



Najczęściej popełniane błędy podczas szacowania nośności opakowań z tektury falistej

The most common mistakes when estimating the load-bearing capacity of corrugated board packaging

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2023.9.1

W pracy przedstawiono pokrótce główne błędy, które najczęściej pojawiają się w procesie szacowania nośności opakowań z tektury falistej. Wiążą się one z nieprawidłowym określeniem współczynników korygujących, zarówno tych poprawiających bezpieczeństwo poprzez zwiększenie wymaganej nośności, jak i tych, które wyraźnie obniżają parametry mechaniczne tektury falistej, a w konsekwencji wartość szacunkowej nośności opakowania z tektury falistej. Niezależnie od tego, jak ostatecznie jest weryfikowana nośność opakowania, prawidłowe oszacowanie współczynników bezpieczeństwa a także współczynników korygujących jest kluczowe w procesie dążenia do zrównoważonego rozwoju branży opakowań z tektury falistej.

Słowa kluczowe: tektura falista, wytrzymałość pudeł, współczynniki korygujące

The work briefly shows the main errors that most often appear in the process of estimating the load-bearing capacity of corrugated board packaging. They are related to the incorrect determination of correction factors, both those that increase safety by increasing the required load-bearing capacity, and those that clearly reduce the mechanical parameters of corrugated board and, consequently, the value of the estimated load-bearing capacity of the packaging. Regardless of how the load-bearing capacity of the packaging is ultimately verified, the correct estimation of safety factors and correction factors is crucial in the process of achieving sustainable development of the corrugated packaging industry.

Keywords: corrugated board, strength of boxes, correction factors

Wprowadzenie

Każdy poważny zakład zajmujący się przerobem tektury falistej ma wdrożone pewne standardy i procedury doboru optymalnej tektury do produkcji opakowań. W większych korporacjach dokonują tego, zatrudnieni w scentralizowanych komórkach, doświadczeni

projektanci. Oprócz umiejętności związanych z projektowaniem różnych geometrii opakowania, posiadają oni także podstawową wiedzę na temat wytrzymałości materiałów. Inni producenci opakowań desygnują do tego zadania pracowników kontroli jakości lub doświadczonych pracowników laboratorium, którzy każdego dnia mają do czynienia z tekturą falistą, wykonując dziesiątki badań wytrzymałościowych tektury i opakowań. W jeszcze innych firmach powstały specjalne jednostki przy działach zarządzania produkcją, odpowiedzialne za dobór najlepszych papierów do wytworzenia tektury falistej przeznaczonej na opakowania. Jednakże nawet najbardziej doświadczony projektant, czy pracownik działu jakości czasami wpada w pułapki rutyny, co może prowadzić do kosztownych błędów. Czasami są to zwykle pomyłki, a czasami wieloletnie, systematyczne błędy, które po prostu nigdy nie ujawniły się żadnym poważnym kryzysem. W niniejszym artykule podjęto próbę ostrzeżenia osób zajmujących się doбором jakości do produkcji opakowań z tektury falistej przed czyhającymi pułapkami. Szczególnie, gdy rutyna i wieloletnie doświadczenie zaczynają im przesłaniać (pomimo wyraźnych symptomów) problemy, które prowadzą do błędnych nawyków.

Większość kłopotów związanych z wymiarowaniem i projektowaniem opakowań z tektury falistej nie wynika z geometrii konstrukcji pudeł, tylko z wytrzymałości tektury falistej, która, w odróżnieniu od innych materiałów konstrukcyjnych, zależna jest w dużym stopniu od: warunków atmosferycznych, warunków magazynowania i warunków, w jakich transportowane są opakowania wykonane z konkretnej tektury. Jeżeli na te wszystkie zależności nałoży się dodatkowo silną zależność między statyczną wytrzymałością tektury falistej a np. rodzajem wsadu na poszczególne warstwy, geometrią warstwy pofalowanej, jakością zaklejenia, ilością zadruku, techniką wykroju itp., to



szybko dojdzie się do wniosku, że tektura falista jest bardzo skomplikowanym materiałem.

Skutki skomplikowanych zależności mechanicznych tektury falistej odczuwają nie tylko producenci i przetwórcy, ale każdy, kto kiedykolwiek przeszacował nośność pudła z cennymi faliżankami podczas przeprowadzki w deszczowy dzień, czy też reklamował zniszczoną paczkę kurierską.

Producenci tektury falistej specyfikują swoje materiały, podając gramaturę, grubość czy też np. odporność tektury na zgniatanie krawędziowe, popularnie nazywane w żargonie papierniczym parametrem ECT (od angielskiej nazwy testu – *Edge Crush Test* [14]). Przetwórcy opierają swoje obliczenia wytrzymałościowe na tych specyfikacjach podczas projektowania opakowania. W celu dokładnej estymacji nośności opakowań projektanci mogą posługiwać się prostymi kalkulatorami [1, 2, 6, 7, 10-13, 16, 17] czy też zaawansowanymi narzędziami numerycznymi [3, 8, 9]. Jednakże w obliczu dużej reklamacji, oprócz weryfikacji dokładności formuły, która została wykorzystana do obliczeń nośności, należy jeszcze zweryfikować inne czynniki. W skomplikowanym łańcuszku decyzyjnym pojawiają się przecież inne istotne wyznaczniki, które wpływają na ostateczną wartość nośności opakowania. Są nimi:

- współczynnik korekcyjny wynikający z rodzajów i liczby procesów, przez które przeszła tektura falista w trakcie produkcji opakowania,
- współczynnik bezpieczeństwa związany z warunkami klimatycznymi, w jakich planowany jest transport opakowań,
- współczynnik bezpieczeństwa związany z warunkami magazynowania i czasem transportu,
- współczynnik bezpieczeństwa wynikający ze specyfiki paletowania,
- współczynnik uwzględniający rodzaj transportowanego towaru,
- współczynnik korygujący wartość ECT, wynikającą z rozbieżności między wartością rzeczywistą a specyfikacją techniczną materiału podawaną przez producenta.

Nośność opakowań z uwzględnieniem współczynników bezpieczeństwa

W dalszej części pracy podjęto próbę dokładnego opisanie wszystkich najważniejszych czynników wpływających na ewentualne błędy w trakcie oceny nośności pudła. Pominięto oczywisty błąd oszacowania obciążenia działającego na najbardziej narażone opakowanie, znajdujące się najczęściej na spodzie palety. Obciążenie to zależy od liczby opakowań ustawionych w pojedynczym stosie, tj. znajdujących się nad najniższym położonym pudłem na paletcie, oraz od ciężaru towaru znajdującego się w każdym opakowaniu. Oszacowane w ten sposób obciążenie (podawane w N lub kN, rzadziej w kg – pamiętając, że 1 kN to w przybliżeniu ok. 100 kg)

można interpretować jako teoretyczny wskaźnik określający statyczną nośność opakowania. Rzeczywistą, czy też wymaganą nośność opakowania uzyskuje się zatem z równania:

$$P_T = Q \cdot \gamma_d \cdot \gamma_w \cdot \gamma_t \cdot \gamma_p, \quad (1)$$

gdzie:

$\gamma_d \geq 1$ – współczynnik zwiększający, związany z wpływem dynamiki towaru transportowanego na nośność analizowanego opakowania,

$\gamma_w \geq 1$ – współczynnik zwiększający, związany z wpływem wilgotności i temperatury na nośność opakowania,

$\gamma_t \geq 1$ – współczynnik zwiększający, związany z wpływem czasu magazynowania i rodzaju transportu towaru w analizowanym opakowaniu,

$\gamma_p \geq 1$ – współczynnik zwiększający, związany z wpływem paletowania na nośność opakowania.

W następnym kroku wartość wymaganej nośności opakowania P_T należy zweryfikować statycznym testem zgniatania kolumnowego. Jeżeli uzyskana wartość nośności, zwana w żargonie przetwórców – indeksem BCT (od angielskiej nazwy testu laboratoryjnego – *Box Compression Test* [15]) jest wyższa od wymaganej nośności teoretycznej, to towar transportowany w zaprojektowanym w ten sposób opakowaniu powinien być całkowicie bezpieczny.

Przed omówieniem wpływu poszczególnych współczynników korekcyjnych/bezpieczeństwa, warto dodać, że coraz częściej w procesie projektowania, szczególnie w przypadku powtarzalnych konstrukcji opakowań transportowych do estymacji ich nośności, zamiast lub równoległe do weryfikacji laboratoryjnej, stosuje się różne formuły analityczne [1, 2, 10-12, 16, 17], analityczno-numeryczne [6, 7, 13] lub numeryczne [3, 8, 9]. W przypadku projektowania konstrukcji opakowania opartej na procedurze automatycznego doboru tektury falistej należy dodatkowo uwzględnić kolejne współczynniki, związane z błędem specyfikacji materiałowej oraz wpływem przerobu tektury (nadruk, wykrój, laminacja itp.) na nośność tektury. W celu zobrazowania tej procedury, dla uproszczenia, wybrano najprostszą formułę do estymacji BCT, zwaną krótką formułą McKee [12]:

$$P_{McKee} = \alpha \cdot ECT \cdot \sqrt{hZ}, \quad (2)$$

gdzie:

α – współczynnik korelacji, który należy wyznaczyć na podstawie dopasowania modelu do pewnego wybranego zestawu opakowań (często zapomina się, że współczynnik ten nie jest uniwersalny dla wszystkich rodzajów opakowań),

ECT – wartość nośności tektury falistej na zgniatanie krawędziowe – wartość podawana w specyfikacji przez producenta (optymalnie powinno się tu wykorzystać wartość ECT dokładnie tego materiału, z którego będzie produkowana dana seria opakowań),

h – grubość tektury falistej (bez uwzględnienia wpływu przerobu tektury),

Z – obwód podstawy opakowania ($2L + 2B$).



Nośność opakowania z uwzględnieniem niepewności materiałowych ma zatem postać:

$$P_E = P_{McKee} \cdot \gamma_m \cdot \sqrt{\gamma_n}, \quad (3)$$

gdzie: $\gamma_m \leq 1$ jest współczynnikiem zmniejszającym, który pozwala uwzględnić błędy związane z niezgodnością specyfikacji wartości ECT, podawanej przez producenta, natomiast $\gamma_n \leq 1$ – współczynnikiem zmniejszającym, który pozwala uwzględnić wpływ nadruku, laminacji, rodzaju wykrojnika itp.

Ostatecznie otrzymujemy następującą zależność:

$$BCT \cong Q \cdot \gamma_d \cdot \gamma_w \cdot \gamma_t \cdot \gamma_p = \alpha \cdot ECT \cdot \gamma_m \cdot \sqrt{\gamma_n h Z}, \quad (4)$$

Można z niej bezpośrednio wyznaczyć optymalną tekturę w procesie iteracyjnej maksymalizacji nośności opakowania lub bezpośrednio modyfikując równanie (4) w celu wyznaczenia wartości ECT dla wybranej fali. Na przykład, dla wstępnie przyjętej trzywarstwowej tektury falistej z falą B i założonej a priori grubości $h = 2,5$ mm (która w ogólnym przypadku nie powinna przyjmować stałej wartości, ponieważ zależy od typu i gramatury przyjętych papierów) oraz dla przykładowego opakowania o wymiarach podstawy 200 mm na 200 mm, otrzymujemy:

$$ECT_B = \frac{Q \cdot \gamma_d \cdot \gamma_w \cdot \gamma_t \cdot \gamma_p}{\alpha \cdot \gamma_m \cdot \sqrt{\gamma_n 2.5 \cdot 800}} \quad (5)$$

Współczynnik α może być relatywnie szybko oszacowany na podstawie wielu testów laboratoryjnych i doświadczenia projektantów lub pracowników działu kontroli jakości. Równie łatwo można uzyskać wartość obciążenia Q , które otrzymujemy przez przemnożenie ciężaru jednego opakowania z towarem przez liczbę warstw opakowań w pojedynczym stosie na palecie.

Jednakże oszacowanie pozostałych współczynników nie jest zagadnieniem trywialnym ani łatwym – dobór odpowiednich wartości wymaga dużego doświadczenia, a ich niedoszacowanie może się wiązać z kosztownymi reklamacjami. Dlatego współczynniki te przyjmuje się zazwyczaj z dużym zapasem, co sprawia, że inne niedoszacowania (np. błędnie dobrany współczynnik bezpieczeństwa związany z błędem specyfikacji jest często pomijany).

Wróćmy jednak do głównego wątku tego artykułu, mianowicie do wpływu doboru poszczególnych współczynników na błąd szacowania nośności opakowania. Jak już wspomniano, każdy współczynnik odpowiada za pewne konkretne warunki środowiskowo-transportowe, które bezpośrednio lub pośrednio wpływają na spadek nośności opakowania. Często jednak warunki te nie są znane a priori lub dostępne są jedynie pewne szacunkowe informacje. W takich sytuacjach oszacowanie współczynników korygujących jest nie lada wyzwaniem.

Skupmy się zatem na tych współczynnikach, których oszacowanie jest znacznie prostsze. Do takich należy np. ten który

uwzględni niezgodność rzeczywistej wartości ECT ze specyfikacją producenta. Przyjrzyjmy się nieco bliżej temu problemowi.

Specyfikacja tektury falistej oparta jest zazwyczaj na wartościach średnich ECT, które zostały wyznaczone dla poszczególnych jakości tektur oferowanych przez producenta. Przyjmowanie do obliczeń wartości średniej wiąże się jednak z istotnym błędem, który związany jest z m.in. faktem, że ECT konkretnej tektury falistej zmienia się w zależności od pory roku, w której jest wyprodukowana. Dodatkowo producenci często zmieniają papiery wsadowe do produkcji konkretnej jakości tektury falistej. Jest to związane ze zmianą dostawcy lub brakiem konkretnego papieru w magazynie. Oczywiście zmiany te nie są odnotowywane w specyfikacji. Skutkuje to różnicami, które mogą sięgać 10%. Jeżeli dołożymy do tego zmianę parametrów mechanicznych tektury falistej, które wynikają z różnic wilgotności w różnych porach roku, to różnice między aktualną wartością ECT a tą uśrednioną w specyfikacji mogą już sięgać nawet 20%. Prowadzi to do przypadku, w którym współczynnik korekcyjny γ_m może w ekstremalnych przypadkach osiągać wartość 0,8.

Kolejnym niedocenionym współczynnikiem korekcyjnych (bezpieczeństwa) jest współczynnik γ_m , który uwzględnia zmiany grubości tektury falistej, wynikające z przerobu tektury. Często zapomina się, że zarówno specyfikacja ECT, jak i grubość tektury falistej podawana przez producenta dotyczy tektury świeżo wyprodukowanej i nie uwzględnia procesów przetwórczych, tj. nadruku, laminacji oraz rodzaju wycinania na wykrojnikach płaskich czy rotacyjnych. Wszystkie wymienione procesy zawsze wpływają destrukcyjnie na tekturę, jednakże wpływ ten rzadko uwzględniany jest przez projektantów. W publikacjach [5] przedstawiono sposób estymacji wpływu przegniecenia powstałego w trakcie procesów przetwórczych na parametry mechaniczne tektury falistej. Z pracy tej wynika, że wpływ ten ponownie może sięgać kilkadziesiąt procent i da się łatwo oszacować za pomocą testów skręcania [4].

Następnym błędem jest brak poprawnego zdefiniowania wpływu otworów i perforacji na nośność opakowania. Oczywiście formuła zaprezentowana w równaniu (2) nie pozwala na uwzględnienie w procedurze szacowania nośności opakowań z tektury falistej ani otworów, ani perforacji. Jednakże w literaturze można znaleźć wiele procedur, które pozwalają na precyzyjne określenie osłabienia nośności opakowania, np. wynikającego z otworów [6] czy też perforacji [7]. Zastosowanie tych technik wiąże się jednak z koniecznością wykonania skomplikowanych obliczeń sił krytycznych poszczególnych ścian opakowania. Aby tego uniknąć można wykorzystać dostępne na rynku systemy obliczeniowe, np. BSE System [3], które również uwzględniają wpływ otworów i perforacji na nośność opakowań, ale jednocześnie wymagają poprawnej definicji geometrii otworów oraz określenia rodzaju cięcia zastosowanego w perforacji. Błędna definicja perforacji (rodzaju cięcia) ponownie może skutkować błędami sięgającymi kilkunastu procent.



Podsumowanie

Tak więc uwzględnienie wszystkich trzech możliwych nieprawidłowych określeń współczynników korekcyjnych może prowadzić do błędów oszacowania na poziomie 60-70%. Jak już wspomniano, brak negatywnych skutków, wynikający z całkowitego braku ich uwzględnienia (w tym przypadku współczynniki przyjmują wartość jeden) lub błędnego oszacowania ich wartości, ciągle może zostać niezauważony, nawet przez wprawnych projektantów, ponieważ inne współczynniki kompensują ich wpływ w globalnym równaniu. Dzieje się tak w chwili, gdy projektant nie ma pełnej wiedzy na temat warunków transportowych lub z prostej ostrożności współczynniki bezpieczeństwa przyjmuje się na bardzo wysokich poziomach, np.:

$$\gamma_d \cdot \gamma_w \cdot \gamma_t \cdot \gamma_p = 5,0 \quad (6)$$

zamiast np. 3,0 lub 3,5. Jest to znaczne przeszacowanie, które oczywiście pozwala uniknąć kosztownych reklamacji, ale jednocześnie całkowicie blokuje możliwość uzyskania realnych oszczędności, a także ogranicza poprawne wykorzystanie pełnych możliwości narzędzi obliczeniowych, takich jak [3].

Poprawne wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa nie jest łatwe i wymaga wielu testów, zarówno w różnych warunkach klimatycznych, które oddziałują na opakowanie, jak i uwzględnienie drgań dynamicznych powstałych w trakcie transportu, a także kombinacji tych czynników, z równoległym uwzględnieniem czasu działania poszczególnych efektów, ich kolejności (sekwencji zmian) oraz pełnej interakcji między nimi. Choć wydaje się to bardzo trudne i pracochłonne, na świecie, a szczególnie w Europie, w tym również w Polsce, prowadzone są już intensywne badania w celu określenia wszystkich tych współczynników. Ostatecznie gra toczy się o wysoką stawkę, ponieważ redukcja współczynników bezpieczeństwa nawet o kilka czy kilkanaście procent, przy zachowaniu wymaganej nośności, może przynieść ogromne oszczędności. Szczęśliwie coraz więcej dużych producentów opakowań, a także ich kluczowi odbiorcy są tego coraz bardziej świadomi, co pozwala zachować realny optymizm, że rozwiązania te pojawią się raczej prędzej niż później.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Allerby I.M., Laing G.N., Cardwell R.D. 1985. "Compressive strength – From components to corrugated containers". *Appita Conf. Notes* 1–11.
- [2] Batelka J.J., Smith C.N. 1993. "Package Compression Model". Institute of Paper Science and Technology. Atlanta, GA, USA.
- [3] http://fematsystems.pl/bse-system_en/
- [4] http://fematsystems.pl/sst_en/
- [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 properties of corrugated board”. („Komputerowo wspomaganie wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz. 1. Wpływ zgniecenia tektury falistej na jej podstawowe parametry”). *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388.
- [6] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. „ Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various openings”. *Energies* 14 (1) : 155.
- [7] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. „ Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various perforations”. *Energies* 14 (4) : 1095.
- [8] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 2. Experimental tests and numerical analysis of paperboard packages". („Numeryczne wyznaczanie wytrzymałości opakowań z tektury falistej. Cz. 2. Badania eksperymentalne i analizy numeryczne opakowań papierowych”). *Przegląd Papierniczy* 70 (5) : 277-281.
- [9] Garbowski T., Jarmuszczyk M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 1. Theoretical Assumptions in Numerical Modeling of Paperboard Packages". („Numeryczne wyznaczanie wytrzymałości opakowań z tektury falistej. Cz. 1. Założenia teoretyczne w modelowaniu numerycznym opakowań papierowych”). *Przegląd Papierniczy* 70 (4) : 219-222.
- [10] Kellicutt K., Landt E. 1952. "Development of design data for corrugated fiberboard shipping containers". *Tappi J.* 35 : 398-402.
- [11] Maltenfort G. 1956. "Compression strength of corrugated containers". *Fibre Contain.* 41 : 106-121.
- [12] McKee R.C., Gander J.W., Wachuta J.R. 1963. "Compression strength formula for corrugated boxes". *Paperboard Packag.* 48 : 149-159.
- [13] Mrówczyński D., Garbowski T., Knitter-Piątkowska A. 2021. „Estimation of the compressive strength of corrugated board boxes with shifted creases on the flaps”. *Materials* 14 (18) : 5181.
- [14] PN-EN ISO 3037:2023-06 – Tektura falista – Oznaczenie odporności na zgniatanie krawędziowe (metoda nieparafinowanej krawędzi).
- [15] PN-EN ISO 12048:2002 – Opakowania – Opakowania transportowe z zawartością – Metody badania odporności na nacisk statyczny.
- [16] Schrampter K.E., Whitsitt W.J., Baum G.A. 1987. "Combined Board Edge Crush (ECT) Technology". Institute of Paper Chemistry: Appleton, WI, USA.
- [17] Urbanik T.J., Frank B. 2006. „Box compression analysis of world-wide data spanning 46 years”. *Wood Fiber Sci.* 38 : 399-416.