



Komputerowo wspomagane wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej

Cz. 1. Wpływ zgniecenia tektury falistej na jej podstawowe parametry

Computer aided estimation of corrugated board box compression strength

Part 1. The influence of flute crash on basic properties of corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI, IZABELA CZELUSTA, ŁUKASZ GRACZYK

DOI: 10.15199/54.2018.6.1

Niniejsza praca rozpoczyna cykl publikacji dotyczących numerycznego (komputerowego) wyznaczania nośności opakowań z tektury falistej. Zagadnienia przedstawione w tym i kolejnych artykułach związane są bezpośrednio lub pośrednio z procesem określania maksymalnej siły, jaką można obciążyć pojedyncze pudło klapowe lub fasonowe.

W pracy podjęto tematykę związaną z wpływem procesów produkcyjnych (tj. kaszerowanie, nadruk, wykrajanie, bigowanie itp.) na podstawowe parametry tektury falistej. Przedstawiono wyniki testów wytrzymałościowych przeprowadzonych w akredytowanym laboratorium Aquila Września Sp. z o.o. we współpracy z Politechniką Poznańską oraz firmą FEMat Sp. z o.o., która dostarczyła oprogramowanie i część urządzeń. Sprawdzono wpływ kontrolowanego zgniecenia arkuszy 3- i 5-warstwowej tektury falistej na wyniki następujących testów: a) odporność na zginanie kolumnowe; b) sztywność na zginanie; c) sztywność na skręcanie; d) sztywność na ścinanie poprzeczne.

W kolejnych artykułach przyjrzymy się standardowym i nowym metodom wyznaczania podstawowych parametrów tektury falistej, sprawdzimy jaki jest wpływ stabilności paneli na nośność pudeł i pokazemy procedury numerycznego wyznaczania indeksu BCT opakowań z tektury falistej.

Słowa kluczowe: tektura falista, zgniecenie warstw pofalowanych, parametry mechaniczne, testy laboratoryjne

This work begins a series of publications on the numerical (computer) estimation of the load-bearing capacity of corrugated board packaging. Issues presented in this and subsequent articles are related directly or indirectly to the process of determining the maximum force that can be imposed on a single flap or shaped box. In this work, the issues related to the influence of post-production processes (i.e. laminating, printing, stamping, creasing, etc.) on the basic parameters of cardboard are presented. The paper presents the results of stress tests carried out in

the accredited laboratory Aquila Września Sp. z o.o. in cooperation with the Poznan University of Technology and FEMat Sp. z o.o. that provided software and some of the devices. The effect of controlled crashing of 3 and 5 layered corrugated board on the following test results was checked: a) edge crush test; b) bending stiffness test; c) torsional stiffness test; d) shear stiffness test.

In subsequent works, we will take a look at the standard and novel testing methods for the basic cardboard parameters determination, next we will check what is the impact of panel stability on the load capacity of boxes and then we will show the procedures for numerical estimation of the BCT index of corrugated board packaging.

Keywords: corrugated board, flute crash, mechanical properties, laboratory tests

Wprowadzenie

Opakowania z tektury falistej nie tracą na popularności już od ponad wieku. Głównym atutem produktów z papieru i tektury jest możliwość wykorzystania do ich produkcji włókien pochodzących z recyklingu. Możliwość odzyskiwania włókien przede wszystkim sprzyja środowisku, ale również pozwala obniżyć koszty produkcji, co w konsekwencji prowadzi również do obniżenia cen produktu.

Dr inż. **T. Garbowski** (tomasz.garbowski@put.poznan.pl), Politechnika Poznańska, Centrum Mechatroniki, Biomechaniki i Nanoinżynierii, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań;
mgr inż. **I. Czelusta** (izabela.czelusta@aquila.vpk.pl),
mgr inż. **Ł. Graczyk** (lukasz.graczyk@aquila.vpk.pl), AQUILA WRZEŚNIA Sp. z o.o., ul. Objazdowa 6a, 62-300 Września



Niestety, poprzez wykorzystywanie do produkcji opakowań z tektury falistej materiałów zawierających włókna wtórne automatycznie obniżane są indeksy wytrzymałościowe opakowania. Powodem jest nie tylko gorsza jakość włókien, ale również większa niejednorodność tektury – co prowadzi do potrzeby bardziej uważnego określania parametrów materiałowych tektury, czyli również do bardziej ostrożnego szacowania nośności opakowań. Tematyka związana z numerycznym wyznaczaniem nośności opakowań z tektury falistej była już poruszana przez wielu autorów m.in. w pracach [2, 6, 7]. W kilku przypadkach nośność opakowania obliczano na podstawie parametrów materiałowych tektury litej, z której następnie tworzono (homogenizowano) uproszczony model numeryczny tektury falistej [3, 8, 9]. Wiele artykułów poświęcono również tematyce pośrednio związanej z szacowaniem wytrzymałości opakowań, m.in. zagadnieniom stateczności paneli z tektury falistej [13, 4, 12], czy analizie wrażliwości w testach laboratoryjnych tektury falistej [5, 11]. Niestety, niewiele prac naukowych zawiera informacje na temat modelowania opakowań w oparciu o parametry przerobionej tektury falistej (np. laminowanej lub zadrukowanej).

Tektura, z uwagi na swoją strukturę (wielowarstwowa konstrukcja wzajemnie połączonych, kierunkowo ułożonych włókien), jest podatna na uszkodzenia (najczęściej lokalne rozwarstwienie w warstwach pofalowanych), powstające np. w procesach wycinania, bigowania, kaszerowania czy zadrukowywania. Każdy z tych procesów wpływa w jakimś stopniu nie tylko na cechy optyczne czy hydrofobowe, ale przede wszystkim na właściwości wytrzymałościowe końcowego produktu. Jednym z najczęstszych problemów producentów opakowań z tektury falistej jest zgniatanie przekroju, które powstaje podczas wymienionych procesów. Zgniecenie warstwy pofalowanej tektury, poprzez zmniejszenie wysokości fali oraz przez lokalne rozwarstwienie tektury, powoduje spadek sztywności na zginanie i skręcanie przekroju oraz w mniejszym stopniu – spadek odporności na zgniatanie kolumnowe. Ponieważ degradacja tych parametrów bezpośrednio zależy od stopnia zgniecenia przekroju tektury falistej, dlatego precyzyjne wyznaczenie zgniotu wydaje się być kluczowe w ocenie spadku nośności opakowania. Niestety, warstwa pofalowana tektury charakteryzuje się relatywnie wysoką sprężystością (tzn. w pewnym zakresie próbka po odciążeniu powraca do swojego pierwotnego kształtu), dlatego sama kontrola grubości przed i po procesie powodującym zgniatanie warstwy pofalowanej nie jest wiarygodnym pomiarem stopnia zgniecenia. Na przykład 3-warstwowa tektura falista o wysokości przekroju 3,86 mm zgnieciona o 40%, czyli do wysokości 2,32 mm, w kilka minut po odciążeniu potrafi odprężić się do wysokości przekroju 3,35 mm, co stanowi

zaledwie 13,3% zmiany pierwotnej grubości. Potrzebne są zatem inne metody pomiarowe, które pozwolą na dokładniejsze określenie stopnia zgniecenia przekroju tektury falistej. Dużą wrażliwość na zmiany grubości przekroju oraz degradację sztywności przekroju wykazują: test 4-punktowego zginania oraz dwa różne warianty testów skręcania.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań naukowych przeprowadzonych w laboratorium Aquila Września Sp. z o.o., we współpracy z Politechniką Poznańską oraz firmą FEMat Sp. z o.o., która dostarczyła część urządzeń pomiarowych oraz oprogramowanie. Do testów laboratoryjnych wyselekcjonowano kilkanaście różnych indeksów trzy- i pięciowarstwowej tektury falistej, którą zgniatano w zakresie od 10% do 70% pierwotnej wysokości przekroju. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono proste modele konstytutywne papieru i tektury, dokonano przeglądu i krótko opisano testy laboratoryjne wykorzystywane do określania parametrów wytrzymałościowych tektury falistej, zestawiono wyniki pokazujące wpływ zgniatania na jej wybrane właściwości oraz wskazano metody pomiaru, które mogą pozwolić oszacować stopień zgniecenia przekroju tektury falistej.

Model konstytutywny papieru/tektury w pigułce

Tektura lita jest materiałem, który wytwarza się poprzez połączenie kilku warstw masy papierniczej. Z uwagi na fakt, że w procesie produkcyjnym włókna mają tendencję do układania się wzdłuż biegu maszyny, tektura posiada cechy materiału ortotropowego, tzn. takiego, w którym właściwości mechaniczne zależą od kierunku. W płaszczyźnie arkusza wyróżniamy dwa wzajemnie prostopadłe kierunki (rys. 1) – wzdłuż biegu maszyny (*Machine Direction* – MD) oraz poprzeczny (*Cross Direction* – CD). Ponieważ większość włókien w tekturze ułożona jest równoległe do kierunku MD, dlatego materiał w tym kierunku charakteryzuje się wyższą sztywnością i wytrzymałością niż w kierunku CD. Ponadto tektura ma też wyższą wytrzymałość przy ściskaniu niż przy rozciąganiu [6, 7, 14, 10]. Macierz sztywności materiałowej dla tektury ma następującą postać:

$$Q = \begin{bmatrix} E_1 & E_1 \nu_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 1 - \nu_{12} \nu_{21} & 1 - \nu_{12} \nu_{21} & 0 & 0 & 0 \\ E_2 \nu_{12} & E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - \nu_{12} \nu_{21} & 1 - \nu_{12} \nu_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

E_1 – moduł Younga w kierunku MD,

E_2 – moduł Younga w kierunku CD,



ν_{12}, ν_{21} – współczynniki Poissona w płaszczyźnie 1-2,

G_{12} – moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie 1-2,

G_{13} – moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie 1-3,

G_{23} – moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie 2-3.

Tektura falista składa się z kilku wzajemnie sklejonych, na przemian płaskich i pofalowanych warstw tektury litej, i również charakteryzuje się kierunkowością właściwości mechanicznych. W tym przypadku jednak właściwości wytrzymałościowe nie zależą jedynie od ułożenia włókien, ale również od ilości warstw, typu fal itp. Uśrednione parametry materiałowe można uzyskać wykorzystując np. proces homogenizacji [3, 8, 9] lub pośrednio z testów laboratoryjnych próbek tektury falistej. Metoda oparta na homogenizacji daje możliwość złożenia dowolnego modelu tektury bez konieczności fizycznego budowania danego indeksu. Natomiast określanie parametrów materiałowych z testów laboratoryjnych pozwala uwzględnić nieznaną a priori wpływ, np. sklejenia, wszelkich imperfekcji czy lokalnych niejednorodności. Jeżeli arkusz tektury został dodatkowo poddany procesom np. wycinania, zadrukowywania czy kaszerowania, to ewentualne zgniecenie jest automatycznie uwzględnione w uśrednionych wartościach parametrów uzyskanych z testów. Aby zdefiniować model konstytutywny tektury w zakresie sprężystym powinno się wyznaczyć następujące wielkości:

D_{11} – sztywności na zginanie w kierunku MD,

D_{22} – sztywność na zginanie w kierunku CD,

D_{33} – sztywność na skręcanie,

A_{22} – sztywność na ściskanie w kierunku CD,

R_4 – sztywność na ścinanie transwersalne w płaszczyźnie 1-3,

R_5 – sztywność na ścinanie transwersalne w płaszczyźnie 2-3.

Znając powyższe wartości można wyznaczyć zastępczą grubość przekroju z następującego wzoru:

$$\bar{t} = \sqrt{12 \frac{D_{22}}{A_{22}}} \quad (2)$$

Następnie można obliczyć uśrednione (zhomogenizowane) sztywności:

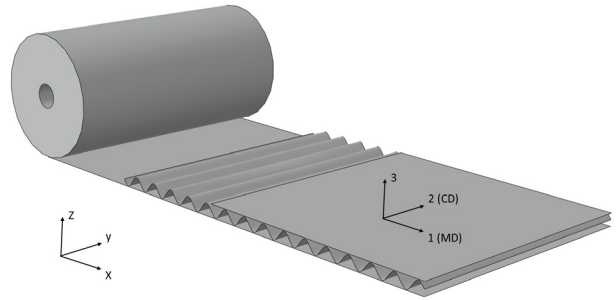
$$\bar{E}_1 = \frac{12D_{11}}{\bar{t}^3}, \bar{E}_2 = \frac{1}{2\bar{t}} \left(\frac{12D_{22}}{\bar{t}^2} + A_{22} \right), \quad (3)$$

$$\bar{G}_{12} = \frac{12D_{33}}{\bar{t}^3}, \bar{G}_{13} = \frac{R_4}{\bar{t}}, \bar{G}_{23} = \frac{R_5}{\bar{t}}.$$

Następnie na podstawie zależności [1]:

$$\sqrt{\bar{\nu}_{12}\bar{\nu}_{21}} = 0.293 \quad (4)$$

korzystając z symetrii $\bar{\nu}_{12}\bar{E}_2 = \bar{\nu}_{21}\bar{E}_1$ możemy obliczyć współczynniki Poissona w płaszczyźnie 1-2



Rys. 1. Kierunki materiałowe w tekturze

$$\bar{\nu}_{12} = 0.293 \sqrt{\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2}}, \bar{\nu}_{21} = \bar{\nu}_{12} \frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} \quad (5)$$

które wraz z modułami sztywności tworzą zastępczą macierz podatności materiałowej:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{E}_1^{-1} & -\bar{\nu}_{21}\bar{E}_2^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{\nu}_{12}\bar{E}_1^{-1} & \bar{E}_2^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{G}_{12}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{G}_{13}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{G}_{23}^{-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Można z dużym przybliżeniem założyć, że w procesie zgniatania przekroju tektury falistej degradowana jest głównie sztywność giętna i skrętna (najczęściej przez lokalne rozwarstwienie w warstwach pofalowanych). Oczywiście przez rozwarstwienie tektury zmianie ulegają również jej parametry niesprężyste, np. granica sprężystości przy ściskaniu. Wpływ zgniecenia na te parametry nie jest analizowany w niniejszej pracy, dlatego opis konstytutywny tektury jest tutaj ograniczony tylko do części sprężystej. Wnikliwych czytelników zainteresowanych sprężysto-plastycznymi modelami materiałowymi tektury odsyła się np. do pracy [14, 10], gdzie autorzy przedstawiają model Xia-Boyce-Perks wraz z metodą kalibracji, lub do prac [6, 7], gdzie opisany jest model Tsai-Wu.

Wybrane testy laboratoryjne

W celu sprawdzenia wpływu zgniecenia warstwy pofalowanej przekroju na właściwości mechaniczne tektury falistej należy w pierwszej kolejności wybrać takie testy laboratoryjne, które charakteryzują się wysoką wrażliwością na wybrane parametry materiałowe. Jak już zostało ustalone, parametry, które ulegają degradacji w trakcie zgniatania, to przede wszystkim: sztywność na zginanie D_{11} , D_{22} , sztywność na skręcanie D_{33} , sztywność na ścinanie R_4 , R_5 oraz w mniejszym stopniu sztywność na ściskanie A_{11} i A_{22} . Dlatego w wyselekcjonowanych testach laboratoryjnych



wielkości te powinny być wyraźnie „aktywne” (tzn. powinno dać się je pośrednio lub bezpośrednio zmierzyć). Wybrane testy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Testy laboratoryjne wraz z wykazem aktywnych parametrów

| Test | Nazwa | Aktywne parametry | Wielkość próbki |
|-----------------------------------|--------|-------------------|-----------------|
| szywność na zginanie w kier. MD | BNT-MD | D_{22}, R_4 | 250x50 |
| szywność na zginanie w kier. CD | BNT-CD | D_{11}, R_5 | 250x50 |
| szywność na skręcanie w kier. MD | TST-MD | D_{33}, R_4 | 150x50 |
| szywność na skręcanie w kier. CD | TST-CD | D_{33}, R_5 | 150x50 |
| szywność na ścinanie w kier. MD | SST-MD | D_{33}, R_4 | 200x100 |
| szywność na ścinanie w kier. CD | SST-CD | D_{33}, R_5 | 200x100 |
| odporność na zgniatanie kolumnowe | ECT | A_{22} | 100x25 |

Niestety, nie wszystkie testy wykazują w równym stopniu wrażliwość na spadek poszczególnych szywności. Na przykład w teście 4-punktowego zginania w kierunku MD, pomiędzy wewnętrznymi a zewnętrznymi podporami, zaangażowana jest zarówno szywność na zginanie D_{22} jak i szywność na ścinanie R_4 , ale dla niskich przekrojów (tj. fala E lub F) wpływ ścinania jest bardzo niewielki. Podobnie wygląda sytuacja w przypadku testów na skręcanie, gdzie wiodącym parametrem jest szywność D_{33} . Pomińnięcie wpływu R_4 i R_5 na wyniki jest oczywistym błędem, ale należy mieć na uwadze, że nie wszystkie tektury wykazują wrażliwość na te parametry.

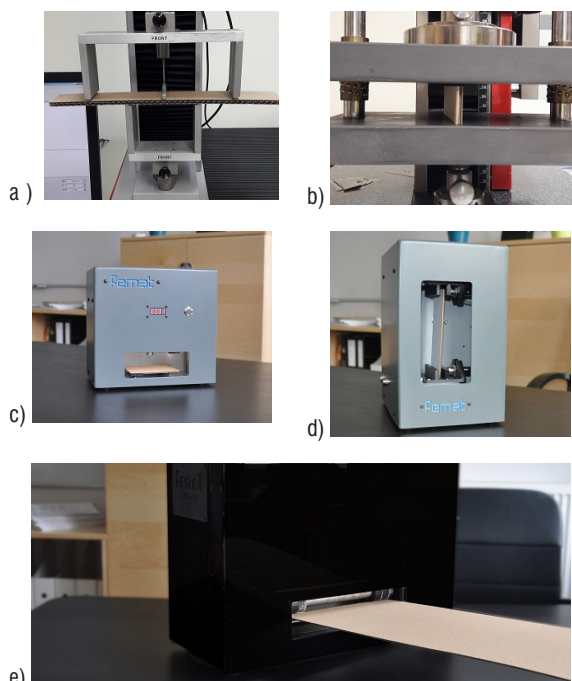
Pomiar odporności na zgniatanie krawędziowe przeprowadza się dla próbek relatywnie krępych (umownie o grubości powyżej 1 mm) o wymiarach 100x25 mm. W przypadku próbek wiotkich wiodącym mechanizmem jest utrata stateczności, a nie jak wskazuje nazwa testu – zgniecenie próbki. ECT (*Edge Crush Test*) jest jednym z ważniejszych parametrów, często wykorzystywanym do analitycznego wyznaczania nośności opakowań z tektury falistej [4].

Pomiar szywności na zginanie jest badaniem laboratoryjnym opartym na metodzie czteropunktowego zginania, które gwarantuje stały moment na próbce pomiędzy wewnętrznymi podporami. W części środkowej próbki nie występuje siła ścinająca, co pozwala wyeliminować jej wpływ na ugięcie próbki w połowie jej rozpiętości, przez co na dokładniejsze wyznaczenie szywności na zginanie. Pomiedzy podporami wewnętrznymi a zewnętrznymi występuje jeszcze siła ścinająca, co pozwala na uwzględnienie również szywności na ścinanie. Pomiar szywności na zginanie jest niestety bardzo wrażliwy na uszkodzenie próbki (przełamane lub mocne zgniezione), przez co

wyniki dla próbek przegniecionych o więcej niż 50% (szczególnie w kierunku MD) często są niewiarygodne.

Pomiar szywności na skręcanie polega na skręceniu próbki o wymiarze 150x50 mm (długość – 150 mm, szerokość – 50 mm) o 10 stopni w obie strony. Do pomiarów szywności wykorzystuje się tylko liniową część wykresu (kąta obrotu vs moment). Wyniki uzyskane za pomocą urządzenia TST są poprawne nawet dla próbek przełamanych i mocno przegniecionych. Gwarancją wiarygodnych wyników są: stabilny sposób przytrzymania próbki, statyczna metoda pomiaru kąta obrotu i momentu oraz relatywnie duża szerokość próbki, dzięki której uzyskuje się pewnego rodzaju homogenizację materiału.

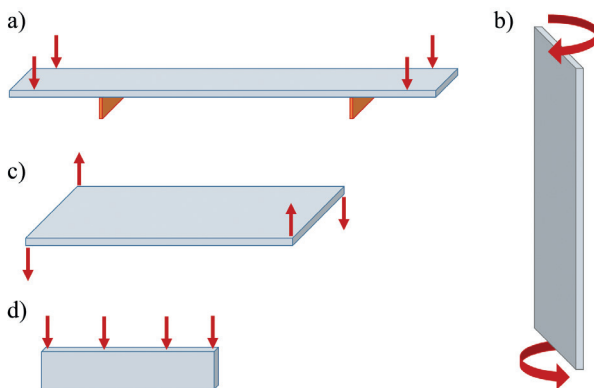
Pomiar szywności na ścinanie polega na skręceniu parą sił próbki o wymiarze 200x100 mm. Test polega na punktowym przyłożeniu znanego przemieszczenia w dwóch narożnikach prostokątnej próbki (dwa punkty na przekątnej). Znanie przemieszczenie oraz pomiar reakcji w dwóch pozostałych punktach, pozwalają na wyznaczenie szywności na ścinanie tektury. Do pomiarów szywności wykorzystuje się tylko liniową część wykresu (przemieszczenie vs reakcja). Wyniki uzyskane z urządzenia SST są stabilne i poprawne nawet dla próbek przełamanych i mocno przegniecionych. Wyniki testów wykonanych za pomocą urządzenia SST wykazują mniejszą wrażliwość na ścinanie transwersalne – kierunek włókien w próbce ma mniejszy wpływ na otrzymane wyniki.



Rys. 2. Urządzenia: a) BNT, b) ECT, c) SST, d) TST, e) CRS



Na rysunku 3 pokazano schematycznie sposób obciążenia próbek w 4 wybranych testach. W każdym przypadku mierzona była zarówno siła, jak i przemieszczenie. Na rysunku 2 pokazano urządzenia laboratoryjne wykorzystane do testów. Do pomiaru sztywności w teście 4-punktowego zginania wykorzystano urządzenie firmy Testometric (rys. 2a), do pomiaru odporności na zgniatanie kolumnowe wykorzystano urządzenie firmy Zwick/Roell (rys. 2b), do pomiaru sztywności na skręcanie wykorzystano – pokazane na rys. 2c-2d – urządzenie TST v.2.1 (fematsystems.pl/systems/tst) oraz SST v.1.2 (fematsystems.pl/systems/sst). Aby uzyskać w pełni kontrolowalny sposób zgniatania tektury w zakresie od 1% do 70% w badaniach zastosowano (pokazany na rys. 2e) precyzyjny system CRS v.1.0 (fematsystems.pl/services/crs), dzięki któremu uzyskano dokładność zgniecenia: $\pm 10 \mu m$.



Rys. 3. Schemat testu: a) 4-punktowego zginania, b) skręcania momentem, c) skręcania parą sił, d) zgniatania kolumnowego

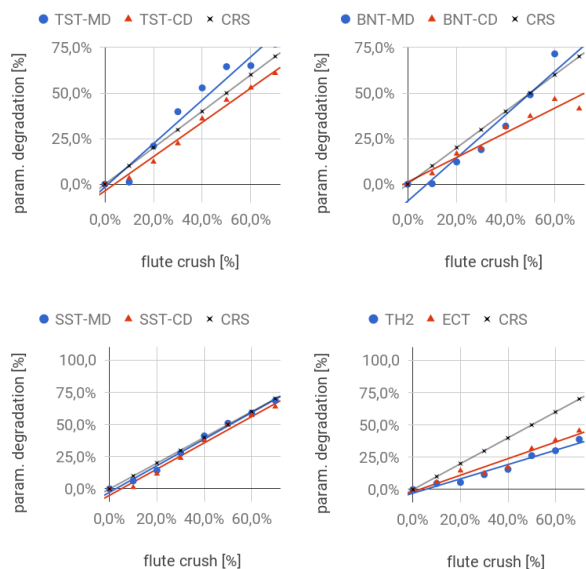
Zestawienie wyników badań laboratoryjnych

W ramach projektu przeprowadzono serię badań laboratoryjnych polegających na sprawdzeniu wpływu zgniatania przekroju różnych indeksów tektury falistej na jej podstawowe parametry wytrzymałościowe. W celu realizacji projektu przebadano 10 następujących indeksów tektur:

| | | |
|----------|---------|----------------------|
| 3B285A1 | fala B | 285 g/m ² |
| 3B410A1 | fala B | 410 g/m ² |
| 3C340A1 | fala C | 340 g/m ² |
| 3C440A1 | fala C | 440 g/m ² |
| 3E285A1 | fala E | 285 g/m ² |
| 3E440A2 | fala E | 440 g/m ² |
| 5BC480A1 | fala BC | 480 g/m ² |
| 5BC580A1 | fala BC | 580 g/m ² |
| 5EB560A1 | fala EB | 560 g/m ² |
| 5EB670A1 | fala EB | 670 g/m ² |

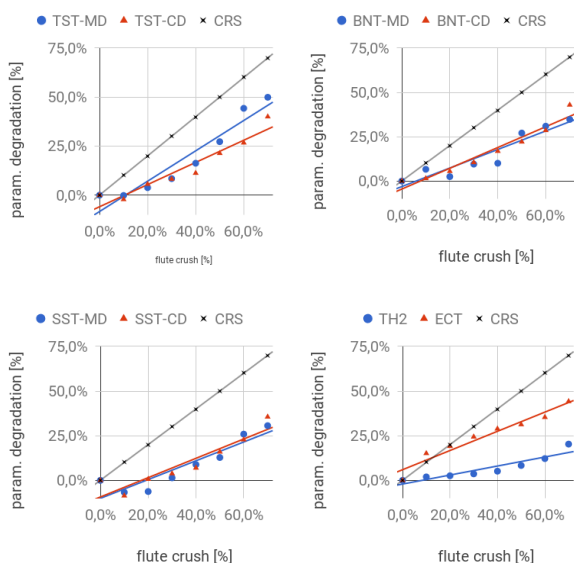
Każdą z wybranych tektur poddano serii pomiarów oraz badań laboratoryjnych polegających na sprawdzeniu: grubości próbki przed przegnieceniem, grubości próbki po przegnieceniu – THK lub TH2, odporności próbki na zgniatanie krawędziowe – ECT oraz zdefiniowaniu sztywności BNT-MD, BNT-CD, SST-MD, SST-CD, TST-MD, TST-CD. Każdy indeks tektury był poddany trzem do ośmiu serii testów na tym samym poziomie zgniecenia, w zależności od statystycznego rozrzutu poszczególnych wyników. Tekturę przegniecano w zakresie od 10 do 70% jej początkowej grubości ze skokiem co 10%. Z uwagi na sprężyste odprężenie tektury – pomiar grubości przegnieczonej próbki był wykonywany kilku minut po przegnieceniu, co gwarantowało wstępną stabilizację odprężenia materiału.

Poniżej zestawiono wybrane wyniki z przeprowadzonych badań. Na rysunkach 4-6 pokazano regresje liniowe procentowego spadku poszczególnych wielkości dla trzech wybranych indeksów tektury. Brak korelacji pomiędzy spadkiem odporności na zgniatanie kolumnowe (ECT) oraz zmniejszeniem wysokości przekroju (TH2) a stopniem zgniecenia (CRS), widoczny na wszystkich rysunkach, udowadnia jednoznacznie, że wielkości te nie powinny być wykorzystywane do określania stopnia zgniecenia tektury.

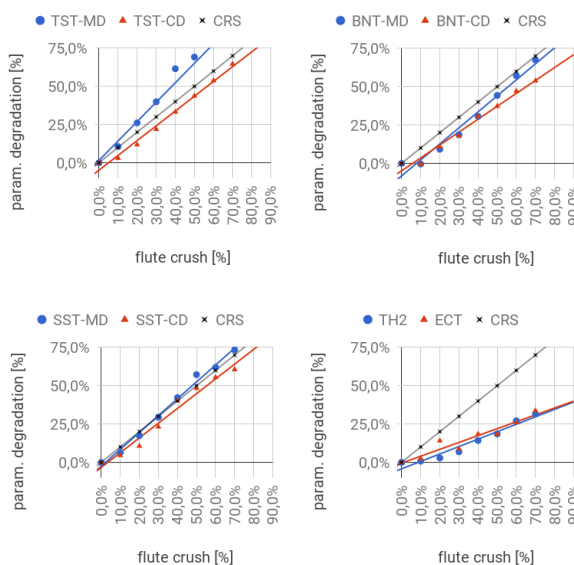


Rys. 4. Liniowa regresja pomiędzy zdegradowanymi parametrami a zgnieceniem dla indeksu tektury 3B285A1

Dla tektur o niskim przekroju – tutaj indeks 3E285A1 i 3E440A1 (rys. 5) – spadki wszystkich sztywności (tj. BNT, SST i TST) nie korelują ze stopniem przegniecenia (CRS), co udowadnia, że dla niskich fal zgniecenie ma mniejsze znaczenie niż dla tektur z wyższą falą. Natomiast doskonała korelacja pomiędzy spadkiem



Rys. 5. Liniowa regresja pomiędzy zdegradowanymi parametrami a zgnieceniem dla indeksu tekstury 3E440A1



Rys. 6. Liniowa regresja pomiędzy zdegradowanymi parametrami a zgnieceniem dla indeksu tekstury 5EB670A1

szywności w teście SST a stopniem zgniecenia CRS, pokazana na rysunkach 4 i 6, wskazuje na przewagę tego testu nad testami BNT czy TST jako metody do określania stopnia zgniecenia przekroju tekstury falistej. W tabeli 2 pokazano średnie procentowe spadki wszystkich mierzonych wielkości w zależności od stopnia zgniecenia przekroju tekstury falistej dla indeksu 5BC480A1. Wartość pomiaru wysokości przekroju, wykonanego kilka minut po teście, jest dwa (dla 70% zgniecenia) do pięciu (dla 10% zgniecenia) razy mniejsza od faktycznego stopnia przegniecenia, co jest charakterystyczne dla tekstury. Dla większości indeksów tekstury

wartości sztywności BNT, SST i TST, mierzone przy różnym stopniu zgniecenia, dobrze korelują z przegnieceniem (oznaczonym jako CRS). W tabeli 2 można zaobserwować doskonałą korelację spadku sztywności SST w obu kierunkach oraz dobrą korelację pomiędzy spadkami sztywności BNT i TST w obu kierunkach a stopniem zgniecenia CRS tekstury falistej.

W celu porównania zależności między stopniem zgniecenia a degradacją poszczególnych parametrów wyznaczono współczynnik korelacji dla każdej wielkości, zdefiniowany wzorem:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{y}_i)^2}{(n-1)var(x)} \times 100\% \quad (7)$$

gdzie: x_i – stopień zgniecenia CRS (10, 20, ..., 70 %), $var(x)$ – wariancja zgniecenia, \hat{y}_i wartości wyliczone na podstawie wzoru opisującego liniową regresję:

$$\hat{y}_i = b(x_i - \bar{x}) + \bar{y} \quad (8)$$

gdzie: \bar{x} – wartości średnia stopnia zgniecenia, \bar{y} – wartość średnia mierzonych wielkości (np. $y = ECT$, $y = BNT-MD$, itd.),

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Im wyższa jest wartość współczynnika korelacji R^2 , tym dopasowanie krzywej regresji jest lepsze. Przyjęto, że wartość wyższa od 90% daje doskonałą korelację pomiędzy wartością zmierzonej degradacji danej wielkości a wartością zgniecenia. Wyniki zestawiono w tabeli 3 i 4.

W tabeli 4 zestawiono wartości współczynników korelacji dla uśrednionej (z dwóch kierunków) degradacji sztywności BNT, SST i TST. W tabelach zaznaczono komórki, w których wartość współczynnika R^2 jest doskonała (wyższa od 90%).

W tabeli 5 zestawiono procentowe współczynniki korelacji pomiędzy degradacją ECT a permanentnym zgnieceniem (wysokością przekroju po odprężeniu). W większości przypadków (z wyjątkiem fali E) można zaobserwować dobrą lub bardzo dobrą korelację tych dwóch wielkości.

Wnioski i podsumowanie

W pracy przedstawiono wpływ kontrolowanego zgniecenia przekroju tekstury falistej na wyniki eksperymentalne wybranych testów laboratoryjnych. Niestety, stopień zgniecenia tekstury w trakcie np. kaszerowania czy zadrukowywania nie jest w żaden sposób kontrolowany, dlatego tak ważnym zadaniem jest znalezie-



Tabela 2. Procentowe spadki zmierzonych wielkości dla poszczególnych stopni zgniecenia (pierwsza kolumna) dla indeksu tektury 5BC480A1

| CRS | THK | ECT | BNT-MD | BNT-CD | SST-MD | SST-CD | TST-MD | TST-CD |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |
| 9,9% | 1,9% | 7,2% | 19,5% | 12,3% | 2,2% | 8,8% | 16,5% | 0,2% |
| 20,0% | 5,0% | 13,2% | 23,3% | 12,8% | 24,9% | 22,7% | 34,7% | 18,6% |
| 29,9% | 9,7% | 19,2% | 39,0% | 31,0% | 32,2% | 37,3% | 49,5% | 33,7% |
| 40,0% | 16,3% | 24,2% | 64,3% | 36,2% | 42,5% | 47,0% | 64,9% | 36,8% |
| 50,0% | 20,9% | 23,1% | 82,9% | 46,7% | 54,4% | 52,1% | 72,3% | 42,1% |
| 59,9% | 29,1% | 31,0% | 74,4% | 51,1% | 63,6% | 60,9% | 76,7% | 53,0% |
| 70,0% | 34,9% | 38,6% | 83,4% | 60,5% | 71,7% | 64,8% | 81,1% | 60,2% |

Tabela 3. Współczynniki korelacji R² regresji liniowej pomiędzy zgnieceniem a pomiarami

| indeks | THK | ECT | BNT-MD | BNT-CD | SST-MD | SST-CD | TST-MD | TST-CD |
|--------|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3B285 | 15% | 48% | 95% | 70% | 99% | 96% | 91% | 93% |
| 3B410 | 1% | 60% | 99% | 69% | 100% | 99% | 53% | 99% |
| 3C340 | 11% | 2% | 45% | 86% | 70% | 100% | 54% | 99% |
| 3C440 | 0% | 45% | 97% | 84% | 85% | 100% | 29% | 97% |
| 3E285 | 0% | 79% | 15% | 32% | 0% | 43% | 58% | 54% |
| 3E440 | 0% | 59% | 4% | 16% | 0% | 0% | 44% | 0% |
| 5BC480 | 0% | 30% | 59% | 96% | 99% | 99% | 57% | 95% |
| 5BC580 | 1% | 30% | 90% | 92% | 98% | 100% | 70% | 88% |
| 5EB560 | 0% | 0% | 98% | 73% | 99% | 96% | 73% | 89% |
| 5EB670 | 0% | 0% | 92% | 79% | 99% | 96% | 68% | 94% |

Tabela 4. Współczynniki korelacji R² regresji liniowej pomiędzy zgnieceniem a uśrednionymi pomiarami

| indeks | BNT | SST | TST |
|--------|------|------|------|
| 3B285 | 88% | 98% | 100% |
| 3B410 | 89% | 100% | 84% |
| 3C340 | 77% | 95% | 88% |
| 3C440 | 97% | 96% | 74% |
| 3E285 | 27% | 26% | 56% |
| 3E440 | 10% | 0% | 22% |
| 5BC480 | 95% | 99% | 95% |
| 5BC580 | 100% | 100% | 99% |
| 5EB560 | 89% | 99% | 98% |
| 5EB670 | 87% | 99% | 97% |

nie metody szacowania stopnia przegniatania materiału w trakcie tych procesów. Szczególnie, że wpływ przegniecenia na nośność opakowania może być kluczowym problemem w procesie projektowania, kontroli jakości czy rozpatrywania reklamacji.

Wykazano, że zgniatacie przekroju tektury falistej wyraźnie wpływa na wszystkie wybrane i zbadane parametry. Zależność

opisująca wpływ procentowego przegniecenia próbek na procentowy spadek każdej z mierzonych wielkości jest liniowa. Niestety, zależność między grubością tektury zmierzoną po zgnieceniu a faktycznym przegnieceniem nie jest wprost proporcjonalna, dlatego nie może być bezpośrednio wykorzystana do oceny stopnia zgniecenia. Na podstawie przeprowadzonych badań można zaobserwować, że do określania stopnia przegniecenia tektury falistej wskutek procesów produkcyjnych

najlepiej nadają się testy wykorzystywane do wyznaczania sztywności (BNT, TST i SST). Najbardziej precyzyjnym badaniem laboratoryjnym do oszacowania stopnia zgniecenia tektury dla

Tabela 5. Współczynniki korelacji R² regresji liniowej pomiędzy wysokością zgniecionego przekroju po odprężeniu a wartością odporności na zgniatacie kolumnowe przegnieczonej tektury

| indeks | ECT |
|--------|-----|
| 3B285 | 88% |
| 3B410 | 56% |
| 3C340 | 91% |
| 3C440 | 55% |
| 3E285 | 0% |
| 3E440 | 0% |
| 5BC480 | 84% |
| 5BC580 | 90% |
| 5EB560 | 97% |
| 5EB670 | 94% |



większości indeksów tektur (z wyjątkiem fali E) wydaje się być test SST. Dodatkowo określanie stopnia zgniecenia tektury na podstawie testów sztywności jest bardziej precyzyjne gdy do obliczania regresji liniowej wykorzystuje się średnią wartość z kierunku MD i CD.

Niestety, tektura falista z falą E, z uwagi na niewielką grubość i wysoką wytrzymałość na zgniatanie płaskie, jest najmniej wrażliwa na przegniatanie, przez co korelacje pomiędzy zmierzonym spadkiem wartości referencyjnych we wszystkich przeprowadzonych testach a przegniaceniem są trudne do identyfikacji.

W kolejnej części publikacji nt. komputerowego wspomaganie w procesie wyznaczania nośności opakowań z tektury falistej autorzy przeanalizują wpływ parametrów materiałowych tektury na wyniki analizy wrażliwości wybranych testów laboratoryjnych, co pozwoli lepiej zrozumieć otrzymane tutaj wyniki.

Badania naukowe finansowane przez firmę Aquila Września Sp. z o.o.

Artykuł recenzowany

*Przysłany do redakcji 10.06.2018,
zakwalifikowany do druku 22.06.2018*

LITERATURA

- [1] Baum G.A., Habeger C., Fleischman H. 1981. "Measurement of the orthotropic elastic constants of paper", IPC technical paper series number 117.
- [2] Biancolini M.E., Brutti C. 2003. „Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages”. *Packaging Technology and Science* 16, 47–60.
- [3] Biancolini M.E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Composite Structures* 69 : 322–328.
- [4] Garbowski T., Borysiewicz A. 2014. „The stability of corrugated board packages”. *Przegląd Papierniczy* 70 (8) : 452-458.
- [5] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity analysis of edge crush test". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [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., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of corrugated paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [9] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of corrugated paperboard. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [10] Garbowski T., Maier G., Novati G. 2012. "On calibration of orthotropic elastic-plastic constitutive models for paper foils by biaxial tests and inverse analyses". *Struc. Multidisciplinary Optimization* 46 : 111-128.
- [11] Garbowski T., Przybyszewski G. 2015. "The Sensitivity analysis of critical force in box compression test". *Przegląd Papierniczy* 71 (5) : 275-280.
- [12] Isaksson P., Gradin P. 2009. "Shear buckling in the core of a corrugated board structure". *Composite Structures* 88 : 610–614.
- [13] Nordstrand T. 2004. "Analysis and testing of corrugated board panels into the post-buckling regime". *Composite Structures* 63 : 189–199.
- [14] Xia Q.S., Boyce M.C., Parks D.M. 2002 "A constitutive model for the anisotropic elasticplastic deformation of paper and paperboard". *Int. J. Solids Structures* 39 : 4053-4071.