



Komputerowo wspomagane wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej

Cz. 2. Analiza wrażliwości w wybranych testach laboratoryjnych tektury falistej

Computer aided estimation of corrugated board box compression strength

Part 2. The sensitivity analysis in selected laboratory tests of corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI, LUCYNA GARBOWSKA

DOI: 10.15199/54.2018.8.1

W procesie numerycznego (komputerowego) wyznaczenia nośności opakowań z tektury falistej bardzo ważnym krokiem jest precyzyjne wyznaczenie parametrów materiałowych tektury. Ponieważ tektura falista jest materiałem charakteryzującym się dużą heterogenicznością, ortotropią oraz wyraźną zależnością od wilgotności i temperatury, określenie jej mechanicznych parametrów wymaga wykonania wielu testów laboratoryjnych. W zależności od wybranego modelu konstytutywnego, opisującego tekturę falistą, ilość parametrów niezbędnych do jej poprawnego określenia waha się od kilku do kilkudziesięciu. W niniejszej pracy wykorzystano analizę wrażliwości, pozwalającą ocenić jakościowo i ilościowo, które testy laboratoryjne mogą posłużyć do wyznaczenia podstawowych parametrów tektury falistej. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, wykonanych z wykorzystaniem modeli analityczno-numerycznych następujących testów: BNT – sztywność w teście czteropunktowego zginania, ECT – test krawędziowego zgniatania, TST – test skręcania tektury oraz SST – test skręcania ze ścinaniem transversalnym tektury. W pracy porównano i zestawiono wrażliwości wyników pomiarów wybranych testów laboratoryjnych na drobne zmiany podstawowych parametrów mechanicznych tektury oraz na zmiany wymiarów próbek. Przedstawione wyniki pozwalają jednoznacznie ocenić przydatność typowych oraz nowych lub zmodyfikowanych testów laboratoryjnych w procesie identyfikacji parametrów materiałowych tektury.

W kolejnej pracy autorzy przedstawią metody identyfikacji parametrów materiałowych tektury falistej, opartych na wybranych testach laboratoryjnych, symulacjach komputerowych oraz analizach odwrotnych (ang. inverse analysis).

Słowa kluczowe: tektura falista, analiza wrażliwości, parametry mechaniczne, testy laboratoryjne

In the numerical (computer) process of determining the load-bearing capacity of corrugated board packaging, a very important step is the precise determination of the material parameters of the board. Because corrugated cardboard is a material characterized by high heterogeneity, orthotropy and a clear dependence on humidity and temperature, the determination of its mechanical parameters requires many laboratory tests. Depending on the chosen constitutive model describing the corrugated cardboard, the number of parameters necessary for its correct description varies from several to a few dozen. In this work, a sensitivity analysis was used to assess qualitatively and quantitatively which laboratory tests can be used to determine the basic parameters of corrugated board. The results of computer simulations made with the use of analytical and numerical models of the following tests are presented: BNT – stiffness in the four-point bending test, ECT – edge crush test, TST – cardboard twisting test and SST – cross-cutting corrugation test. The work compares the sensitivity of measurements of selected tests to minor perturbations of the basic mechanical parameters of cardboard. The presented results allow to unambiguously assess the usefulness of typical and new laboratory tests in the process of identification of cardboard material parameters. In the next paper, the authors will present a method to identify material parameters of corrugated board, based on selected laboratory tests, computer simulations and inverse analysis.

Keywords: corrugated board, sensitivity analysis, mechanical properties, laboratory tests

Dr inż. **T. Garbowski** (tomasz.garbowski@put.poznan.pl), Politechnika Poznańska, Centrum Mechatroniki, Biomechaniki i Nanoinżynierii, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań;
mgr **L. Garbowska** (lucyna.garbowska@femat.biz), FEMat Sp. z o.o., ul. Romana Maya 1, 61-371 Poznań



Wprowadzenie

Numeryczne symulacje wytrzymałościowe skomplikowanych konstrukcji maszyn, komputerowe testy zderzeniowe (*crash test*) nowych konstrukcji pojazdów czy też wirtualne prototypowanie nowatorskich urządzeń jest standardem, który funkcjonuje w przemyśle od kilkudziesięciu lat. Ciągły rozwój metod numerycznych pozwolił na stopniową ekspansję technik komputerowych również na inne, bardziej wymagające dziedziny przemysłu. Rosnąca potrzeba wykonywania coraz dokładniejszych obliczeń z wykorzystaniem coraz bardziej zaawansowanych modeli to w dzisiejszych czasach główny bodziec mobilizujący naukowców i inżynierów do intensywniejszej pracy nad rozwojem technik numerycznych. Jedną z dziedzin, która w dużym stopniu stymuluje wielu naukowców [2, 4, 7, 8, 14], jest, bez wątpienia, przemysł produkcji opakowań z tektury falistej, gdzie w jednym produkcie, jakim jest np. opakowanie SRP/RRP, zawarte są:

- skomplikowany opis materiałowy tektury [3, 13], który powinien uwzględnić periodyczność warstw pofalowanych [9, 10], ortotropię warstw składowych paneli [11, 15], wpływ przegniecenia (szczegółowo opisany w poprzedniej pracy [5]), wpływ wilgotności i temperatury itp.;
- często nietuzinkowa konstrukcja opakowania, w którym należy uwzględnić wzajemne interakcje pomiędzy panelami, wpływ otworów, bigów, zamków itp.;
- trudne warunki składowania lub transportu – wpływ długotrwałych wstrząsów i drgań, zmiany temperatury i/lub wilgotności;
- zachowanie wymaganej odporności na uszkodzenia mechaniczne.

Wynika z tego, że do odpowiedniego wykorzystania nowych technik komputerowego wyznaczania nośności opakowań z tektury należy: opracować poprawny model numeryczny opakowania; wyznaczyć podstawowe parametry materiałowe tektury zarówno przed jak i po procesach produkcyjnych w środowisku laboratoryjnym (normowym) i/lub w środowisku transportu/składowania oraz określić warunki brzegowe (działające obciążenia, odporność mechaniczną). Po przeprowadzeniu czynności prowadzących do zbudowania modelu numerycznego, proces optymalizacji konstrukcji oraz prototypowania staje się bardzo prosty i szybki. W odróżnieniu od metody komputerowej, metoda szacowania nośności opakowania bez pomocy komputerowych technik obliczeniowych jest niezmiernie trudna, wiąże się z wykonaniem wielu testów (co prowadzi do wydłużenia procesu projektowania i prototypowania) oraz często z wprowadzeniem współczynników bezpieczeństwa, (co prowadzi do zwiększenia kosztów produkcji).

W niniejszej pracy autorzy skupili swoją uwagę na metodach doboru odpowiednich zestawów testów laboratoryjnych niezbędnych do poprawnego wyznaczenia podstawowych parametrów materiałowych tektury falistej. W tym celu wykorzystano analizę

wrażliwości [6, 12], dzięki której możliwe było sprawdzenie wpływu poszczególnych parametrów na wyniki wybranych testów. Im wyższa wrażliwość testu na perturbowany parametr, tym większa szansa na jego wyznaczenie w procesie identyfikacji. Jest to szczególnie istotne, gdy pomiary laboratoryjne nie mogą być bezpośrednio wykorzystane do wyznaczenia szukanych parametrów.

Analiza wrażliwości w wybranych testach laboratoryjnych

W celu poprawnego zidentyfikowania materiału, jakim jest tektura falista, niezbędne jest wykonanie serii testów laboratoryjnych. Najbardziej podstawowy zestaw parametrów potrzebny do opisu konstytutywnego tektury falistej w zakresie sprężystym, to:

- D_{11} – sztywności na zginanie w kierunku MD,
 - D_{22} – sztywność na zginanie w kierunku CD,
 - D_{33} – sztywność na skręcanie,
 - A_{11} – sztywność na ściskanie w kierunku MD,
 - 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.
- Wielkości te występują w równaniach konstytutywnych, opisujących elementy powłokowe (*shell elements*):

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

i można je przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$D_{11} = E_1 \cdot \frac{t^3}{12}; D_{22} = E_2 \cdot \frac{t^3}{12}; D_{12} = D_{22} \nu_{12}; D_{33} = G_{12} \cdot \frac{t^3}{12}; \quad (2a)$$

$$A_{11} = E_1 t; A_{22} = E_2 t; A_{12} = A_{22} \nu_{12}; R_4 = G_{13} t; R_5 = G_{23} t \quad (2b)$$

gdzie:

- t – zastępcza grubość tektury,
- E_1 – moduł sztywności w kierunku MD,
- E_2 – moduł sztywności w kierunku CD,
- $\nu_{12} = 0.293 \sqrt{E_1/E_2}$ – współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2 [1],
- G_{12} – moduł sztywności na ścinanie w płaszczyźnie 1-2,
- G_{13} – moduł sztywności na ścinanie transwersalne w płaszczyźnie 1-3,
- G_{23} – moduł sztywności na ścinanie transwersalne w płaszczyźnie 2-3.

Wielkości te tworzą zestaw parametrów materiałowych i można je też wyznaczyć na podstawie zmierzonych sztywności, korzystając z wzorów przedstawionych w pracy [5].

W celu sprawdzenia wrażliwości wyników testów laboratoryjnych na niewielkie perturbacje parametrów materiałowych lub, innymi słowy, w celu sprawdzenia, które parametry są aktywne i w jakim stopniu wpływają na wyniki poszczególnych badań eksperymentalnych, wybrano 7 testów laboratoryjnych:



sztywność na zginanie w kierunku MD
 sztywność na zginanie w kierunku CD
 sztywność na skręcanie w kierunku MD
 sztywność na skręcanie w kierunku CD
 sztywność na skręcanie w kierunku MD
 sztywność na skręcanie w kierunku CD
 odporność na zginanie kolumnowe

BNT1 $\rightarrow f(D_{22}, R_4)$
 BNT2 $\rightarrow f(D_{11}, R_5)$
 TST1 $\rightarrow f(D_{33}, R_4)$
 TST2 $\rightarrow f(D_{33}, R_5)$
 SST1 $\rightarrow f(D_{33}, R_4, R_5)$
 SST2 $\rightarrow f(D_{33}, R_4, R_5)$
 ECT $\rightarrow f(A_{22})$

Z tego zestawienia wynika, że nie wszystkie szukane parametry są aktywne w wybranych testach, np. w teście ECT aktywna jest tylko sztywność na ściskanie w kierunku CD – A_{22} , a w teście SST1 aktywna jest sztywność na skręcanie D_{33} oraz obie sztywności na ścinanie transwersalne R_4 i R_5 . "Stopień aktywności" danych parametrów w wybranych testach zależy od wymiarów próbki. Przeprowadzona analiza wrażliwości miała też na celu m.in. wskazanie, jakie wymiary próbek w poszczególnych testach będą najbardziej optymalne w procesie identyfikacji parametrów tektury falistej.

W analizie wrażliwości głównym celem jest oszacowanie wpływu parametrów modelu na wyniki symulacji. Aby wyznaczyć te zależności, zbudowano siedem modeli numerycznych, za pomocą których symulowane były poszczególne testy, dzięki czemu możliwe było sprawdzenie zależności między parametrami materiałowymi a mierzonymi wielkościami. We wszystkich testach mierzone było ugięcie próbki (u), powstałe na skutek przyłożonej jednostkowej siły ($P = 1$). Np. w symulacji testu zginania w kierunku MD (BNT1) mierzony był stosunek $k = P/u = 1/u$, a parametrami modelu były odpowiednio: sztywność na zginanie w kierunku MD – D_{22} ; sztywność na ścinanie transwersalne w płaszczyźnie 1-3 – R_4 ; długość próbki – L . W każdej analizie perturbowano tylko parametry materiałowe (przy stałej geometrii próbki); każdy parametr zmieniano o 1% i sprawdzano wpływ zadanej perturbacji na wyniki pomiaru, zgodnie ze wzorem:

$$s_i = \left(1 - \frac{k_i}{k_{ref}} \right) \quad (3)$$

gdzie k_{ref} jest pomiarem referencyjnym (bez perturbacji).

Jak już wspomniano, wymiary próbki były przyjęte a priori i nie podlegały perturbacjom. W sumie analizie poddano 6 popularnych indeksów tektury, zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Indeksy tektury falistej

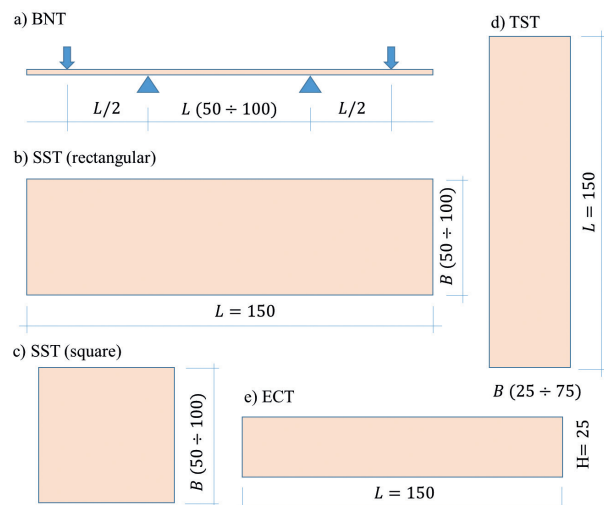
Fala (Flute)	Wysokość (Height) [mm]	Podziałka (Take up) [mm]	Gramatura (Grammage) [g/m ²]
F	0,75	1,22	260-520
E	1,15	1,24	260-520
B	2,50	1,31	260-520
C	3,66	1,42	260-520
BE	3,70	1,24/1,31	430-860
BC	6,20	1,31/1,42	430-860

Wartości gramatury indeksów tektury otrzymano poprzez losowe dobieranie gramatury warstw płaskich i pofalowanych złożenia. Założono, że gramatura warstw płaskich oscyluje między wartościami 90 a 180 g/m², natomiast warstw pofalowanych między 80 a 160 g/m².

Do wyznaczenia wartości wrażliwości w wybranych testach laboratoryjnych dla poszczególnych indeksów tektury wykorzystano tysiąc stochastycznie wygenerowanych numerycznych modeli, np. dla fali F mogły być wylosowane następujące indeksy: 3F320 [T3-120, W-80, T3-120] lub 3F355 [T3-140, W-80, T3-135] itp. Po każdej zmianie wymiarów próbki proces był powtarzany i ponownie perturbowano parametry materiałowe dla tysiąca wygenerowanych losowo próbek wybranego indeksu. W ten sposób uzyskano w pełni stochastyczną mapę wrażliwości w wielu wybranych punktach przestrzeni parametrów.

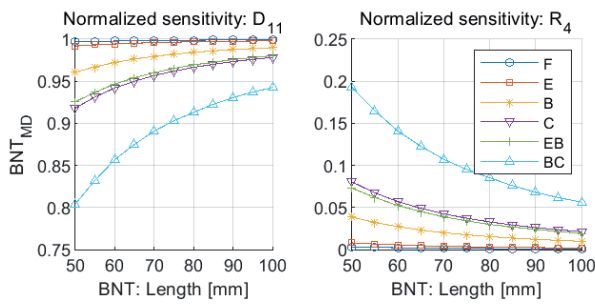
Zestawienie wyników

Zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy wrażliwości dla wszystkich sześciu indeksów tektury. W pierwszej kolejności przyjęto różne wymiary próbek, a następnie wygenerowano tysiąc różnych przypadków złożenia dla poszczególnych indeksów. W ostatnim etapie analizy perturbowano po kolei każdy parametr materiałowy tektury i sprawdzano, jaki wpływ wywiera dana zmiana na wyniki mierzonego przemieszczenia. Wymiary próbek pokazano na rysunku 1.

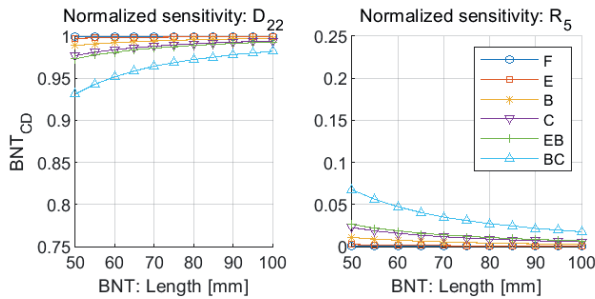


Rys. 1. Wymiary próbek

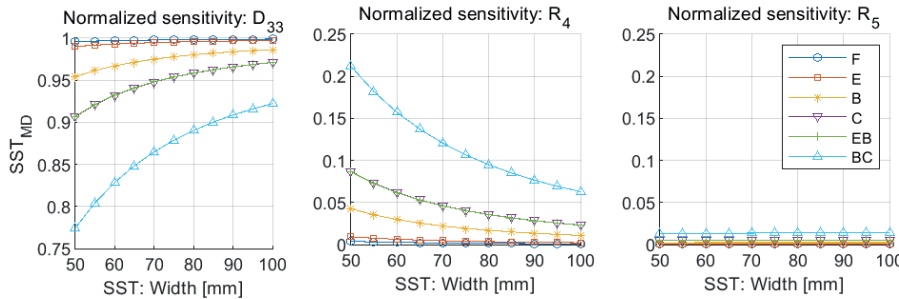
Na rysunku 2 pokazano wyniki analizy wrażliwości w teście BNT1 (test czteropunktowego zginania w kierunku MD) w zależności od sztywności na zginanie D_{11} oraz sztywności na ścinanie poprzeczne R_4 . Można zauważyć, że wraz ze zmianą długości L próbki, zmienia się również „ilość wpływu” parametrów D_{11} i R_4 na wyniki obliczanego przemieszczenia, np. dla $L = 50$ dla indek-



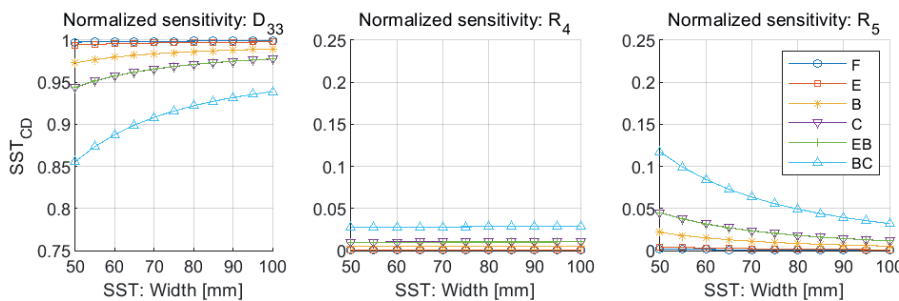
Rys. 2. Wrażliwość w teście BNT1. Próbka o długości $L = 50 \div 100$ mm



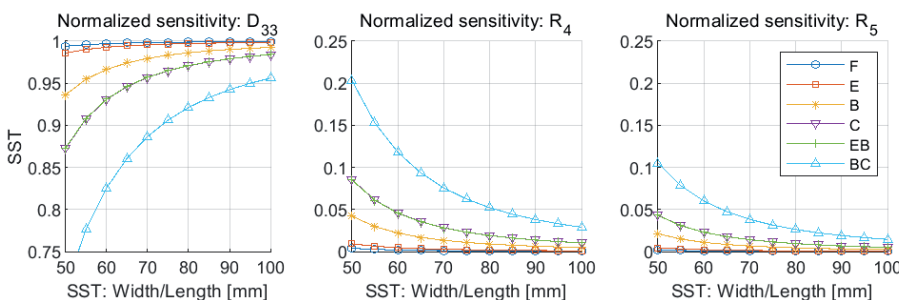
Rys. 3. Wrażliwość w teście BNT2. Próbka o długości $L = 50 \div 100$ mm



Rys. 4. Wrażliwość w teście SST1. Próbka prostokątna o wymiarach $L = 150$ mm, $B = 50 \div 100$ mm



Rys. 5. Wrażliwość w teście SST2. Próbka prostokątna o wymiarach $L = 150$ mm, $B = 50 \div 100$ mm

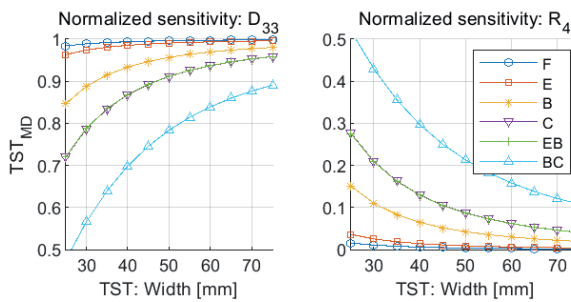


Rys. 6. Wrażliwość w teście SST. Próbka kwadratowa o wymiarach $B = L = 50 \div 100$ mm

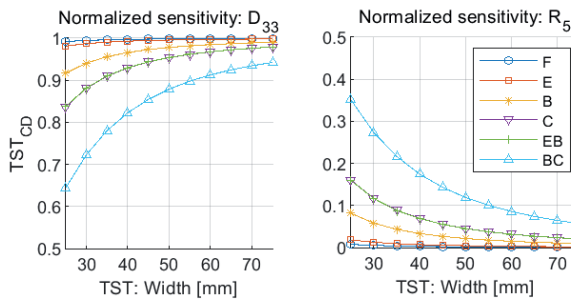
su 5BC ugięcie zależy w $\sim 80\%$ od sztywności na zginanie D_{11} , a w $\sim 20\%$ od sztywności na ścinanie R_4 . Dla indeksów 3E i 3F nie zauważono znaczącego wpływu zmiany długości na zmiany wrażliwości; dla tych indeksów, bez względu na wymiary próbek, ok. 97-99% ugięcia zależała od sztywności na zginanie D_{11} . Dla indeksów 3C oraz 5EB ugięcie zależało od sztywności na ścinanie R_4 , w $\sim 3\%$ (dla $L = 100$ mm) i $\sim 9\%$ (dla $L = 50$ mm).

Podobnie można interpretować wyniki zestawione na rysunkach 3-8. W przeprowadzonych analizach nie sprawdzano wpływu wymiarów próbki ECT na wyniki testów, ponieważ w tym teście 100% mierzonego ugięcia zależy od sztywności na ściskanie w kierunku CD – A_{22} (założono, że wyoboczenie nie wpływa na wyniki testów).

Na rysunkach 4 i 5 można zaobserwować, że zmiana szerokości próbki nie zmienia wrażliwości w testach SST na ścinanie poprzeczne wzdłuż długości (R_5 dla kierunku MD oraz R_4 w kierunku CD). Natomiast na rysunku 6 wyraźnie widać, że zmiana szerokości kwadratowej próbki w teście SST ma wyraźny wpływ na zmiany wrażliwości względem wszystkich aktywnych parametrów, np. dla indeksu 3B (szerokość próbki $B = 50$ mm) mierzone ugięcie próbki zależy w $\sim 88\%$ od sztywności na skręcanie D_{33} , w $\sim 5\%$ od sztywności na ścinanie R_4 i w $\sim 3\%$ od sztywności na ścinanie R_5 .



Rys. 7. Wrażliwość w teście TST1. Próbką o wymiarach $L = 150$ mm, $B = 25 \div 75$ mm



Rys. 8. Wrażliwość w teście TST2. Próbką o wymiarach $L = 150$ mm, $B = 25 \div 75$ mm

W tabelach 2-7 zestawiono wyniki analizy wrażliwości wszystkich sześciu indeksów tektury dla wybranego wymiaru próbek: ECT, 25×100 mm; SST, 50×50 mm; TST, 30×150 mm; BNT, $L = 100$ mm.

Tabela 2. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 3F

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1,000			
TST1				0,991	0,009	
TST2				0,996		0,004
SST1				0,995	0,003	0,001
SST2				0,995	0,003	0,001
BNT1	0,999				0,001	
BNT2		1,000				0,000

Tabela 3. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 3E

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1,000			
TST1				0,980	0,020	
TST2				0,990		0,009
SST1				0,989	0,007	0,003
SST2				0,989	0,007	0,003
BNT1	0,998				0,002	
BNT2		1,000				0

Tabela 4. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 3B

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1,000			
TST1				0,911	0,088	
TST2				0,956		0,043
SST1				0,951	0,033	0,015
SST2				0,951	0,033	0,015
BNT1	0,992				0,008	
BNT2		0,998				0,002

Tabela 5. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 3C

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1			
TST1				0,829	0,169	
TST2				0,911		0,087
SST1				0,901	0,066	0,031
SST2				0,901	0,066	0,031
BNT1	0,984				0,016	
BNT2	0	0,996				0,004

Tabela 6. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 5EB

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1,000			
TST1				0,826	0,171	
TST2				0,912		0,086
SST1				0,9	0,067	0,031
SST2				0,9	0,067	0,031
BNT1	0,985				0,014	
BNT2		0,995				0,005

Tabela 7. Wyniki analizy wrażliwości w wybranych testach dla indeksu 5BC

	D_{11}	D_{22}	A_{22}	D_{33}	R_4	R_5
ECT			1,000			
TST1				0,629	0,366	
TST2				0,785		0,212
SST1				0,761	0,160	0,075
SST2				0,761	0,160	0,075
BNT1	0,957				0,042	
BNT2		0,988				0,012



Wnioski i podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy wrażliwości wybranych testów laboratoryjnych. Przygotowano analityczno-numeryczne modele do symulacji czterech testów laboratoryjnych: BNT – test zginania, TST – test skręcania, SST – test skręcania ze ścinaniem, ECT – test zgniatania krawędziowego. W testach (w różnym stopniu) aktywne są wybrane parametry materiałowe (A_{22} , D_{11} , D_{22} , D_{33} , R_4 , R_5). Celem pracy było sprawdzenie, jaki wpływ na wyniki testów mają poszczególne sztywności. Dodatkowo sprawdzono wpływ wymiarów próbek laboratoryjnych na wyniki testów i na ich wrażliwość. Z przeprowadzonych analiz wynika, że dla tektur o niskim przekroju (tj. 3E, 3F), bez względu na wymiary próbki, wyniki poszczególnych testów zależą w stopniu nie większym niż 1-2% od sztywności na ścinanie R_4 i R_5 , co świadczy o tym, że laboratoryjne określenie tych parametrów może być trudne lub niemożliwe. Dla indeksu 3B procentowy udział sztywności na ścinanie waha się w przedziale 4-8% dla testów TST i 2-4% dla testów SST. Dla indeksów 3C i 5EB wartości te rosną do 9-17% (TST) i 3-7% (SST), natomiast dla indeksu 5BC osiągają odpowiednio 21-37% (TST) i 8-16% (SST). Im wyższy procentowy wpływ parametru na wyniki testu (tj. im wyższa wrażliwość testu na wybrany parametr), tym większa szansa na poprawne wyznaczenie danego parametru na podstawie analizowanego wyniku testu.

Wykazano, że wyznaczenie podstawowych parametrów materiałowych tektury z wykorzystaniem wybranych testów laboratoryjnych jest możliwe, a dokładność identyfikacji w dużym stopniu zależy od odpowiedniego doboru wymiaru próbek.

Artykuł recenzowany
Przysłany do redakcji 17.08.2018,
zakwalifikowany do druku 27.08.2018

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., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. „Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 1. The influence of flute crush on basic proper ties of corrugated board”. *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388.
- [6] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity analysis of edge crush test". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of corrugated paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [10] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of corrugated paperboard. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [11] Garbowski T., Maier G., Novati G. 2012. "On calibration of orthotropic elastic-plastic constitutive models for paper foils by biaxial tests and inverse analyses". *Structural and Multidisciplinary Optimization* 46 : 111-128.
- [12] Garbowski T., Przybyszewski G. 2015. "The Sensitivity analysis of critical force in box compression test". *Przegląd Papierniczy* 71 (5) : 275-280.
- [13] Isaksson P., Gradin P. 2009. "Shear buckling in the core of a corrugated board structure". *Composite Structures* 88 : 610-614.
- [14] Nordstrand T. 2004. "Analysis and testing of corrugated board panels into the post-buckling regime". *Composite Structures* 63 : 189-199.
- [15] 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.