

Związek między SCT papieru a ECT jednościennej tektury falistej

Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI, KACPER ANDRZEJAK

DOI: 10.15199/54.2022.4.1

Tektura falista jest materiałem złożonym z kilku naprzemiennie płaskich i falistych warstw papieru. Gramatura poszczególnych warstw jest zazwyczaj dobierana w przedziale 80-180 g/m². Zarówno gramatura, jak i stosunek włókien pierwotnych do makulaturowych wybranego papieru zależy od jego przeznaczenia w produkcji tektury falistej. W przypadku warstw płaskich najczęściej stosuje się papiery zawierające pewną ilość włókien pierwotnych, natomiast w przypadku warstw falistych stosuje się głównie lżejsze papiery makulaturowe. Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy jest znalezienie zależności między wytrzymałością na ściskanie poszczególnych papierów a wytrzymałością na zgniatanie krawędziowe tektury wytworzonej z tych papierów. Odporność tektury falistej na ściskanie jest bezpośrednio związana z rodzajem i gramaturą użytych papierów składowych i zależy od kąta, pod jakim jest obciążona. Niestety, proste wzory inżynierskie często zawodzą. Dzięki uwzględnieniu geometrycznych imperfekcji płaskich i po-falowanych warstw, które prowadzą do redukcji wytrzymałości na ściskanie poszczególnych warstw, możliwe jest lepsze opisanie tej zależności. W niniejszej pracy zaproponowano więc model ECT tektury falistej, który uwzględni imperfekcje i jednocześnie jest prosty w kalibracji. Uzyskane wyniki dowodzą, że prezentowany model charakteryzuje się również wysoką precyzją predykcji wartości ECT na podstawie SCT papierów składowych i geometrii złożenia.

Słowa kluczowe: tektura falista, wytrzymałość na ściskanie papieru, wytrzymałość na zgniatanie krawędziowe tektury

Corrugated board is a material composed of several alternating flat and corrugated layers of paper. The basis weight of the individual layers is usually selected in the range of 80-180 g/m². Both the basis weight and the ratio of virgin to recycle fibers of the selected paper depend on its intended use in the production of corrugated board. For flat layers, papers containing some

virgin fibers are most often used, while for corrugated layers, mainly lighter recycled papers are used. The aim of the research presented in this paper is to find the relationship between the compressive strength of individual papers and the edge crush strength of cardboard made of these papers. The compressive strength of the corrugated board is directly related to the type and grammage of the component papers used and depends on the angle at which it is loaded. Unfortunately, simple engineering formulas often fail. By taking into account the geometric imperfections of flat and undulating layers, which lead to a reduction in the compressive strength of individual layers, it is possible to better describe this relationship. Therefore, in this work, the ECT model of the corrugated board is proposed, which takes into account imperfections and at the same time is easy to calibrate. The obtained results prove that the presented model is also characterized by high precision of ECT value prediction based on the SCT of the component papers and the geometry of the assembly.

Keywords: corrugated board, compressive strength of paper, edge crush resistance of corrugated board

Wprowadzenie

Pudła z tektury falistej chronią ich zawartość w całym łańcuchu dystrybucji i są obecnie wykorzystywane do pakowania zdecydowanej większości towarów sprzedawanych i transportowanych w celach handlowych. Na pudło transportowe wpływają warunki atmosferyczne, w jakich jest transportowane, sam sposób transportu oraz warunki i sposób magazynowania. Wytrzymałość pudła na ściskanie (zwykle mierzona przez BCT – Box Compression Test [17]) jest kluczowym miernikiem odporności

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;

inż. **K. Andrzejak** (kacper.andrzejak@wernerkenkel.com.pl), Werner Kenkel Spółka z o.o., ul. Mórkowska 3, 64-117 Krzycko Wielkie

opakowania na oddziaływania mechaniczne w trakcie transportu i przechowywania.

Od czasu wynalezienia tektury falistej i pierwszego wykorzystania jej do produkcji opakowania, inżynierowie i naukowcy na całym świecie szukali odpowiednich formuł do wiarygodnego i łatwego szacowania nośności opakowania w celu optymalizacji zużycia surowca i jednocześnie odpowiedniej ochrony produktów w nim transportowanych. Najprostsze formuły nie pozwalają na wiarygodne szacowanie każdego rodzaju opakowania. Z drugiej strony, metody bardziej zaawansowane wymagają specyficznej wiedzy konstruktora i często także zastosowania zaawansowanych narzędzi numerycznych. Do najprostszych i najczęściej stosowanych metod należy formuła McKee [15], która opiera się na najpopularniejszych parametrach tektury falistej, tj. odporności na zgniatanie kolumnowe (ECT – *Edge Crush Test* [18]) oraz grubości tektury lub sztywności zginania, a także na wymiarach pudła w podstawie. W literaturze można też znaleźć wiele modyfikacji/adaptacji, których celem było zwiększenie skuteczności tych formuł [2-3] oraz ich dostosowania do przypadków opakowań innych niż popularne klapówki [4-5, 16].

Z uwagi na to, że w obecnych czasach coraz większy nacisk kładzie się na ekologię i optymalizację wykorzystania zasobów (tzw. *zero waste*, *fit-to-product*, *box-on-demand* itp.), poprawne modelowanie opakowań jest coraz bardziej istotne. Nowe techniki numeryczne [1, 6, 7] pozwalają na dokładniejsze oszacowanie nośności skomplikowanych konstrukcji opakowań. Modele te są oparte na badaniach laboratoryjnych, z których pozyskiwane są parametry materiałowe tektury falistej. Dlatego ich poprawne określenie staje się priorytetem. W celu kompleksowego pozyskania wszystkich niezbędnych parametrów materiałowych można wykorzystać kombajny laboratoryjne (np. polskiej firmy z Poznania [21]). Jednakże takie podejście oparte jest na badaniach tektury falistej, co wiąże się z ograniczeniem jedynie do asortymentu tektur już wyprodukowanych. Potrzeba optymalizacji samej tektury falistej, napędzana głównie przez dynamicznie rozwijającą się branżę e-commerce, powoduje, że producenci prześcigają się w optymalizacji swoich produktów przez zmiany kompozycji (składów) produkowanych tektur.

Modelowanie od papieru do opakowania wymaga od konstruktora znajomości parametrów materiałowych papierów składowych w kompozycji tektur falistej. Parametry te pozyskuje się najczęściej za pomocą testów odporności na zgniatanie przy krótkim wpięciu (SCT – *Short-span Compression Test* [19]), a także za pomocą testów rozciągania próbek tektury [20]. Testy te służą do określenia wytrzymałości na ściskanie i rozciągania oraz modułów sztywności w różnych kierunkach względem kierunku ułożenia włókien, np. MD (*Machine Direction*) lub CD (*Cross Direction*), ale też w dowolnie wybranym kierunku obróconym względem MD o dowolny kąt. Poprawne określenie parametrów mechanicznych tektury falistej oraz znajomość geometrii warstw pofalowanych

pozwała zbudować model tektury falistej. Najprostsze modele do estymacji ECT oparte są na empirycznych zależnościach, w których sumowane są nośności wszystkich papierów, z uwzględnieniem współczynnika rozwinięcia warstw pofalowanych (tzw. *take-up factor*). Suma tych nośności jest następnie skalowana za pomocą współczynnika dopasowania, którego wartość zazwyczaj przyjmuje się 0,7-0,8. W literaturze można też znaleźć modele ECT oparte na analitycznych [8] lub analityczno-numerycznych formułach [9, 10]. Nieco bardziej zaawansowane metody służące do wiarygodnego tworzenia modelu tektury falistej oparte są na homogenizacji numerycznej [11-14].

W niniejszej pracy uwagę skupiono na empirycznym modelu ECT opartym na parametrach SCT papierów składowych różnych kompozycji trzywarstwowej tektury falistej. W tym celu wykonano badania SCT papierów składowych w głównych kierunkach ortotropii materiału, tj. w kierunku MD, CD oraz w kierunku obróconym o 45° względem MD. Następnie wykonano serię badań ECT tektur zbudowanych na tych papierach, obciążonej pod różnym kątem względem kierunku fali. Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do zbudowania łatwego w kalibracji i wiarygodnego modelu ECT tektury falistej.

Metody i materiały

Tektura falista

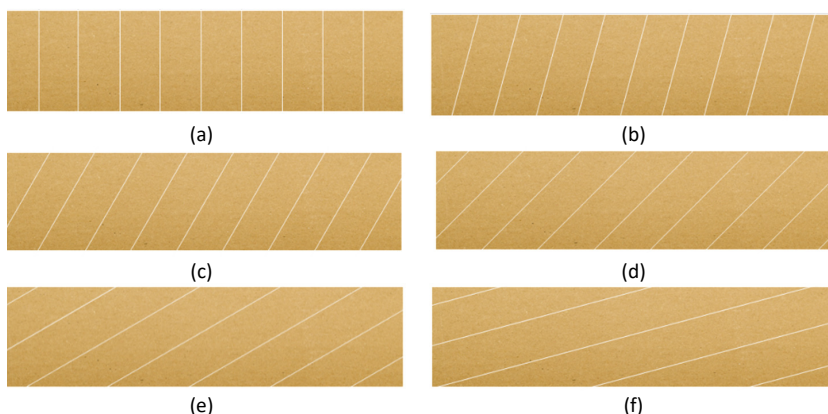
Do badań wyselekcjonowano trzy popularne kompozycje tektury falistej, których parametry zestawiono w tabelach 1 i 2. W celu zbudowania poprawnego modelu ECT tektury falistej niezbędne było wykonanie serii badań laboratoryjnych wszystkich papierów składowych i pozyskanie niezbędnych parametrów materiałowych.

Tabela 1. Papiery składowe i geometria badanych tektur falistych

Fala	Gramatura (g/m ²)	Papiery składowe	Wys. fali (mm)	Okres fali (mm)	Współ. rozwinięcia
B	410	TL3 125 / WS 120 / TL3 125	2,55	6,34	1,337
C	590	KLB 170 / S.C. 175 / KLB 170	3,63	7,95	1,427
E	480	TLWC 160 / WS 135 / TLW 160	1,16	3,50	1,236

Celem autorów było stworzenie modelu ECT w zależności od kompozycji oraz kierunku obciążenia próbki, dlatego w niniejszej pracy poddano analizie tekturę falistą obciążoną pod różnymi kątami względem kierunku fali. Na rysunku 1 zaprezentowano próbki tektury wycięte w taki sposób, aby obciążenie działało na próbkę pod różnym kątem.

W tabeli 2 zestawiono wartości gramatury badanych tektur oraz zmierzone grubości. Przyjęto oznaczenie próbek za pomocą indeksu, który składa się z oznaczenia fali oraz gramatury poszczególnych próbek tektury falistej.



Rys. 1. Próbkę ECT wycięte pod różnym kątem: (a) CD, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75°
(Źródło: opracowanie własne)

Empiryczny model ECT

W definicji najprostszego modelu ECT tektury falistej wykorzystuje się SCT papierów składowych oraz współczynnik rozwinięcia warstw pofalowanych. Model można zapisać następująco:

$$ECT_{\alpha} = A_{\alpha} \sum_{i=1}^3 SCT_i \cdot \alpha_i, \quad (1)$$

W modelu tym sumuje się wartości SCT poszczególnych warstw, przemnożone przez współczynnik rozwinięcia, który dla warstw płaskich wynosi 1. Ponieważ w analizowanym modelu ECT uwzględnia się również kierunek obciążenia próbki, dlatego wpro-

Tabela 2. Gramatura i oznaczenie badanych tektur

Fala	Gramatura (g/m ²)	ID	Grubość (mm)
B	410	B-410	2,912
C	590	C-590	4,110
E	480	E-480	1,586

Badania ECT wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 3037:2013-12 [18] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności.

Papiery składowe

W celu poprawnego zbudowania modelu ECT tektury falistej konieczne było określenie wszystkich niezbędnych parametrów mechanicznych papierów składowych, które zestawiono w tabeli 3. Próbkę papieru badane były w dwóch głównych kierunkach ortotropii (MD i CD) oraz pod kątem 45° względem kierunku MD.

Jedynym parametrem papieru niezbędnym do zbudowania prostego modelu ECT jest SCT. Badania SCT wykonano zgodnie z normą PN-ISO 9895:2002 [19] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności (rys. 2).

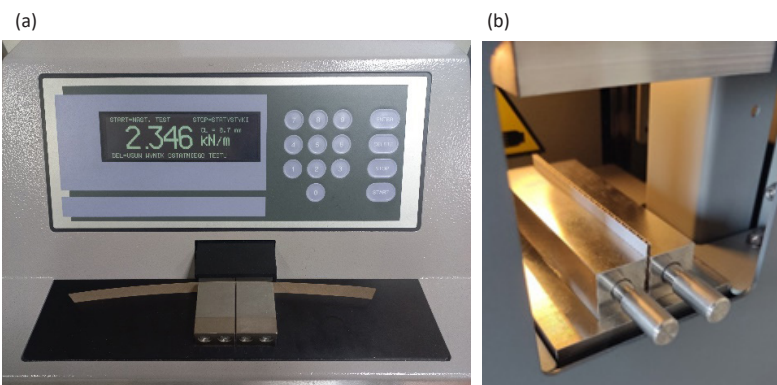
Tabela 3. Oznaczenie papierów składowych badanych tektur falistych

Tektura ID	Rodzaj papieru	Gramatura (g/m ²)	Opis papieru
B-410	TL3	125	Liner zewnętrzny
	WS	120	Fluting
	TL3	125	Liner wewnętrzny
C-590	KLB	170	Liner zewnętrzny
	SC	175	Fluting
	KLB	170	Liner wewnętrzny
E-480	TLWC	160	Liner zewnętrzny
	WS	135	Fluting
	TLW	160	Liner wewnętrzny

wadzony indeks dolny informuje o kącie, pod jakim obciążona jest próbka. Współczynnik dopasowania A_{α} jest jedynym parametrem, który służy do korelacji między wynikiem uzyskanym za pomocą modelu a rzeczywistym wynikiem z testu laboratoryjnego.

Wartość SCT w kierunku obciążenia uzyskuje się za pomocą prostych przekształceń opartych na podstawach wytrzymałości materiałów. Zależność tę można zapisać następującym wzorem:

$$SCT_{\alpha} = \frac{SCT_{MD} + SCT_{CD}}{2} + \frac{SCT_{MD} - SCT_{CD}}{2} \cos(2\alpha) \quad (2)$$



Rys. 2. Badanie SCT i ECT
(Źródło: opracowanie własne)

Model analityczno-empiryczny

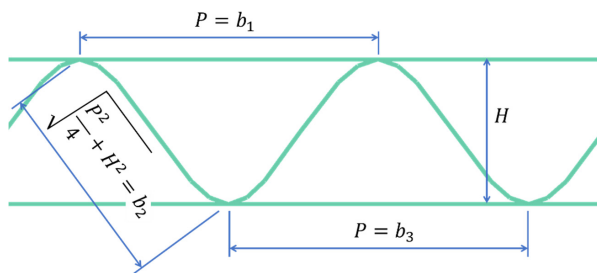
W celu lepszego odwzorowania rzeczywistego zachowania próbki tektury, gdzie często występują imperfekcje, można zastosować model analityczno-empiryczny. Nie wymaga on korelacji parametru empirycznego A_{α} , który pojawia się w równaniu (1). Model taki można zapisać, na przykład, w następującej formie:

$$ECT_{\alpha} = b_{\alpha} \sum_{i=1}^3 SCT_{\alpha,i} \cdot \alpha_i \cdot \gamma_i \quad (3)$$

gdzie parametr b_{α} określa wpływ kierunku obciążenia w zależności od rodzaju i typu tektury falistej, a parametr γ_i jest współczynnikiem zmniejszającym nośność statyczną na ściskanie poszczególnych warstw. Współczynnik ten uwzględnia wyboczenie warstw i zależy od geometrii fali oraz gramatury danego papieru składowego. Bardziej poprawnym byłoby uzależnienie tego parametru od grubości papieru, ale parametr ten rzadko jest wyznaczany w laboratorium i nie pojawia się też w specyfikacjach papierów dostarczanych przez papiernie. Formuła opisująca parametr γ_i można zapisać:

$$\gamma_i = SCT_{\alpha,i}^{-1/2} \left(\frac{H g_i}{a b_i} \right)^{1/2} \leq 1 \quad (4)$$

gdzie α jest parametrem, który należy dobrać raz na zawsze na podstawie obserwacji eksperymentalnych, H jest wysokością przekroju, g_i jest gramaturą danej warstwy, b_i jest szerokością poszczególnych segmentów w przekroju tektury falistej (szczegóły na rysunku 3).



Rys. 3. Przekrój trzywarstwowej tektury falistej (Źródło: opracowanie własne)

Wyniki

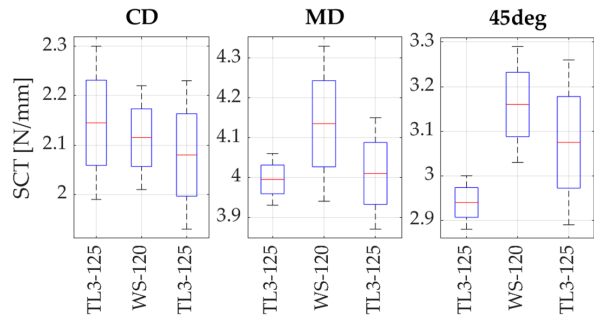
Badania laboratoryjne

W tabeli 4 zestawiono wyniki testów SCT, uzyskanych dla wszystkich papierów składowych trzech wybranych tektur falistych: B-410, C-590 i E-480. Każdy papier był zbadany w 3-4 testach, a w sytuacji gdy wyniki miały duży rozrzut, wykonywano dodatkowe testy. W tabeli 4 zestawiono wartości średnie oraz odchylenie standardowe każdego badania.

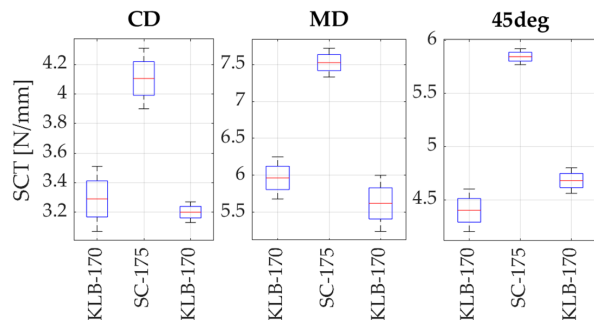
Tabela 4. Wartości średni SCT wraz z odchyleniem standardowym

Tektura ID	Papier ID	SCT-CD (N/mm)	SCT-45 (N/mm)	SCT-MD (N/mm)
B-410	TL3-125	2,14±0,12	2,92±0,05	3,97±0,05
	WS-120	2,09±0,07	3,14±0,08	4,09±0,15
	TL3-125	2,09±0,11	3,11±0,14	4,05±0,11
C-590	KLB-170	3,28±0,18	4,43±0,19	5,96±0,23
	SC-175	4,18±0,19	5,84±0,07	7,47±0,18
	KLB-170	3,19±0,06	4,65±0,13	5,51±0,28
E-480	TLWC-160	2,75±0,20	3,49±0,13	4,20±0,15
	WS-135	2,13±0,10	2,95±0,07	4,25±0,15
	TLW-160	2,43±0,11	3,21±0,11	4,09±0,13

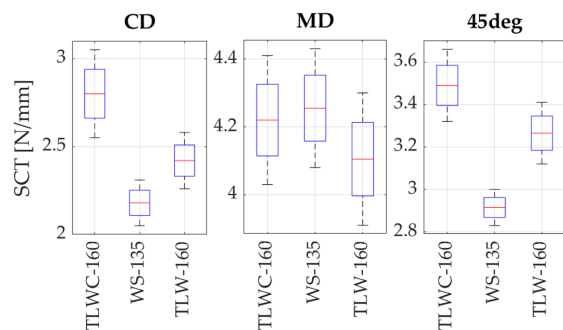
W celu lepszego zobrazowania uzyskanych wyników, na rysunkach 4-6 pokazano statystyczne rozkłady wyników badań SCT w trzech wybranych kierunkach (MD, CD i 45°) zestawione dla wszystkich papierów.



Rys. 4. Wyniki SCT próbki B-410 (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 5. Wyniki SCT próbki C-590 (Źródło: opracowanie własne)



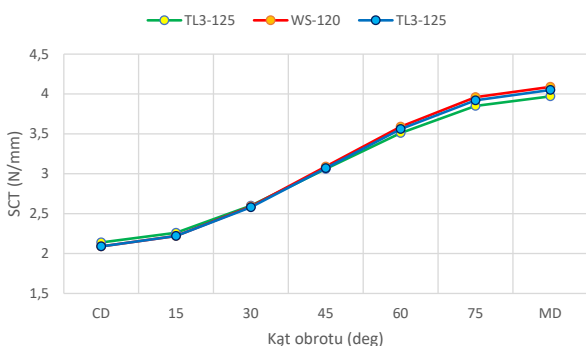
Rys. 6. Wyniki SCT próbki E-480 (Źródło: opracowanie własne)

W tabeli 5 zestawiono wartości SCT obliczone za pomocą równania (2). Kolorem zaznaczono kolumnę, w której zawarto wartości wyznaczone za pomocą testów laboratoryjnych. W kolumnie SCT-45 zestawiono też wartości obliczone za pomocą równania (2) – wartości te różnią się maksymalnie o 7%, a średnia różnica wyniosła zaledwie 3%, co dowodzi poprawności przyjętych założeń.

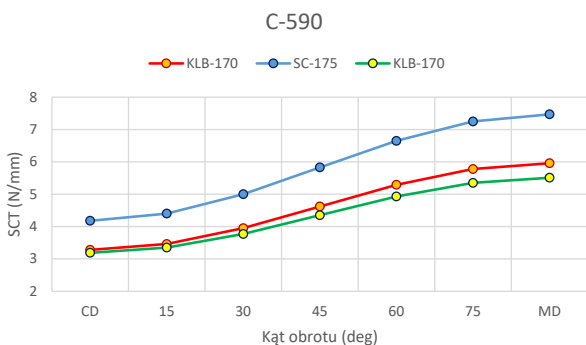
Na rysunkach 7-9 przedstawiono wartości średni SCT, uzyskane dla wszystkich warstw wybranych tektur falistych.

Tabela 5. Wartości SCT obliczone wg równania (2)

Tektura ID	Papier ID	SCT-CD (N/mm)	SCT-15 (N/mm)	SCT-30 (N/mm)	SCT-45 (N/mm)		SCT-60 (N/mm)	SCT-75 (N/mm)
B-410	TL3-125	2,14	2,26	2,60	2,92	3,06	3,51	3,85
	WS-120	2,09	2,22	2,59	3,14	3,09	3,59	3,96
	TL3-125	2,09	2,22	2,58	3,11	3,07	3,56	3,92
C-590	KLB-170	3,28	3,46	3,95	4,43	4,62	5,29	5,78
	SC-175	4,18	4,40	5,00	5,84	5,83	6,65	7,25
	KLB-170	3,19	3,35	3,77	4,65	4,35	4,93	5,35
E-480	TLWC-160	2,75	2,85	3,11	3,49	3,48	3,84	4,10
	WS-135	2,13	2,27	2,66	2,95	3,19	3,72	4,11
	TLW-160	2,43	2,54	2,85	3,21	3,26	3,68	3,98



Rys. 7. Wartości średni SCT dla próbki B-410 (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 8. Wartości średni SCT próbki C-590 (Źródło: opracowanie własne)



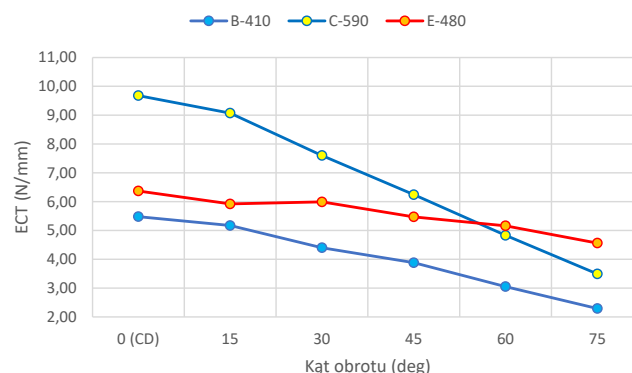
Rys. 9. Wartości średni SCT próbki E-480 (Źródło: opracowanie własne)

W tabeli 6 zestawiono wszystkie wyniki badań ECT dla 3 wybranych tektur. Oprócz wartości średnich ECT, pokazano też odchylenie standardowe. W celu uzyskania poprawnych statystycznie wyników test każdej z tektur był wykonany dla 5-6 próbek.

Tabela 6. Wartości ECT wybranych tektur

Tektura ID	ECT-CD (N/mm)	ECT-15 (N/mm)	ECT-30 (N/mm)	ECT-45 (N/mm)	ECT-60 (N/mm)	ECT-75 (N/mm)
B-410	5,48 ±0,09	5,17 ±0,12	4,40 ±0,03	3,88 ±0,10	3,05 ±0,10	2,29 ±0,13
C-590	9,68 ±0,10	9,07 ±0,14	7,60 ±0,02	6,24 ±0,12	4,83 ±0,10	3,49 ±0,23
E-480	6,37 ±0,17	5,92 ±0,08	5,99 ±0,26	5,47 ±0,27	5,16 ±0,17	4,56 ±0,18

Na rysunku 10 pokazano wartości średnie ECT dla wszystkich próbek tektury falistej, natomiast na rysunku 11 – statystyczne rozkłady wyników ECT.

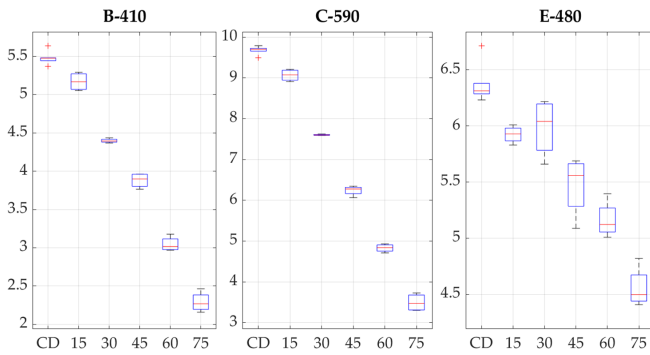


Rys. 10. Wyniki ECT dla wszystkich próbek tektury falistej (Źródło: opracowanie własne)

Warto zauważyć, że wyniki ECT dla próbki E-480 (pokazane na rysunku 11) charakteryzują się największym rozrzutem.

Analiza

W tabeli 7 zestawiono wyznaczone współczynniki A_{α} dla trzech wybranych próbek tektury falistej. Współczynnik ten obliczono przez minimalizację różnicy między wynikami eksper-



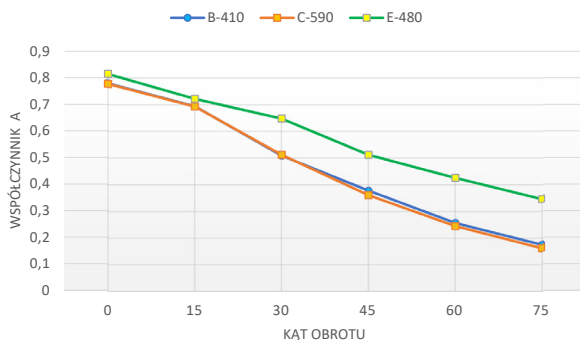
Rys. 11. Statystyczne wartości ECT dla wszystkich próbek tektury falistej (Źródło: opracowanie własne)

mentalnymi a wynikami modelu empirycznego zdefiniowanego równaniem (1).

Tabela 7. Współczynnik A_{α} dla trzech próbek tektury falistej obciążonych pod różnym kątem względem kierunku CD

Tektura ID	ECT-CD (-)	ECT-15 (-)	ECT-30 (-)	ECT-45 (-)	ECT-60 (-)	ECT-75 (-)
B-410	0,780	0,694	0,509	0,378	0,257	0,175
C-590	0,780	0,690	0,510	0,360	0,250	0,160
E-480	0,815	0,722	0,648	0,512	0,426	0,346

Na rysunku 12 pokazano wartości współczynnika A_{α} . Można wyraźnie zaobserwować, że tektury B-410 i C-590 mają podobne wartości współczynników korelujących w pełnym zakresie kierunków obciążenia.



Rys. 12. Wartości współczynnika A_{α} wyznaczone dla różnych próbek tektury falistej obciążonej pod różnym kątem w stosunku do kierunku CD (Źródło: opracowanie własne)

Model ECT

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartości dwóch współczynników: b_{α} w równaniu (3) oraz a w równaniu (4) W zaproponowanym modelu analityczno-empirycznym współczynnik b_{α} opisuje następującą zależnością:

$$b_{\alpha} = 1 - B \cdot \alpha \quad (5)$$

gdzie współczynnik B wyniósł odpowiednio: 0,0075 dla fali B, 0,0085 dla fali C oraz 0,0035 dla fali E. Współczynnik α jest ką-

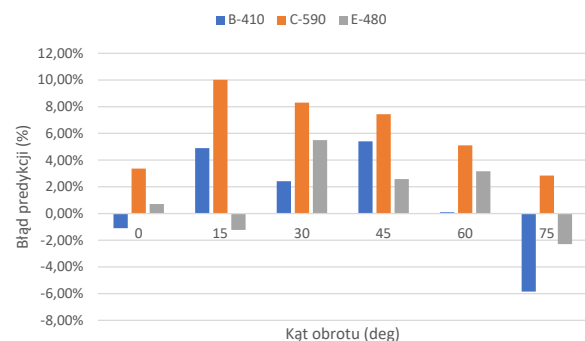
tem, pod jakim obciążona jest próbka i we wzorze (5) podany jest w stopniach.

Poprzez minimalizację różnicy między wynikami eksperymentalnymi a wynikami predykcji ECT za pomocą modelu wyznaczono współczynnik a , dla uproszczenia przyjęto wartość całkowitą 52. Dla tej wartości wyniki uzyskane za pomocą modelu opisanego równaniem (4) we wszystkich trzech przypadkach wybranych tektur były najbliższe rzeczywistym wartościom uzyskanym z badań ECT. W tabeli 8 zebrano wartości ECT, uzyskane za pomocą zaproponowanego modelu analityczno-empirycznego. W nawiasach zestawiono również wartości referencyjne (eksperymentalne).

Tabela 8. Wartości ECT uzyskane za pomocą zaproponowanego modelu analityczno-empirycznego

Tektura ID	ECT-CD (N/mm)	ECT-15 (N/mm)	ECT-30 (N/mm)	ECT-45 (N/mm)	ECT-60 (N/mm)	ECT-75 (N/mm)
B-410	5,54 (5,48)	4,92 (5,17)	4,29 (4,40)	3,67 (3,88)	3,05 (3,05)	2,42 (2,29)
C-590	9,35 (9,68)	8,16 (9,07)	6,97 (7,60)	5,78 (6,24)	4,58 (4,83)	3,39 (3,49)
E-480	6,32 (6,37)	5,99 (5,92)	5,66 (5,99)	5,33 (5,47)	5,00 (5,16)	4,66 (4,56)

Na rysunku 13 zestawiono procentowe różnice między wartościami referencyjnymi a wartościami ECT, uzyskanymi za pomocą zaproponowanego modelu.



Rys. 13. Procentowe różnice pomiędzy wartościami referencyjnymi a wynikami uzyskanymi za pomocą modelu empiryczno-analitycznego (Źródło: opracowanie własne)

Dyskusja

Wyniki zestawione w tabeli 4 pokazują trend wyznaczonych wartości SCT w zależności od kierunku, w którym wykonywany jest test. W kierunku MD materiał jest najbardziej odporny na ściskanie, dlatego wartości SCT osiągają największe wartości. To właśnie w tym kierunku układa się większość włókien w materiale w trakcie produkcji. Wartość odporności na ściskanie (SCT) jest najniższa w kierunku CD. Warto zauważyć, że kierunek MD w papierach składowych tektury falistej biegnie zawsze wzdłuż pofalowania. Oznacza to, że standardowy test ECT wykonywany jest w kierunku CD papierów we wszystkich warstwach tektury falistej.

Wyniki uzyskane w teście zgniatanie krawędziowego wszystkich próbek tektury falistej obciążonej pod różnym kątem względem kierunku CD wskazują, że wraz ze zwiększaniem kąta obrotu, wartość ECT spada, mimo że kierunek włókien w poszczególnych warstwach stopniowo się zmienia, przez co wartość SCT w tych warstwach rośnie. Efekt ten związany jest z wyboczeniem, które uaktywnia się gdy ściskane są cienkie warstwy papieru między wierzchołkami flutingu. Tak długo jak fluting jest prostopadły do kierunku obciążenia, szerokość wydzielonych segmentów jest stosunkowo niewielka – wynosi odpowiednio P (okres fali) dla warstw płaskich i $\sqrt{P^2/4 + H^2}$ dla warstw pofalowanych (rys. 3). Wraz ze zwiększaniem kąta obrotu flutingu względem osi obciążenia, szerokość ta zwiększa się, przez co również efekt wyboczenia jest silniejszy, a to sprawia, że wartość ECT również spada.

Zaproponowany model ECT tektury falistej po skalibrowaniu charakteryzuje się wysoką dokładnością odwzorowania. Dla tektury falistej z falą B i E błąd nie przekracza 6%, a w przypadku fali C nie przekracza 10%. Warto zauważyć, że gdy kierunek obciążenia jest zgodnym z CD, błąd predykcji dla fali B i E nie przekracza 1%, a dla fali C wynosi ok 3%. Model charakteryzuje się więc bardzo wysoką precyzją i nie wymaga dodatkowej kalibracji dla standardowego testu ECT w kierunku CD. Przyjęta wartość parametru $a = 52$ jest uniwersalna dla wszystkich analizowanych przypadków, a dla obciążenia w kierunku CD parametr b_a wynosi 1. Do poprawnego zdefiniowania modelu wymaganych jest zatem zaledwie 5 parametrów: SCT, H – wysokość próbki, b – szerokość segmentu (rys. 4), gramatura warstwy i *take-up factor*. Warto podkreślić, że w przedstawionym modelu nie wymagana jest też kalibracja parametru A_a , jak to ma miejsce w przypadku modelu opisanego równaniem (1).

Wnioski

W przedstawionej pracy wykonano serię badań ECT tektury falistej, obciążonej pod różnym kątem względem kierunku CD. Na podstawie a priori wykonanych testów SCT wszystkich warstw wybranych trzywarstwowych tektur falistych o różnych falach (B, C i E) zaproponowano model ECT tektury falistej. W pracy wyznaczono także współczynnik kalibracyjny w uproszczonym modelu empirycznym. Zaproponowany model jest znacznie bardziej uniwersalny niż standardowy i charakteryzuje się bardzo wysoką precyzją. W dalszych pracach badawczych autorzy zamierzają sprawdzić przydatność i skuteczność modelu empiryczno-analitycznego również w przypadku tektur pięciowarstwowych.

Autorzy pragną podziękować Łukaszowi Nęckiemu za możliwość wykonania badań w laboratorium Aquila Września. Szczególnie podziękowania kierujemy do życzliwych pracowników laboratorium – Izabeli Czelustej i Łukasza Graczyka.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Fadji T., Coetzee C.J., Berry T.M., Ambaw A., Opara U.L., 2018. "The efficacy of finite element analysis (FEA) as a design tool for food packaging: A review". *Biosystems Engineering* 174, 20-40.
- [2] Frank B. 2013. "Corrugated Box Compression—A Literature Survey". *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128.
- [3] Garbowski T., Niziałek-Łukawska M., Kuca M. 2019. „Analytical verification of popular McKee's formula". *Przegląd Papierniczy* 75 (12) : 767-773.
- [4] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. „ Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various perforations". *Energies* 14 (4) : 1095.
- [5] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. „Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various openings". *Energies* 14 (1) : 155.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity Analysis of Edge Crush Test". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [9] 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 (11) : 2840.
- [10] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Marek A. 2021. „New edge crush test configuration enhanced with full-field strain measurements". *Materials* 14 (19) : 5768.
- [11] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [12] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [13] Garbowski T., Gajewski T. 2021. "Determination of transverse shear stiffness of sandwich panels with a corrugated core by numerical homogenization". *Materials* 14 (8) : 1976.
- [14] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Mrówczyński D. 2021. „Numerical homogenization of multi-layered corrugated cardboard with creasing or perforation". *Materials* 14 (14) : 3786.
- [15] McKee R.C., Gander J.W., Wachuta J.R. 1963. "Compression strength formula for corrugated boxes". *Paperboard Pack.* 48 (8).
- [16] 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 (18) : 5181.
- [17] PN-EN ISO 12048:2002 – Opakowania – Opakowania transportowe z zawartością – Metody badania odporności na nacisk statyczny.
- [18] PN-EN ISO 3037:2013-12 – Tektura falista – Oznaczenie odporności na zgniatanie krawędziowe (metoda nieparafinowanej krawędzi).
- [19] PN-ISO 9895:2002 – Papier i tektura – Odporność na zgniatanie – Badanie przy krótkim wpięciu.
- [20] PN-EN ISO 1924-2:2010 – Papier i tektura – Oznaczenie właściwości przy działaniu sił rozciągających – Część 2: Badanie przy stałej prędkości rozciągania (20 mm/min).
- [21] www.fematsystems.pl/bse-system (dostęp 14.04.2022)