

Od papieru do tektury – modelowanie testu zgniatania krawędziowego

From paper to corrugated board – modeling the edge crush test

TOMASZ GARBOWSKI, KACPER ANDRZEJAK

DOI: 10.15199/54.2022.5.1

Tektura falista jest materiałem pochodzenia naturalnego. Możliwość jej wielokrotnego przerobu poprzez odzyskiwanie włókien celulozy w procesie recyklingu sprawia, że jest to produkt bardzo popularny i jednocześnie ekologiczny. Niestety, wykorzystanie włókien wtórnych do produkcji papieru zmienia jego pierwotne właściwości mechaniczne, przez co również tektura falista, zbudowana z papierów makulaturowych, jest mniej wytrzymała. Dodatkowo wyraźnie zauważalny, szczególnie w ostatnich dekadach, wzrost świadomości społecznej związanej z ochroną wspólnego dobra, jakim jest środowisko naturalne, wywiera presję również na producentach tektury falistej. Proces „odchudzenia” kompozycji tektury falistej jest jednym z pozytywnych skutków tej presji. Wynika on też z chęci optymalizacji produktu, przez co również maksymalizacji konkurencyjności na rynku opakowaniowym. Wykorzystanie włókien pochodzących z recyklingu oraz proces optymalizacji kompozycji produkowanej tektury falistej powodują, że formuły empiryczno-analityczne do szacowania nośności na zgniatanie krawędziowe, które powstały w ubiegłym stuleciu, nie są już aktualne. Były bowiem budowane na podstawie obserwacji eksperymentalnych materiału, innego niż produkowany obecnie. Celem niniejszej pracy jest weryfikacja i propozycja uaktualnionej formuły do predykcji ECT na podstawie SCT papierów składowych na przykładzie 5-warstwowej tektury falistej.

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

Corrugated board is a material of natural origin. The possibility of its multiple processing through the recovery of cellulose fibers in the recycling process makes it a very popular and ecological product. Unfortunately, the use of recycled fibers in the production of paper changes its original mechanical properties, which also makes the corrugated board made of recycled papers less durable. In addition, the clearly noticeable, especially in recent decades,

increase in social awareness related to the protection of our common good, which is the natural environment, also puts pressure on producers of corrugated board. The lightweight process of the corrugated board is one of the positive effects of this pressure. It also results from the desire to optimize the product, thus maximizing competitiveness on the packaging market. The use of recycled fibers and the process of optimizing the composition of the corrugated board produced means that the empirical and analytical formulas for estimating the edge crushing capacity, which were created in the last century, are no longer valid, because they were built on the basis of experimental observations of a material that was different from the material produced today. The aim of this study is to verify and propose an updated formula for ECT prediction based on the SCT of the component papers on the example of a 5-layer corrugated board.

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

Wprowadzenie

Niniejsza praca jest kontynuacją artykułu [2], który ukazał się na łamach poprzedniego numeru „Przeeglądu Papierniczego”, dlatego – w celu uniknięcia niepotrzebnego powtórzenia treści – odsyłamy czytelników do zapoznania się z motywacją i celem tych badań, które były już omawiane w pracy [2]. W poprzednim artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych tektury falistej jednościennej (3-warstwowej) wraz z propozycją analityczno-empirycznej formuły do szacowania odporności na zgniatanie krawędziowe tektury falistej na podstawie parametrów papierów składowych i geometrii warstwy pofalowanej. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych tektury dwuściennej

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;

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

(5-warstwowej) oraz uogólnienie zaprezentowanej formuły do wyznaczenia ECT na podstawie SCT papierów warstw płaskich i pofalowanych.

W literaturze naukowej można znaleźć wiele prac, w których zajmowano się już podobną tematyką. Autorzy, którzy opublikowali tego rodzaju prace, to m.in. Popil, Whitsitt, Rennie, Frank i wielu innych pracujących w Instytucie Chemii Papieru, IPST, USA. Wiele z tych prac powstało w latach 70. i 80. XX w. (np. [7, 8]). W nowszych pracach wykorzystuje się modele analityczne [1, 3, 10] lub numeryczne [9], a także techniki optyczne pomiaru przemieszczeń [4, 5]. Najpopularniejsza i zarazem najprostsza formuła wykorzystuje sumę iloczynów SCT poszczególnych papierów i współczynnik pofalowania warstw pofalowanych oraz jeden globalny współczynnik korelacyjny. Podejście takie mogło być zasadne w czasach, gdy do produkcji tektury wykorzystywano papiery o podobnym składzie włókien pierwotnych w każdej warstwie. Obecnie rzadko spotyka się, aby wszystkie warstwy tektury była skomponowane z identycznych papierów. Na poszczególne warstwy stosuje się specjalne papiery o bardzo specyficznym składzie – inne na warstwy pofalowane i inne na warstwy płaskie zewnętrzne oraz wewnętrzne. Sprawia to, że wspomniana metoda szacowania ECT powinna zostać uaktualniona lub zastąpiona bardziej ogólnym sformułowaniem, które pozwoli na uwzględnienie innych współczynników dla każdej warstwy.

Tektura 3-warstwowa różni się zasadniczo od tektury 5-warstwowej, ponieważ z założenia jej przekrój jest niesymetryczny, przez co nawet podczas osiowego ściskania pojawia się samoistne zginanie próbki. Jest to związane z przesunięciem osi neutralnej względem geometrycznej w niesymetrycznym przekroju tektury falistej. Efekt ten można zaobserwować szczególnie wyraźnie w badaniach sztywności zginania w teście 4-punktowego zginania [6]. Próbki ułożone na podporach niższą falą do góry mają inną sztywność zginania niż próbki ułożone niższą falą do dołu. Różnice mogą sięgać nawet kilkunastu procent. Dlatego zasadne wydaje się pytanie – czy tektury dwuścienne można modelować podobnymi wzorami jak jednościenne? W niniejszej pracy podjęto próbę odpowiedzi na to pytanie.

Metody i materiały

Tektura falista

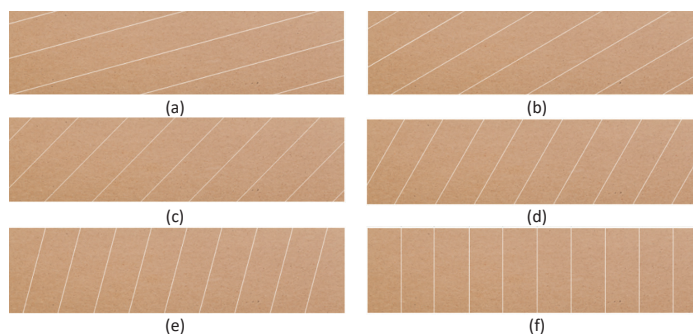
W celu zbudowania poprawnego modelu ECT tektury falistej konieczne było wykonanie serii badań laboratoryjnych wszystkich papierów składowych i pozyskanie niezbędnych parametrów materiałowych. Do badań wyselekcjonowano trzy popularne kompozycje pięciowarstwowej tektury falistej, których parametry zestawiono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

Podobnie jak w poprzedniej pracy [2], również w tym artykule celem autorów było stworzenie modelu ECT w funkcji SCT papierów składowych, geometrii warstw pofalowanych oraz kierunku

Tabela 1. Papiery składowe i geometria badanych tektur falistych

Fala	Gramatura (g/m ²)	Papiery składowe	Wys. fali (mm)	Okres fali (mm)	Współ. rozwinięcia
BC	790	KLB170 / WS135 / WS80 / WS135 / KLB170	2,55 (B) 3,66 (C)	6,34 (B) 7,95 (C)	1,337 (B) 1,427 (C)
BE	600	TLW140 / WS95 / WS80 / WS95 / TL3 125	2,55 (B) 1,16 (E)	6,34 (B) 3,50 (E)	1,337 (B) 1,236 (E)
BE	590	TL3 125 / WS95 / WS80 / WS95 / TL3 125	2,55 (B) 1,16 (E)	6,34 (B) 3,50 (E)	1,337 (B) 1,236 (E)

obciążenia próbki. Próbki tektury falistej zostały obciążone pod różnymi kątami względem kierunku fali. Na rysunku 1 zaprezentowano próbki tektury wycięte w taki sposób, aby obciążenie działało na próbkę pod kątem 0° (tradycyjny test ECT), a także 15, 30, 45, 60 i 75°.



Rys. 1. Próbki ECT wycięte pod różnym kątem: (a) 75°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30°, (e) 15°, (f) 0° – kierunek CD
(Źródło: opracowanie własne)

W tabeli 2 zestawiono wartości gramatury badanych tektur oraz zmierzone wysokości przekroju. W celu usystematyzowania prezentowanych wyników, przyjęto oznaczenie tektury składające się z symbolu opisującego rodzaj fali oraz gramatury poszczególnych próbek tektury falistej.

Tabela 2. Gramatura i oznaczenie badanych tektur

Fala	Gramatura (g/m ²)	ID	Wysokość (mm)
BC	790	BC-790	6,74
BE	600	BE-600	4,15
BE	590	BE-590	4,12

Badania ECT wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 3037:2013-12 [11] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności.

Papiery składowe

Próbki papieru badane były w dwóch głównych kierunkach ortotropii (MD i CD) oraz pod kątem 45° względem kierunku MD. Oznaczenia i gramatury poszczególnych papierów składowych dla wszystkich próbek tektury zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Oznaczenie papierów składowych badanych tektur falistych

Tektura ID	Rodzaj papieru	Gramatura (g/m ²)	Opis papieru
BC-790	KLB	170	Liner zewnętrzny
	WS	135	Fluting (B)
	WS	80	Liner
	WS	135	Fluting (C)
	KLB	170	Liner wewnętrzny
BE-600	TLW	140	Liner zewnętrzny
	WB	95	Fluting (E)
	WB	80	Liner
	WB	95	Fluting (B)
	TL3	125	Liner wewnętrzny
BE-590	TL3	125	Liner zewnętrzny
	WS	95	Fluting (E)
	WS	80	Liner
	WS	95	Fluting (B)
	TL3	125	Liner wewnętrzny

Najważniejszym parametrem papieru niezbędnym do zbudowania prostego modelu ECT jest jego odporność na zgniatanie w teście ściskania przy krótkim wpięciu SCT (*Short-span Compression Test*). Badania SCT wykonano zgodnie z normą PN-ISO 9895:2002 [12] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności.

Empiryczny model ECT

Najprostszy model ECT tektury falistej można zdefiniować za pomocą SCT papierów składowych oraz współczynnika rozwinięcia warstw pofalowanych i zapisać:

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

Wartości SCT poszczególnych warstw przemnaża się przed odpowiadający współczynnik rozwinięcia, który dla warstw płaskich wynosi 1, a następnie iloczyny sumuje się. Ponieważ w analizowanym modelu ECT uwzględnia się również kierunek obciążenia próbki, dlatego w równaniu (1) wprowadzony został indeks dolny α ,

który definiuje kąt, pod jakim obciążona jest próbka. W przedstawionym modelu współczynnik dopasowania A_{α} jest jedynym parametrem, który pozwala skorelować wyniki uzyskane za pomocą modelu z wynikami testów laboratoryjnych.

Prezentowany model oparty jest na zmierzonych wartościach SCT jedynie w głównych kierunkach ortotropii (MD i CD). Dlatego w celu określenia SCT w kierunku obciążenia należy zastosować proste przekształcenia, które można zapisać następującym wzorem:

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

Model analityczno-empiryczny

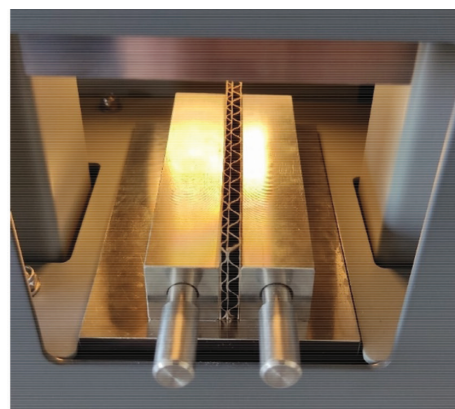
Podobnie jak w poprzedniej pracy [2], również tutaj założono, że z uwagi na wyboczenie cienkich warstw papieru, które powstaje w każdej warstwie w trakcie ściskania, nośność poszczególnych papierów, opisana wartością SCT, ulega redukcji. W przedstawionym modelu analityczno-empirycznym nie jest wymagana korelacja parametru empirycznego A_{α} , który pojawia się w równaniu (1). Model zapisuje się w następującej formie:

$$ECT_{\alpha} = b_{\alpha} \sum_{i=1}^5 SCT_{\alpha,i} \cdot \alpha_i \cdot \gamma_i \quad (3)$$

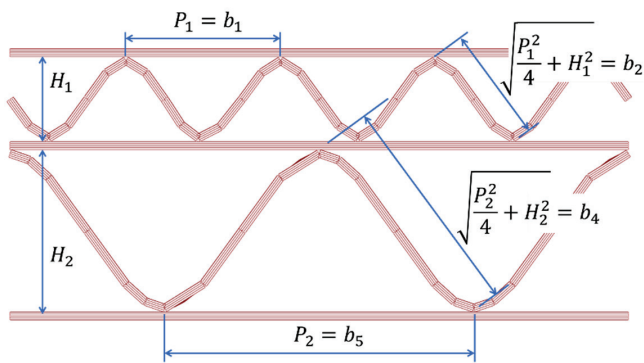
gdzie parametr b_{α} określa wpływ kierunku obciążenia w zależności od rodzaju i typu tektury falistej, a γ_i jest współczynnikiem zmniejszającym nośność statyczną na ściskanie poszczególnych warstw. Współczynnik ten uwzględnia wyboczenie warstw i zależy od geometrii fali oraz gramatury danego papieru składowego. Bardziej poprawne 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. Zależność opisującą parametr γ_i można zapisać:

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

gdzie a jest parametrem, który należy wyznaczyć na podstawie obserwacji eksperymentalnych, g_i jest gramaturą danej warstwy,



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



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

b_1 jest szerokością poszczególnych segmentów w przekroju tektury falistej (szczegóły na rys. 3). Równanie (4) różni się od wzoru przedstawionego w pracy [2] tym, że nie występuje w nim wysokość przekroju. Wartość szerokości b_3 (wewnętrznej warstwy płaskiej) została przyjęta a priori jako 0,7 mniejszej z dwóch długości fali, tj. $b_3 = \min(P_1, P_2)$ [6].

Wyniki

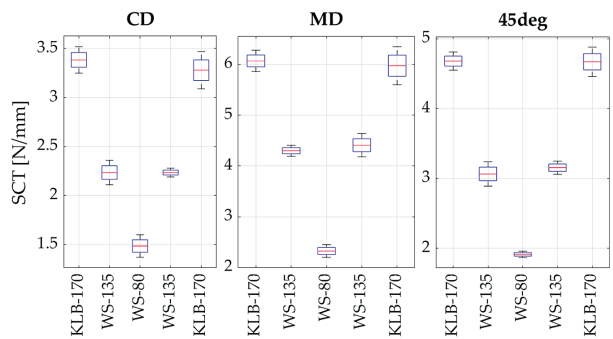
Badania laboratoryjne

W tabeli 4 zestawiono wyniki testów SCT, uzyskanych dla wszystkich papierów składowych trzech wybranych tektur falistych: BC-790, BE-600 i BE-590. Każdy papier był testowany 3-4 razy, a w sytuacji, gdy wyniki miały duży rozrzut, wykonywano dodatkowe testy. W tabeli 4 zestawiono wartości średnie oraz odchylenie standardowe każdego badania.

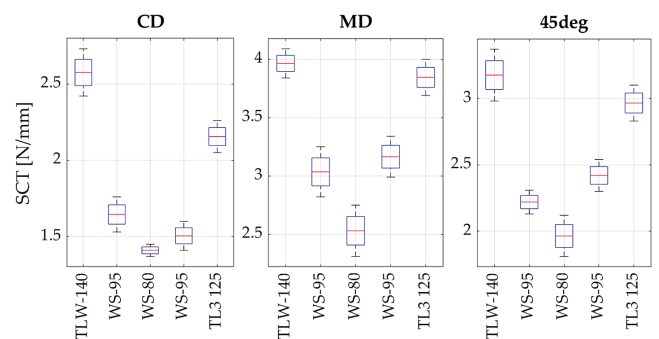
Tabela 4. Wartości średnie SCT wraz z odchyleniem standardowym

Tektura ID	Papier ID	SCT-CD (N/mm)	SCT-45 (N/mm)	SCT-MD (N/mm)
BC-790	KLB-170	3,39±0,12	4,69±0,13	6,14±0,19
	WS-135	2,19±0,09	3,09±0,13	4,27±0,10
	WS-80	1,50±0,08	1,91±0,04	2,30±0,09
	WS-135	2,23±0,04	3,18±0,06	4,37±0,15
	KLB-170	3,30±0,18	4,66±0,20	5,98±0,32
BE-600	TLW-140	2,61±0,13	3,08±0,11	3,92±0,09
	WS-95	1,69±0,09	2,01±0,09	2,99±0,16
	WS-80	1,42±0,03	1,94±0,08	2,56±0,17
	TL3-125	2,13±0,09	2,87±0,10	3,83±0,13
BE-590	TL3-120	2,26±0,13	3,06±0,11	3,64±0,08
	WS-95	1,50±0,06	2,01±0,09	2,69±0,13
	WS-80	1,47±0,08	1,94±0,08	2,34±0,06
	TL3-125	2,32±0,07	2,87±0,17	3,75±0,06

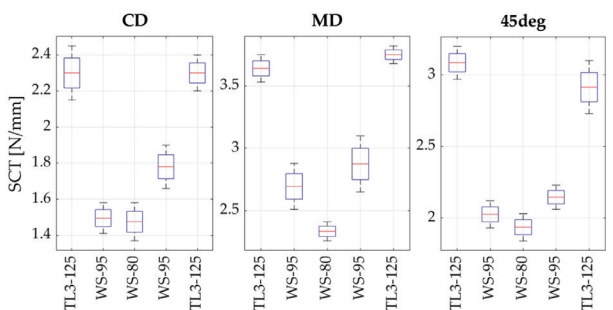
W celu lepszego zobrazowania uzyskanych wyników, na rysunkach 4-6 pokazano statystyczne rozkłady wyników badań SCT



Rys. 4. Badanie ECT próbki BC-790 (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 5. Badanie ECT próbki BE-600 (Źródło: opracowanie własne)



Rys. 6. Badanie ECT próbki BE-590 (Źródło: opracowanie własne)

w trzech wybranych kierunkach (MD, CD i 45°) zestawione dla wszystkich papierów.

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 średnie SCT uzyskane dla wszystkich warstw wybranych tektur falistych.

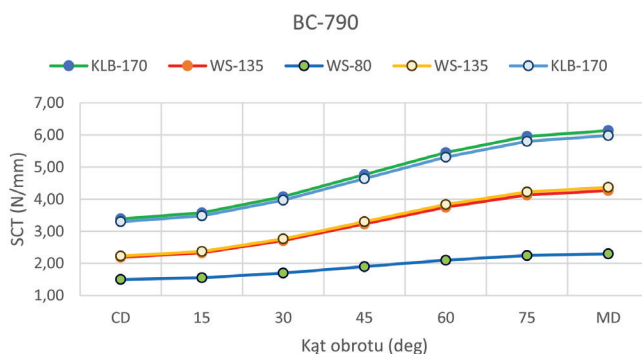
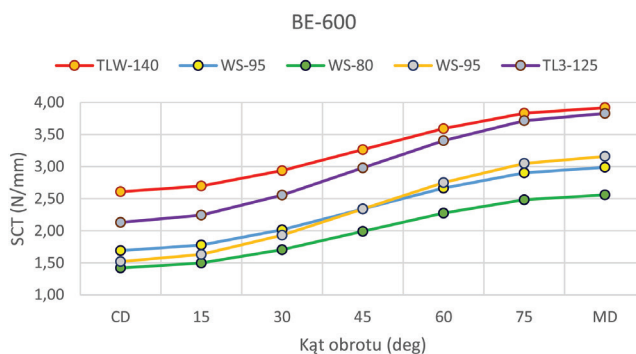
W tabeli 6 zestawiono wszystkie wyniki badań ECT dla trzech wybranych tektur. Oprócz wartości średnich ECT, pokazano też

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)
BC-790	KLB-170	3,39	3,57	4,08	4,69	4,77	5,45
	WS-135	2,19	2,33	2,71	3,09	3,23	3,75
	WS-80	1,50	1,55	1,70	1,91	1,90	2,10
	WS-135	2,23	2,37	2,77	3,18	3,30	3,84
	KLB-170	3,30	3,48	3,97	4,66	4,64	5,31
BE-600	TLW-140	2,61	2,70	2,94	3,08	3,27	3,59
	WS-95	1,69	1,78	2,02	2,26	2,34	2,67
	WS-80	1,42	1,50	1,71	1,88	1,99	2,28
	WS-95	1,52	1,63	1,93	2,46	2,34	2,75
	TL3-125	2,13	2,24	2,56	2,93	2,98	3,41
BE-590	TL3-120	2,26	2,35	2,61	3,06	2,95	3,30
	WS-95	1,50	1,58	1,80	2,01	2,10	2,39
	WS-80	1,47	1,53	1,69	1,94	1,91	2,12
	WS-95	1,75	1,83	2,05	2,15	2,36	2,66
	TL3-125	2,32	2,42	2,68	2,87	3,04	3,39

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)
BC-790	10,41±0,13	9,56±0,37	8,38±0,29	6,96±0,10	6,00±0,17	4,31±0,16
BE-600	8,95±0,14	8,39±0,06	7,76±0,14	6,46±0,18	5,66±0,32	4,30±0,35
BE-590	9,68±0,10	9,07±0,14	7,60±0,02	6,24±0,12	4,83±0,10	3,49±0,22

Rys. 7. Badanie ECT próbki BC-790
(Źródło: opracowanie własne)Rys. 8. Badanie ECT próbki BE-600
(Źródło: opracowanie własne)

odchylenie standardowe. W celu uzyskania poprawnych statystycznie wyników każda z tektur była badana na 5-6 próbkach.

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

Analiza

W tabeli 7 zestawiono wyznaczone współczynniki A_α dla trzech wybranych próbek tektur falistej. Współczynnik ten obliczono przez minimalizację różnicy między wynikami eksperymentalnymi a wynikami modelu empirycznego zdefiniowanego równaniem (1).

Na rysunku 12 pokazano wartości współczynnika A_α . Można wyraźnie zaobserwować, że w tradycyjnym teście ECT (0°) wszystkie 3 tektury mają różne wartości współczynników korelujących, co wyraźnie wykazuje, że stosowanie równania (1) z tym samym współczynnikiem może wiązać się z dużym błędem predykcji.

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 (-)
BC-790	0,713	0,607	0,494	0,336	0,256	0,173
BE-600	0,848	0,781	0,632	0,471	0,371	0,271
BE-590	0,949	0,836	0,639	0,467	0,308	0,225

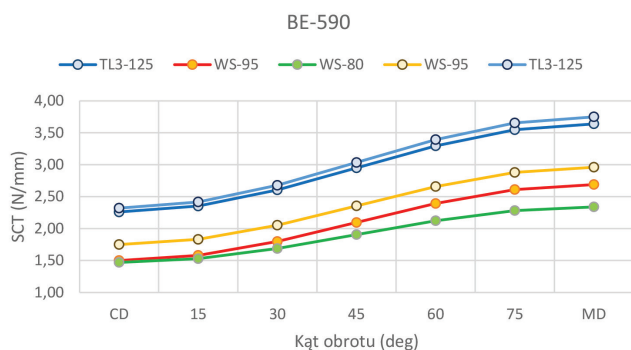
Model ECT

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono wartości dwóch współczynników: b_α w równaniu (3) oraz a w równaniu (4). W zaproponowanym modelu analityczno-empirycznym, podobnie jak w modelu zaprezentowanym w pracy [2], współczynnik b_α opisany jest następującą zależnością:

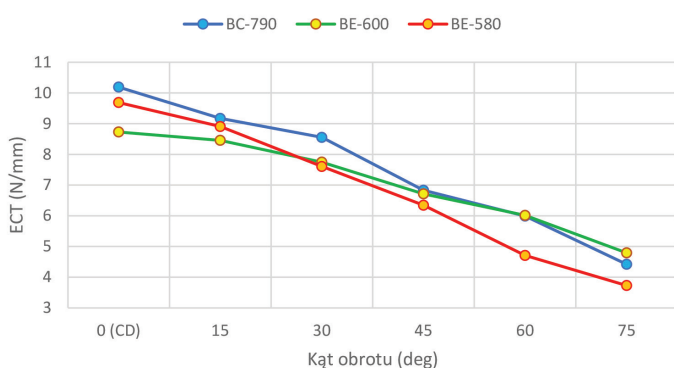
$$b_\alpha = 1 - B \cdot \alpha \quad (5)$$

gdzie parametr B wynosił odpowiednio: 0,0075 dla tektury BC-790, 0,006 dla tektury BE-600 oraz 0,0085 dla tektury BE-590. Współczynnik α jest kątem, pod jakim została obciążona próbka i we wzorze (5) należy podać jego wartość w stopniach.

Poprzez minimalizację różnicy między wynikami eksperymentalnymi a wynikami predykcji ECT za pomocą modelu wyznaczono współczynnik a , dla uproszczenia przyjęto wartość całkowitą równą 18. Dla podanych wartości parametru a wyniki uzyskane za pomocą modelu opisanego równaniem (4) we wszystkich trzech



Rys. 9. Badanie ECT próbki BE-590
(Źródło: opracowanie własne)



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

przypadkach wybranych tektur były najbliższe rzeczywistym wynikom uzyskanym z badań ECT. W tabeli 8 zebrano wartości ECT, uzyskane za pomocą zaproponowanego modelu analityczno-empirycznego.

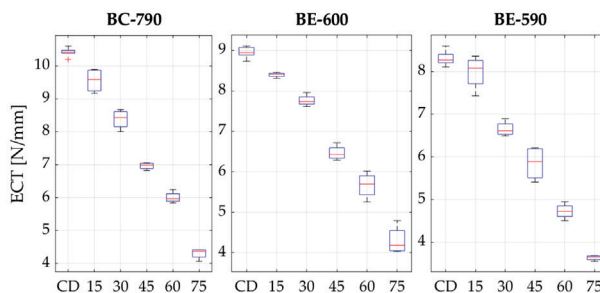
Tabela 8. Wartości ECT uzyskane za pomocą zaproponowanego modelu analityczno-empirycznego

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)
BC-790	10,65	9,45	8,25	7,06	5,86	4,66
BE-600	9,12	8,30	7,48	6,66	5,84	5,02
BE-590	9,22	8,04	6,87	5,69	4,52	3,34

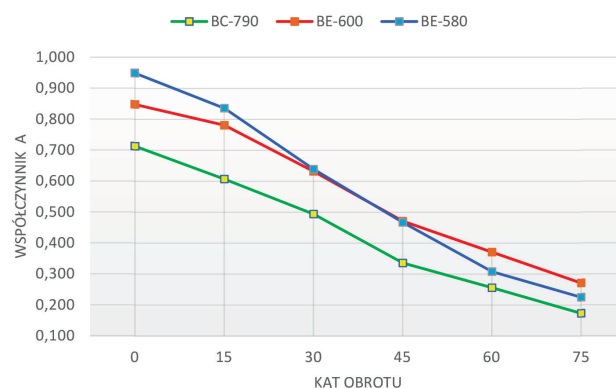
Na rysunku 13 zestawiono procentowe różnice między wartościami referencyjnymi a wartościami ECT uzyskanymi za pomocą zaproponowanego modelu.

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. Wartość odporności na ściskanie (SCT) jest najniższa w kierunku CD. W tabeli 6 zestawiono wyniki badań ECT próbek tektury falistej



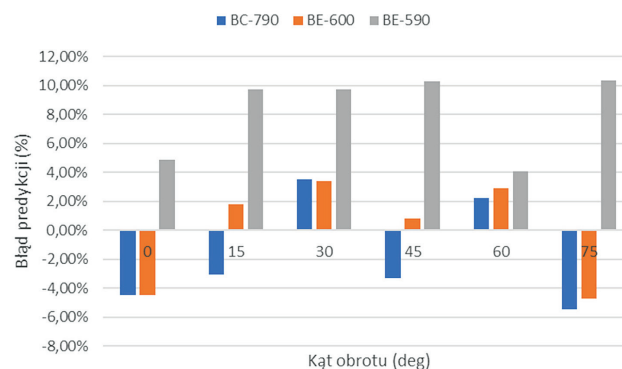
Rys. 11. Statystyczne wartości ECT dla wszystkich próbek tektury falistej
(Źródło: opracowanie własne)



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

obciążonej pod różnym kątem. Na rysunku 10 można wyraźnie zaobserwować, że spadek ECT – w zależności od kąta obciążenia próbki – jest liniowy lub bliski liniowemu.

Zaproponowany model ECT tektury falistej po skalibrowaniu charakteryzuje się wysoką dokładnością odwzorowania i można go bez dodatkowych adaptacji stosować do analizy tektury 5-warstwowej. Dla tektury falistej BC-790 i BE-600 błąd nie przekraczał 6%,



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

a w przypadku tektury BE-590 nie przekroczył 10%. Warto zauważyć, że gdy kierunek obciążenia jest zgodny z CD, to błąd predykcji dla wszystkich tektury nie przekraczał 5%. Model charakteryzuje się więc bardzo wysoką precyzją i nie wymaga dodatkowej kalibracji dla standardowego testu ECT w kierunku CD. W przypadku obciążenie w kierunku CD, parametr b_{α} wynosi 1. Do poprawnego zdefiniowania modelu wymagane są zatem zaledwie cztery parametry: SCT, b – szerokość segmentu (rys. 4), gramatura warstwy i *take-up factor*. Warto podkreślić, że zaprezentowany w tej pracy model różni się od modelu prezentowanego w pracy [2] – nie uwzględnia wysokości przekroju tektury. Wyeliminowanie ze wzoru tego parametru pozwoliło uzyskać poprawne wyniki dla wszystkich trzech analizowanych rodzajów dwuściennej tektury falistej.

Podsumowanie

W przedstawionej pracy wykonano serię badań ECT 5-warstwowej tektury falistej, obciążonej pod różnymi kątami względem referencyjnego kierunku CD. Na podstawie wykonanych testów SCT wszystkich warstw wybranych pięciowarstwowych tektur falistych o różnych falach (BC i BE) zaproponowano analityczno-empiryczny model ECT tektury falistej. W pracy wyznaczono także współczynnik kalibracyjny w uproszczonym modelu empirycznym. Zaproponowany model jest bardziej uniwersalny od standardowego modelu i charakteryzuje się wysoką precyzją, nie wymaga też określenia współczynnika a osobno dla każdego przypadku, co sprawia, że model ten może być bezpośrednio wykorzystany do analizy tektury pięciowarstwowej.

Autorzy pragną skierować szczególne podziękowania za pomoc w wykonaniu badań do życzliwych pracowników laboratorium Aquila Września – Izabeli Czelusty i Łukasza Graczyka, a także do Łukasza Nęckiego za umożliwienie wykonania badań.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Frank B. 2003. "Ring crush and short span compression for predicting edgewise compressive strength". *TAPPI* 2 (11) : 13-16.
- [2] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (4) : 210-216.
- [3] Garbowski, T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity Analysis of Edge Crush Test". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [4] 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.
- [5] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Marek A. 2021. „New edge crush test configuration enhanced with full-field strain measurements”. *Materials* 14 (19) : 5768.
- [6] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A. 2022. „Analytical determination of the bending stiffness of a five-layer corrugated cardboard with imperfections”. *Materials* 15 (2) : 663.
- [7] Gunderson D.E. 1984. "A comparison of three methods for determining the edgewise compressive properties of paperboard". *Appita* 37 (4) : 307-313.
- [8] Habeger C.C., Whitsitt W.J. 1982. "A mathematical model of compressive strength in paperboard". *IPC Tech. Pap.* 130.
- [9] 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 Packaging of Agricultural Products". *Appl. Sci.*
- [10] Popil R.A. 2010. "New Model for Converting Short Span Compression with Other Measurements to Ring Crush". TAPPI Conference, Atlanta.
- [11] PN-EN ISO 3037:2013-12 – Tektura falista – Oznaczenie odporności na zgniatanie krawędziowe (metoda nieparafinowanej krawędzi).
- [12] PN-ISO 9895:2002 – Papier i tektura – Odporność na zgniatanie – Badanie przy krótkim wpięciu.

Konkurs Pro Carton Student Video Award

Europejskie Stowarzyszenie Producentów Tektury i Pułetek Składanych zaprasza kreatywnych młodych ludzi do udziału w konkursie Pro Carton Student Video Award. Przedmiotem konkursu jest stworzenie filmu wideo prezentującego zalety tektury (czas trwania filmu – od 30 sekund do 2 minut). Mogą zgłaszać się słuchacze studiów stacjonarnych z całej Europy. Udział jest bezpłatny. Termin nadsyłania

zgłoszeń mija 26 czerwca br. Zdobywca pierwszego miejsca, wskazany przez fachowe jury, otrzyma nagrodę w wysokości 5 tys. EUR. Poza tym przyznana zostanie nagroda publiczności. Laureat otrzyma kamerę GoPro HERO 10 wraz z pakietem akcesoriów. Tegoroczny konkurs będzie trzecim z kolei. W ubiegłorocznym współzawodnictwie wzięli udział studenci 38 uczelni z 17 krajów.

E.W.