

Wpływ wstępnych imperfekcji na odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe

Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2022.6.1

Papiery makulaturowe o niskiej gramaturze, coraz częściej wykorzystywane do produkcji tektury falistej, są bardzo podatne na wyboczenia. Nawet bez obciążenia wstępnego lub naprężeń produkcyjnych zarówno warstwy płaskie (linery), jak i pofalowane (fluting) są lekko zakrzywione. Dodatkowo każde, nawet niewielkie zgniecenie tektury falistej zmienia nieco kształt warstw falistych i często prowadzi do mikrouszkodzeń i rozwarstwień, czyli zerwania połączeń między włóknami celulozowymi. Początkowe niedoskonałości geometryczne i materiałowe (rozwarstwienie, osłabienie itp.) mają oczywisty wpływ na odporność na zgniatanie krawędziowe tektury falistej. Niestety zbadanie związku między niedoskonałościami a utratą nośności jest dość trudnym zadaniem, zwłaszcza gdy ma być zweryfikowane badaniami laboratoryjnymi. Trudność wynika z braku możliwości obiektywnego zbadania ilości niedoskonałości w próbce, zarówno pod względem materiałowym, jak i geometrycznym. Znacznie łatwiej jest wprowadzić imperfekcje do modelu numerycznego i sprawdzić ich wpływ na obliczoną nośność próbki na ściskanie. W niniejszej pracy zbudowano numeryczny model tektury falistej na podstawie danych uzyskanych z mechanicznych badań laboratoryjnych poszczególnych papierów. Model zweryfikowano badaniami laboratoryjnymi tektury falistej, a następnie sprawdzono wpływ różnych rodzajów i rozmiarów niedoskonałości na wyniki analiz numerycznych. Obserwacje wyraźnie pokazują, że zarówno niedoskonałości materiałowe, jak i geometryczne mają istotny wpływ na odporność na zgniatanie krawędziowe tektury falistej.

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

Recycled, lightweight papers that are increasingly used in the production of corrugated board are very prone to buckling. Even without preload or production stresses, both the flat layers (liners) and the fluting layers are slightly curved. Additionally, each, even a small, crush of the corrugated board slightly changes the shape of the corrugated layers and often leads to micro-damage and delamination, i.e. breaking the connections between cellulose fibers. Initial geometrical and material imperfections (delamination, weakening, etc.) have an obvious influence on the edge crush resistance of the corrugated board. Unfortunately, examining the relationship between imperfections and the loss of load capacity is quite a difficult task, especially when they are to be verified by laboratory tests. The difficulty stems from the inability to objectively examine the amount of imperfections in the sample, both in terms of material and geometrical ones. It is much easier to introduce imperfections into the numerical model and check their influence on the calculated compressive load capacity of the sample. In this work, a numerical model of the corrugated board was built on the basis of data obtained from mechanical laboratory tests of individual papers. The model was verified with laboratory tests of corrugated board and then the influence of different types and sizes of imperfections on the results of numerical analyzes was checked. The observations clearly show that both material and geometric imperfections have a significant impact on the edge crush resistance of the corrugated board.

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

Wprowadzenie

Tektura falista odgrywa obecnie bardzo istotną rolę w gospodarkach nie tylko krajów szybko rozwijających się, takich jak Polska, ale właściwie w większości państw Europy. W świecie, w którym świadomość społeczna konsumentów, związana między innymi z ochroną środowiska, zrównoważoną gospodarką i cyklem zamkniętym produktów sukcesywnie rośnie, nie ma już miejsca na produkty, które zagrażają lub mogą zagrażać celom zrównoważonego rozwoju. Młodzi mieszkańcy naszego kontynentu od przedszkola uczą się o zagrożeniach i niebezpieczeństwach związanych z nierozważnym eksploatowaniem zasobami naszej planety. Wszyscy zdajemy sobie sprawę z tego, że zasoby Ziemi nie są niewyczerpalne i musimy dbać o miejsce, w którym wspólnie żyjemy. Producenci tektury falistej i papieru, choć ich biznes oparty jest na eksploatacji jednego z ważniejszych surowców – drewna pozyskiwanego z wycinki lasów, nie wpływają na środowisko w takim stopniu jak producenci opakowań z innych, mniej ekoprzyjaznych materiałów. Tektura falista, jako materiał biodegradowalny, nie zostawia w środowisku naturalnym piętna w postaci stert niezutilizowanego materiału, czy pływających po morzach i oceanach wysp plastiku. Ponadto, dzięki wykorzystaniu do produkcji papieru także włókien wtórnych (pochodzących z recyklingu), również czynnik związany z wycinką lasów jest sukcesywnie minimalizowany. Poprzez wydłużanie cyklu życia włókna makulaturowego w procesie produkcji papieru zmniejszana jest ilość ścinanych drzew i jednocześnie zyskuje się więcej czasu na odbudowanie terenów zalesionych.

Niestety stosowanie w produkcji papieru i tektury włókien makulaturowych powoduje, że materiał, którego produkcja jeszcze 20-30 lat temu była bardzo powtarzalna, dziś już taką nie jest. Włókna po wielu cyklach odzyskiwania stają się coraz krótsze, coraz bardziej kruche, a ich zdolność do tworzenia stabilnej sieci połączeń z innymi włóknami staje się z czasem coraz mniejsza. Stosowanie skrobi i innych środków do zatrzymania regresu zdolności włókien do ich wzajemnego połączenia powoduje, że właściwości mechaniczne papieru ulegają znacznym zmianom. Produkowany papier, choć bardziej ekologiczny, staje się materiałem znacznie bardziej heterogenicznym, z większą ilością i wielkością wstępnych imperfekcji. Wszystkie niedoskonałości geometryczne i materiałowe mają oczywisty wpływ na wytrzymałość papieru i tektury falistej. Nie jest to jednak proces dobrze rozpoznany przez inżynierów i naukowców. W literaturze można znaleźć zaledwie kilka prac na ten temat. Garbowski i Knitter-Piątkowska [6] uwzględniają imperfekcje geometryczne w obliczeniach analitycznych sztywności zginania w kierunku MD (*Machine Direction*). Efekt ten wcześniej badany był eksperymentalnie przez Czechowskiego i innych [2].

W niniejszej pracy wykorzystano wyniki badań przeprowadzone przez Garbowskiego i Andrzejaka, zaprezentowane

w pracach [4] i [5], w których znajdują się m.in. wyniki badań laboratoryjnych kilku rodzajów tektur falistych 3- i 5-warstwowych. W pracach [4] i [5] autorzy prezentują analityczny model do szacowania ECT, zbudowany na podstawie zbadanych właściwości mechanicznych papierów składowych. Celem niniejszej pracy było wykorzystanie jedynie zmierzonych charakterystyk geometrycznych wybranych tektur falistych oraz właściwości mechanicznych papierów, z których są zbudowane. Dzięki temu stworzono numeryczny model tektury falistej, który następnie posłużył do symulacji różnych imperfekcji i ich wpływu na odporność tektury falistej na zginanie krawędziowe. Do wszystkich analiz komputerowych wykorzystano metodę elementów skończonych [3, 9].

Metody i materiały

Tektura falista

W celu zbudowania poprawnego modelu numerycznego tektury falistej konieczne było wykonanie serii badań laboratoryjnych wszystkich papierów składowych i pozyskanie niezbędnych parametrów materiałowych. Do badań wyselekcjonowano sześć popularnych kompozycji trzywarstwowej i pięciowarstwowej tektury falistej, których główne parametry zestawiono w tabeli 1.

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 / SC 175 / KLB 170	3,63	7,95	1,427
E	480	TLWC 160 / WS 135 / TLW 160	1,16	3,50	1,236
BC	790	KLB 170 / WS135 / WS80 / WS135 / KLB170	2,55 (B) 3,66 (C)	6,34 (B) 7,95 (C)	1,337 (B) 1,427 (C)
BE	600	TLW 140 / 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)

Tabela 2. Gramatura i oznaczenie badanych tektur

Fala	Gramatura	ID	Wysokość
	(g/m ²)		(mm)
B	410	B-410	2,912
C	590	C-590	4,110
E	480	E-480	1,586
BC	790	BC-790	6,74
BE	600	BE-600	4,15
BE	590	BE-590	4,12

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.

Badania ECT wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 3037:2013-12 [7] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności.

Papiery składowe

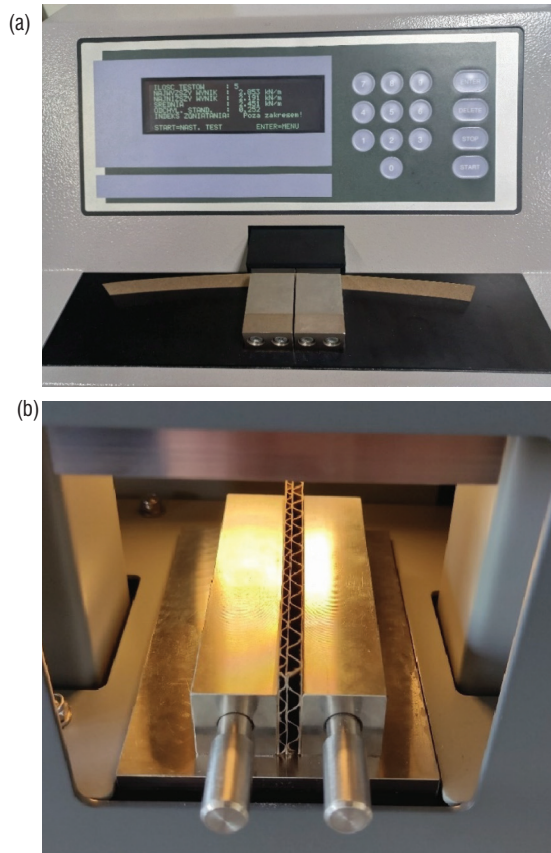
Wszystkie próbki papieru zbadane były w dwóch głównych kierunkach ortotropii, tj. w kierunku MD i CD, oraz pod kątem 45° względem kierunku MD. Oznaczenia i gramatury poszczególnych papierów składowych dla wszystkich próbek tektury zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Oznaczenie papierów składowych badanych tektur falistych

Tektura ID	Rodzaj papieru	Gramatura (g/m ²)	Opis papieru
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
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
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 modelu numerycznego jest odporność na zgniatanie w teście ściskania przy krótkim wpięciu SCT (*short-span compression test*). Każdą

próbkę zbadano w trzech głównych kierunkach ortotropii, tj. wzdłuż włókien, w poprzek włókien oraz pod kątem 45°. Badania SCT wykonano zgodnie z normą PN-ISO 9895:2002 [8] w laboratoryjnych warunkach normowych, tj. 22°C i 50% wilgotności (rys. 1).



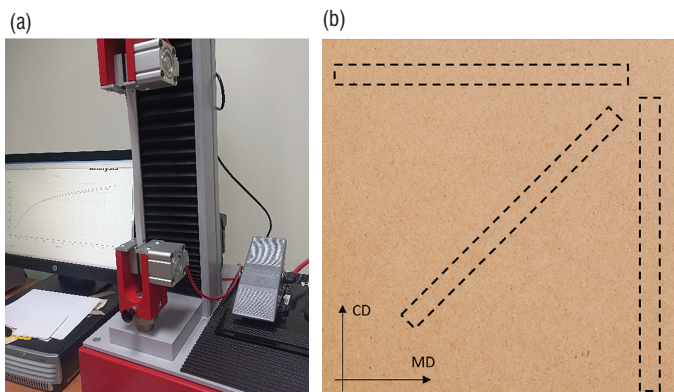
Rys. 1. Badanie SCT i ECT
(Źródło: opracowanie własne)

W celu określenia parametrów liniowo-sprężystego modelu konstytutywnego papieru zbadano też sztywności próbek w trzech głównych kierunkach: MD (*Machine Direction*), CD (*Cross Direction*) oraz pod kątem 45° (rys. 2).

Model numeryczny tektury falistej

W celu sprawdzenia wrażliwości tektury falistej na drobne imperfekcje zbudowano model numeryczny. Chcąc poprawnie i kompleksowo zamodelować test ECT, zastosowano metodę elementów skończonych. Na podstawie zmierzonych sztywności oraz odporności na ściskanie i rozciąganie w dwóch głównych kierunkach ortotropii, a także w kierunku obróconym o 45° wyznaczono pozostałe parametry materiałowe. Moduł sztywności postaciowej w płaszczyźnie wyznaczono z następującego wzoru:

$$\frac{1}{E_{\alpha\alpha}} = \frac{\cos^2(\alpha)}{E_x} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \sin^2(\alpha) \cos^2(\alpha) + \frac{\sin^4(\alpha)}{E_y}. \quad (1)$$



Rys. 2. Badanie TS: (a) urządzenie badawcze, (b) próbki wycięte w kierunkach MD, CD i 45°
(Źródło: opracowanie własne)

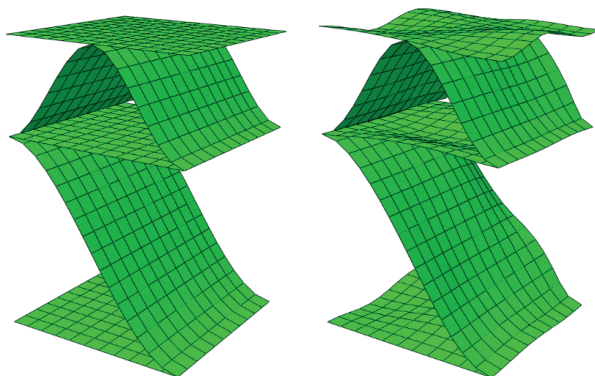
W przeprowadzonych badaniach testy były wykonane w kierunku 45° względem kierunku x, a kierunek $x = MD$ i $y = CD$, dlatego wzór (1) przyjmuje postać:

$$G_{xy} = \left(\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right)^{-1} \quad (2)$$

We wzorach (1) i (2) E_x jest modułem sztywności w kierunku MD, E_y – modułem sztywności w kierunku CD, E_{45} – sztywnością w kierunku obróconym o 45° względem kierunku MD, natomiast ν_{xy} – współczynnikiem Poissona w płaszczyźnie xy, który można wyznaczyć za pomocą empirycznej formuły zaproponowanej przez Bauma [1]:

$$\nu_{xy} = 0.293 \sqrt{\frac{E_y}{E_x}} \quad (3)$$

Z uwagi na szczególny przypadek obciążenia próbki tektury falistej na krawędziach wzdłuż kierunku CD, jaki obserwujemy w teście ECT, do zamodelowania zachowania niesprężystego wykorzystano jedynie parametr SCT w kierunku CD. W przyjętym uproszczeniu zakłada się, że w teście ECT wytrzymałość papieru na ściskanie w innych kierunkach nie jest aktywowana, podobnie jak wytrzymałość na rozciąganie. Model zbudowano z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do analizy wykorzystano element powioko-



Rys. 3. Model pięciowarstwowej tektury falistej BC-790: (a) bez imperfekcji, (b) z imperfekcjami (skala x10)
(Źródło: opracowanie własne)

wy z czterema węzłami i czterema punktami Gaussa o przybliżonym wymiarze jednego boku elementu ok. 0,35 mm. Obliczenia wykonano w programie ABAQUS FEA.

W celu uwzględnienia imperfekcji w modelach numerycznych zastosowano następującą metodologię: niedoskonałości materiałowe wprowadzano poprzez zmianę wartości parametrów konstytutywnych każdej warstwy o 10%, natomiast imperfekcje geometryczne wprowadzano poprzez zmianę położenia węzłów w modelu tak, aby kształt geometrycznej imperfekcji był zgodny z wektorem własnym, powiązany z najniższą wartością własną wyobczonego modelu.

Wyniki

W tabeli 4 zestawiono wyniki testów SCT oraz sztywności rozciągania w trzech kierunkach (MD, CD i pod kątem 45°), uzyskanych dla wszystkich papierów składowych sześciu wybranych tektur falistych: B-410, C-590, E-480, BC-790, BE-600, BE-590. Każdy papier był testowany 3-4 razy, a w sytuacji gdy wyniki miały duży rozrzut, wykonywano dodatkowe testy. W tabeli za prezentowane są wartości średnie.

W tabeli 5 zestawiono wszystkie wyniki badań ECT dla wybranych tektur. W celu uzyskania poprawnych statystycznie wyników każda z tektur była badana na 5-6 próbkach. Tabela prezentu-

Tabela 4. Wartości średnie SCT wraz z odchyleniem standardowym

Tektura ID	Papier ID	SCT-CD (N/mm)	TS-CD (N/mm)	TS-MD (N/mm)	TS-45 (N/mm)
B-410	TL3-125	2,14	373,33	1012,7	572,68
	WS-120	2,09	365,06	1024,6	516,50
C-590	TL3-125	2,09	381,15	1058,3	595,08
	KLB-170	3,28	527,77	1472,1	929,12
	SC-175	4,18	686,08	1476,1	924,73
E-480	KLB-170	3,19	568,05	1445,1	956,22
	TLWC-160	2,75	412,14	1043,6	635,01
	WS-135	2,13	365,02	1067,5	533,52
BC-790	TLW-160	2,43	443,86	1102,1	667,03
	KLB-170	3,39	618,88	1534,2	990,02
	WS-135	2,19	369,08	1113,5	572,41
	WS-80	1,50	317,09	699,14	445,02
	WS-135	2,23	385,91	1147,4	623,54
BE-600	KLB-170	3,30	592,74	1418,9	838,15
	TLW-140	2,61	505,95	999,95	622,60
	WS-95	1,69	331,94	872,70	498,63
	WS-80	1,42	273,16	812,83	424,82
BE-590	WS-95	1,52	290,66	885,54	508,44
	TL3-125	2,13	440,63	1082,2	623,26
	TL3-120	2,26	412,94	961,28	586,98
	WS-95	1,50	294,34	756,40	427,40
	WS-80	1,47	343,54	696,51	459,84
BE-590	WS-95	1,75	332,01	854,73	474,40
	TL3-125	2,32	413,77	883,13	588,29

je również wyniki analiz numerycznych (ECT-num) oraz wyniki analiz z uwzględnieniem jedynie niedoskonałości materiałowych (ECT-mat), tylko imperfekcji geometrycznych (ECT-imp) oraz obu połączonych efektów (ECT-all).

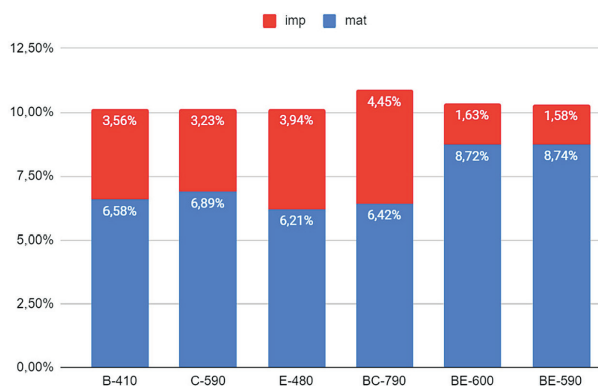
Tabela 5. Wartości ECT badanych tektur oraz wartości ECT uzyskane za pomocą modeli numerycznych

Tektura ID	ECT-CD (N/mm)	ECT-num (N/mm)	ECT-mat (N/mm)	ECT-imp (N/mm)	ECT-all (N/mm)
B-410	5,48	5,364	5,011	5,174	4,828
C-590	9,68	9,350	8,705	9,048	8,415
E-480	6,37	6,474	6,072	6,219	5,827
BC-790	10,41	10,251	9,631	9,796	9,262
BE-600	8,95	8,771	8,006	8,628	7,894
BE-590	9,68	9,287	8,476	9,141	8,359

Na rysunku 4 pokazano spadki ECT w procentach, w zależności od tego czy model numeryczny zawierał imperfekcje materiałowe czy geometryczne.

Dyskusja

Wyniki zestawione w tabeli 5 pokazują wyraźnie, że wszystkie modele wybranych sześciu tektur falistych bardzo dobrze estymują rzeczywistą wartość ECT. Błąd estymacji wynosił odpowiednio dla po-



Rys. 4. Spadki ECT w zależności od zastosowanej imperfekcji: imp – geometryczna, mat – materiałowa
(Źródło: opracowanie własne)

szczególnych modeli: B-410 – 2,11%, C-590 – 3,41%, E-480 – (-)1,63%, BC-790 – 1,14%, BE-600 – 2,00%, BE-590 – 4,06%. Największy błąd osiągnął wartość nieco ponad 4%. Można więc uznać, że przyjęty model obliczeniowy z dużą dokładnością odzwierciedla zachowanie różnych tektur falistych w teście krawędziowego zgniatania.

Na rysunku 4 wyraźnie widać, że wpływ niedoskonałości materiałowych ma dużo większe znaczenie dla spadku estymowanej wartości ECT niż imperfekcje geometryczne. W analizowanych przypadkach imperfekcje geometryczne odgrywają drugorzędną rolę. Są jednak bardziej zauważalne w przypadku przekrojów z wysoką falą B lub C, a także gdy papiery są stosunkowo cienkie.

Jednakże w każdym z obliczonych przykładów niedoskonałości materiałowe mają dużo większy wpływ. Spadki ECT wskutek wprowadzonych niedoskonałości materiałowych wahają się pomiędzy 6,21 a 8,74%, natomiast wpływ imperfekcji geometrycznych na spadek ECT nie przekroczył w żadnym przypadku 4,45%.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań papierów składowych sześciu wybranych tektur falistych. Na podstawie zmierzonych wielkości mechanicznych wyznaczono parametry materiałowe poszczególnych papierów. Następnie zbudowane zostały modele numeryczne wszystkich tektur falistych, z uwzględnieniem zmierzonych geometrii poszczególnych warstw i skalibrowanych modeli konstytutywnych. Modele numeryczne zostały zwalidowane wynikami uzyskanymi eksperymentalnie. Zweryfikowane modele obliczeniowe zostały wykorzystane do sprawdzenia wpływu różnych rodzajów imperfekcji na redukcję nośności tektury falistej na zgniatanie krawędziowe. Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika jednoznacznie, że heterogeniczność materiału ma większy wpływ na spadek wytrzymałości wszystkich próbek niż imperfekcje geometryczne. Jest to szczególnie ważna obserwacja dla producentów tektury falistej wykorzystujących materiały makulaturowe, szczególnie gdy ich produkcja dodatkowo oparta jest na analogowych procesach przetwórczych (sztancowanie, nadruk flexo itp.), które przegniatając materiał, uszkadzają jego strukturę.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Baum G.A. 1984. "The elastic properties of paper: A review". *IPC technical paper series* nr 145.
- [2] Czechowski L., Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Gralewski J., Biełkowska M. 2021. "Numerical and experimental study of five-layer non-symmetrical paperboard panel stiffness". *Materials* 14, 7453.
- [3] de Borst R., Crisfield M.A., Remmers J.J.C., Verhoosel C.V. 2012. "Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures". 2nd Edition, Wiley.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] PN-EN ISO 3037:2013-12 – Tektura falista – Oznaczanie odporności na zgniatanie krawędziowe (metoda nieparafinowanej krawędzi).
- [8] PN-ISO 9895:2002 – Papier i tektura – Odporność na zgniatanie – Badanie przy krótkim wpięciu.
- [9] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. 2013. „The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals". Butterworth-Heinemann.