenie tektury falistej.

Optymalna tektura falista – czy można taką zaprojektować?

Projektowanie nowych złożeń (kompozycji) tektury falistej nie jest zagadnieniem łatwym. Często pojawia się pytanie, czy opłacalne jest przebrojenie tekturnicy, aby wyprodukować krótką serię lepiej dobranego materiału. Nawet jeżeli nowy indeks tektury trafia na dłuższe serie, wciąż nie jest znany a-priori wpływ maszyn przetwórczych na nadrukowywane czy wycinane arkusze tektury. Jeżeli wpływ nadruku, sztancowania czy laminowania powoduje degradację tektury, nawet tylko o 10-15% (w kontekście jej sztywności czy nośności), to docelowy produkt (pudło) może już nie spełniać zakładanych wymagań. W związku z tym, optymalne projektowanie tektury bez zaangażowania zaawansowanych narzędzi nie jest, niestety, realne.

Zadanie stworzenia optymalnej tektury dla danego projektu opakowania jest jednak wykonalne – warunkiem osiągnięcia sukcesu jest modelowanie numeryczne, które pozwala nie tylko na dobranie odpowiednich papierów na poszczególne warstwy tektury falistej, ale też uwzględnienie przegniecenia, czy wspomnianych imperfekcji. Można z łatwością zmierzyć wpływ każdej maszyny przetwórczej na przegniecenie tektury [7], jak również dokładnie zbadać wszystkie istotne mechaniczne parametry tektury falistej [6], także w nienormalnych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych. Pozostaje jedynie porównanie modeli numerycznych uwzględniających wpływ imperfekcji i przewidywanych przegnieceń oraz warunków transportowych, czy magazynowania z wynikami fizycznych badań. Po skalibrowaniu modele takie będą wiernie odzwierciedlać zachowanie tektury, a co za tym idzie, również opakowań.

Naukowcy nieustannie rozwijają nowe modele i udoskonalają istniejące narzędzia [33, 34]. Niemalże każdego dnia pojawiają się nowe opracowania naukowe dotyczące tektury falistej [11]. Projektowanie optymalnej tektury falistej, uwzględniającej warunki przetwórcze w danym zakładzie produkcyjnym, dostosowanej do specyfiki opakowania i do warunków, w których opakowanie to będzie transportowane czy przechowywane jest więc na wyciągnięcie ręki pracowników działów jakości i R&D producentów tektury i opakowań. Bez wątpliwości, tworzenie optymalnej tektury jest bardzo nieodległą przyszłością, w której ilość odpadów i reklamacji drastycznie się zmniejszy. Oszczędności, które można uzyskać z takiego podejścia pozwolą na większe inwestycje w ochronę naszego wspólnego środowiska. Na pytanie – kiedy możemy się tego spodziewać?, można odpowiedzieć jednoznacznie – szybciej niż przypuszczamy.

Artykuł recenzowany

i.a. in the papers [19, 10]. In the publication [1] the influence of flexo printing in confrontation with digital printing was analyzed, while in the article [18] the influence of cutting processes, both with analog and digital laser techniques was studied. The effect of creasing and die-cutting of corrugated board on the decrease in its stiffness is presented in [25]. The above studies clearly show that the use of digital processing techniques significantly reduce or even completely eliminate crushing of the corrugated cardboard.

Optimal corrugated board – can we really design one?

The design of new, dedicated corrugated board assemblies is not an easy issue. The question often arises as to whether it is profitable to change the corrugator inn order to produce a short batch of better designed material. Even if the new board index is used in longer series, the a-priori effect of processing machines on printed or cut cardboard sheets is still unknown. If the impact of printing, die-cutting or lamination causes cardboard degradation, even by only ten or fifteen percent (in terms of its stiffness or load capacity), then the final product, such as the box, may no longer meet the assumed requirements. Therefore, optimal cardboard design without the use of advanced tools is unfortunately unrealistic.

However, the task of creating the optimal cardboard for a given packaging design is feasible – the prerequisite for success is numerical modeling, which allows not only to select the appropriate papers for individual layers of corrugated board, but also to take into account crush or the aforementioned imperfections. The impact of each converting machine on cardboard degradation [7] can be easily measured, as well as all relevant mechanical parameters of corrugated board [6] can be carefully examined, also under abnormal temperature and humidity conditions. The only thing left is to compare the numerical models taking into account the influence of imperfections and predicted crush as well as transport or storage conditions with the results of physical tests. After calibration, such models will accurately reflect the behavior of the cardboard, and thus also the behavior of the packaging.

Scientists are constantly developing new models and improving existing tools [33, 34]. New scientific studies on corrugated board [11] appear almost every day. Designing the optimal corrugated board, while taking into account the processing conditions in a given production plant, dedicated to the specific of the packaging and to the conditions in which the packaging will be transported or stored, is therefore at the fingertips of the employees of the quality and R&D departments of cardboard and packaging manufacturers. Undoubtedly, creating an optimal cardboard is a very near future in which the amount of waste and complaints will drastically reduce. The savings that can be made from this approach will allow greater investment in protecting our common environment. The question "when can we expect it" can be answered unequivocally – it will happen sooner than we think.



LITERATURA/LITERATURE

- [1] Andrzejak K., Garbowski T. 2021. "The influence of analog and digital printing on the strength parameters of corrugated board". („Wpływ nadruku techniką analogową i cyfrową na parametry wytrzymałościowe tektury falistej”). *Przegląd Papierniczy* 77 (11) : 593-599. <https://doi.org/10.15199/54.2021.11.2>
- [2] Czechowski L., Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Gralewski J., Bieńkowska M. 201. „Numerical and experimental study of five-layer non-symmetrical paperboard panel stiffness”. *Materials* 14, 7453.
- [3] 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.
- [4] <https://www.fastcompany.com/3059745/has-cardboard-architectures-moment-finally-arrived>
- [5] http://fematsystems.pl/home_en/
- [6] <http://fematsystems.pl/bse-system/>
- [7] <http://fematsystems.pl/sst/>
- [8] Frank B. 2014. "Corrugated box compression – A literature survey". *Packaging Technology and Science* 27, 105-128.
- [9] Frank B., Cash D. 2022. "Edge crush testing methods and box compression modeling". *Tappi Journal* 21 (8) : 418-433.
- [10] 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>
- [11] Garbowski T. 2022. "Mechanics of Corrugated and Composite Materials". *Materials* 15, 1837. <https://doi.org/10.3390/ma15051837>
- [12] Garbowski T. 2022. "Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board" („Wpływ wstępnych imperfekcji na odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe”). *Przegląd Papierniczy* 78 (6) : 337-341. <https://doi.org/10.15199/54.2022.6.1>
- [13] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board" („Związek między SCT papieru a ECT jednościennej tektury falistej”). *Przegląd Papierniczy* 78 (4) : 210-216. <https://doi.org/10.15199/54.2022.4.1>
- [14] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "From paper to corrugated board – modeling the edge crush test" („Od papieru do tektury – modelowanie testu zgniatania krawędziowego”), *Przegląd Papierniczy* 78 (5) : 271-277. <https://doi.org/10.15199/54.2022.5.1>
- [15] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. "Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes with Various Openings". *Energies* 14, 155. <https://doi.org/10.3390/en14010155>
- [16] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. "Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes with Various Perforations". *Energies* 14, 1095. <https://doi.org/10.3390/en14041095>
- [17] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2020. "The Role of Buckling in the Estimation of Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes". *Materials* 13, 4578. <https://doi.org/10.3390/ma13204578>
- [18] Garbowski T., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A. 2022. "Influence of Analog and Digital Crease Lines on Mechanical Parameters of Corrugated Board and Packaging". *Sensors* 22, 4800. <https://doi.org/10.3390/s22134800>
- [19] 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>
- [20] Garbowski T., Grabski J.K., Marek A. 2021. "Full-Field Measurements in the Edge Crush Test of a Corrugated Board – Analytical and Numerical Predictive Models". *Materials* 14, 2840. <https://doi.org/10.3390/ma14112840>
- [21] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 1. Theoretical Assumptions in Numerical Modeling of Paperboard Packages" („Numeryczne wyznaczanie wytrzymałości opakowań z tektury falistej. Cz. 1. Założenia teoretyczne w modelowaniu numerycznym opakowań papierowych”). *Przegląd Papierniczy* 70 (4) : 219-222.
- [22] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 2. Experimental tests and numerical analysis of paperboard packages" („Numeryczne wyznaczanie wytrzymałości opakowań z tektury falistej. Cz. 2. Badania eksperymentalne i analizy numeryczne opakowań papierowych”). *Przegląd Papierniczy* 70 (5) : 277-281.
- [23] 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>
- [24] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Marek A. 2021. "New Edge Crush Test Configuration Enhanced with Full-Field Strain Measurements". *Materials* 14, 5768. <https://doi.org/10.3390/ma14195768>
- [25] 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>
- [26] Harrysson A., Ristinmaa M. 2008. "Large strain elasto-plastic model of paper and corrugated board". *International Journal of Solids and Structures* 45, 3334-3352.
- [27] Hill R. 1948. "A theory of the yielding and plastic flow in anisotropic metals". *Proc. Royal Soc.* 193, 281-297.
- [28] Hoffman O. 1967. "The brittle strength of orthotropic materials". *Journal of Composite Materials* (1) : 200-206.
- [29] <https://www.ikea.com/es/en/p/lack-coffee-table-black-brown-00104291/>
- [30] McKee R.C., Gander J.W., Wachuta J.R. 1963. "Compression strength formula for corrugated boxes". *Paperboard Packaging* 48, 149-159.
- [31] <https://www.mondigroup.com/en/about-mondi/where-we-operate/europe/poland/mondi-%C5%9Bwiecie-sa/>
- [32] Mrówczyński D., Garbowski T., Knitter-Piątkowska A. 2021. "Estimation of the Compressive Strength of Corrugated Board Boxes with Shifted Creases on the Flaps". *Materials* 14, 5181. <https://doi.org/10.3390/ma14185181>
- [33] 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>
- [34] 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>
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] <https://www.seppa.pl/oferta.html#palety>
- [38] 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.
- [39] Tsai S.W., Wu E.M. 1971. "A general theory of strength for anisotropic materials". *Journal of Composite Materials* (5) : 58-80.
- [40] 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.