



Tektura jako materiał „czasowy” – jak właściwości zmieniają się w trakcie życia opakowania

Corrugated board as a time-dependent material – how properties change throughout packaging life

TOMASZ GARBOWSKI, JULIA GRACZYK

DOI: 10.15199/54.2026.5.3

Tektura falista jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów opakowaniowych na świecie, jednak jej właściwości użytkowe są zazwyczaj rozpatrywane w sposób statyczny, jako zestaw parametrów określonych w chwili produkcji lub podczas standardowych badań laboratoryjnych. W praktyce jest to materiał silnie zależny od czasu oraz warunków środowiskowych, którego cechy mechaniczne i geometryczne zmieniają się podczas magazynowania, transportu, użytkowania oraz recyklingu. Oznacza to, że opakowanie opuszczające linię produkcyjną nie zawsze zachowuje te same parametry po kilku dniach lub tygodniach eksploatacji. W artykule omówiono główne mechanizmy odpowiedzialne za czasową zmienność właściwości tektury falistej, w tym wpływ wilgotności, temperatury, pełzania materiału, relaksacji naprężeń, zmęczenia eksploatacyjnego oraz lokalnych uszkodzeń transportowych. Przedstawiono znaczenie procesów zachodzących bezpośrednio po produkcji, takich jak stabilizacja wilgotności i odkształceń, a także degradację parametrów podczas długotrwałego składowania jednostek paletowych. Zwrócono uwagę, że uwzględnienie czasu jako parametru projektowego może istotnie poprawić bezpieczeństwo logistyczne, ograniczyć liczbę reklamacji oraz umożliwić bardziej racjonalne wykorzystanie surowców. Wskazano również rolę badań klimatycznych, monitoringu warunków transportu oraz modeli predykcyjnych w nowoczesnym projektowaniu opakowań. Tektura falista powinna być traktowana nie jako materiał stały, lecz jako materiał dynamiczny, którego właściwości ewoluują wraz z przebiegiem cyklu życia opakowania.

Słowa kluczowe: tektura falista, opakowania, starzenie materiału, pełzanie, wilgotność, trwałość opakowań, logistyka, właściwości czasowe

Corrugated board is one of the most widely used packaging materials worldwide; however, its performance is commonly considered in a static manner, as a set of parameters determined at the production stage or during standard laboratory testing. In reality, it is a strongly time-dependent material whose mechanical and geometrical properties evolve during storage, transport, use, and recycling. This means that packaging leaving the production line may no longer exhibit the same properties after several days or weeks of service. This paper discusses the main mechanisms responsible for the temporal variability of corrugated board performance, including the effects of humidity, temperature, material creep, stress relaxation, operational fatigue, and local transport damage. Particular attention is given to post-production processes such as moisture equilibration and dimensional stabilization, as well as the gradual degradation of performance during long-term pallet storage. It is shown that considering time as a design parameter may significantly improve logistical safety, reduce claims, and enable more rational use of raw materials. The role of climatic testing, transport-condition monitoring, and predictive modeling in modern packaging design is also highlighted. Corrugated board should therefore be treated not as a static material, but as a dynamic material whose properties evolve throughout the packaging life cycle.

Keywords: corrugated board, packaging, material aging, creep, humidity, packaging durability, logistics, time-dependent properties

Wprowadzenie

Tektura falista należy do najważniejszych materiałów opakowaniowych współczesnej gospodarki. Każdego dnia miliony pudełek

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; mgr inż. **J. Graczyk** (julia.graczyk@student.put.poznan.pl), Instytut Analizy Konstrukcji, Politechnika Poznańska



wykorzystywane są do transportu żywności, sprzętu elektronicznego, kosmetyków, leków oraz towarów obsługiwanych przez dynamicznie rozwijający się sektor handlu internetowego. Popularność tego materiału wynika z korzystnego połączenia małej masy, odpowiedniej wytrzymałości, łatwości przetworstwa, stosunkowo niskiego kosztu oraz wysokiego potencjału recyklingu. Tektura falista stała się więc symbolem nowoczesnej logistyki i gospodarki obiegu zamkniętego. Właściwości mechaniczne tektury falistej były szeroko analizowane w literaturze [2, 9].

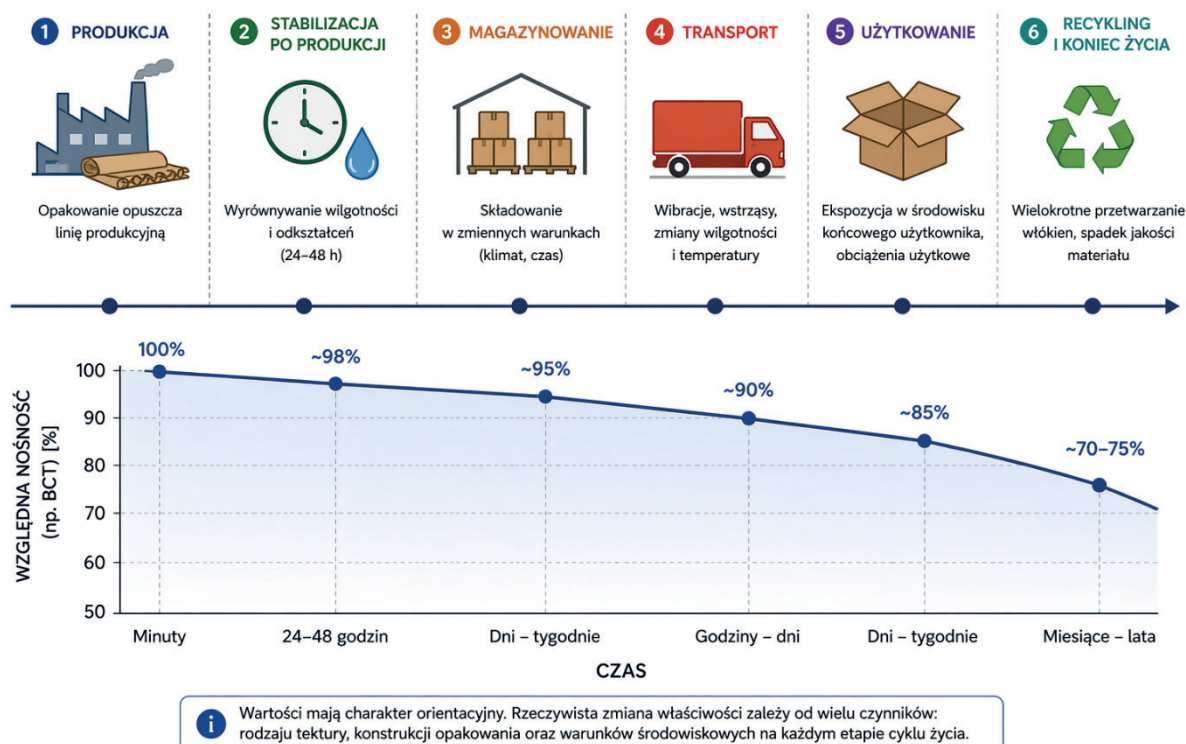
Mimo tak szerokiego zastosowania właściwości tektury falistej są często oceniane w sposób uproszczony. W praktyce technicznej opakowanie opisuje się zazwyczaj poprzez zestaw parametrów uzyskanych w określonym momencie: gramaturę, grubość, wytrzymałość ECT, odporność BCT lub inne wskaźniki laboratoryjne. Parametry te są niezwykle istotne, jednak tworzą jedynie fotografię materiału, wykonaną w jednej chwili. Tymczasem rzeczywiste życie opakowania przebiega w czasie, a wraz z nim zmienia się również samo tworzywo.

Papier i tektura są materiałami pochodzenia włóknistego, silnie reagującymi na warunki środowiskowe. Wilgotność powietrza, temperatura, czas składowania, długotrwałe obciążenie, drgania transportowe czy lokalne uszkodzenia mogą stopniowo zmieniać sztywność, wytrzymałość i stabilność geometryczną opakowania. Oznacza to, że pudełko opuszczające linię produkcyjną nie zawsze posiada te same właściwości po tygodniu magazynowania, po podróży kontenerowej lub po kilku dniach ekspozycji w warunkach podwyższonej wilgotności.

Z punktu widzenia inżynierskiego tektura falista powinna być zatem traktowana jako materiał zależny od czasu. Podobnie jak w przypadku drewna, polimerów czy wielu kompozytów, istotne stają się zjawiska pełzania, relaksacji naprężeń, starzenia eksploatacyjnego oraz wpływu cyklicznych zmian klimatycznych. Pomijanie tych procesów może prowadzić do przewymiarowania konstrukcji albo przeciwnie, do niedoszacowania ryzyka uszkodzeń w łańcuchu dostaw.

Rosnące wymagania rynku dodatkowo wzmacniają znaczenie tego zagadnienia. Producenci dążą do ograniczania zużycia papieru, redukcji masy opakowań oraz obniżania kosztów transportu, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa produktu. Im lżejsza konstrukcja, tym mniejszy margines błędu i większe znaczenie dokładnej wiedzy o zmianach właściwości w czasie. Czas staje się więc ukrytym, lecz coraz ważniejszym parametrem projektowym.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie tektury falistej jako materiału dynamicznego, którego cechy użytkowe ewoluują w trakcie całego cyklu życia opakowania. Omówiono najważniejsze mechanizmy odpowiedzialne za te zmiany, ich konsekwencje praktyczne oraz kierunki nowoczesnego projektowania, uwzględniającego rzeczywisty czas eksploatacji wyrobu. Nie wystarczy tradycyjne spojrzenie na pudełko jak na przedmiot nieruchomy, bowiem w rzeczywistości jest ono konstrukcją w ciągłym dialogu z otoczeniem. Ten dialog trwa od chwili produkcji aż do momentu recyklingu (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczna ewolucja właściwości użytkowych opakowania z tektury falistej podczas kolejnych etapów jego cyklu życia



Tektura nie jest stałą – natura materiału włóknistego

W inżynierskim myśleniu często przyjmuje się, świadomie lub nieświadomie, wzorce zaczerpnięte z materiałów klasycznych, takich jak stal, aluminium czy beton. Są to materiały o względnie stabilnych parametrach, których właściwości mechaniczne w normalnych warunkach eksploatacyjnych zmieniają się powoli i w ograniczonym zakresie. Tektura falista należy jednak do zupełnie innej rodziny materiałów. Jej zachowanie jest znacznie bardziej złożone, ponieważ opiera się na strukturze włóknistej, porowatej i silnie zależnej od środowiska.

Podstawowym składnikiem papieru są włókna celulozowe tworzące przestrzenną sieć połączeń mechanicznych i chemicznych. To właśnie ta mikroskopijna architektura decyduje o makroskopowej wytrzymałości arkusza. Struktura ta nie jest jednak sztywna w sensie materiałów metalicznych. Włókna mogą zmieniać położenie, lokalnie pęcznieć, osiadać, rozluźniać połączenia lub ulegać stopniowej degradacji pod wpływem wilgoci i obciążeń. Materiał bardziej negocjuje z otoczeniem, niż mu się przeciwstawia.

Jedną z najważniejszych cech papieru jest **higroskopijność**, czyli zdolność pochłaniania oraz oddawania wilgoci. Gdy wilgotność względna powietrza rośnie, włókna absorbują wodę, zwiększają objętość i stają się bardziej podatne na deformacje. Spada wtedy sztywność oraz wytrzymałość na ściskanie, szczególnie istotna dla opakowań transportowych. Gdy materiał wysycha, część właściwości może wracać, lecz nie zawsze w pełni. Każdy cykl wilgotnościowy pozostawia subtelny ślad.

Drugą fundamentalną cechą jest **anizotropia**, czyli zależność właściwości od kierunku. W piapiernictwie wyróżnia się zwykle kierunek maszynowy (MD) oraz poprzeczny (CD). W kierunku MD włókna są bardziej uporządkowane wskutek procesu produkcyjnego, co często przekłada się na wyższą wytrzymałość i sztywność. W kierunku CD zachowanie może być odmienne. Dla konstrukcji pudełek ma to ogromne znaczenie, ponieważ ustawienie arkusza względem linii załamek i ścian bocznych wpływa bezpośrednio na nośność gotowego opakowania.

Istotne są również zjawiska **lepkosprężyste**, takie jak pełzanie i relaksacja naprężeń. Jeśli pudełko przez długi czas przenosi stałe obciążenie, materiał może stopniowo odkształcać się mimo braku wzrostu siły. To zjawisko szczególnie ważne podczas składowania paletowego. Konstrukcja, która była bezpieczna pierwszego dnia, po tygodniu może pracować już w zupełnie innym stanie mechanicznym.

W przeciwieństwie do wielu materiałów inżynierskich papier zachowuje także „pamięć procesu”. Sposób suszenia, prasowania, klejenia, bigowania czy magazynowania wpływa na jego późniejsze właściwości. Oznacza to, że historia materiału jest częścią jego parametrów. Dwa arkusze o tej samej gramaturze mogą nie być materiałowo identyczne.

W przypadku tektury falistej złożoność rośnie jeszcze bardziej, ponieważ mamy do czynienia z układem wielowarstwowym: linerami i pofalowanym medium połączonymi klejem. Każda warstwa może reagować inaczej na wilgoć, temperaturę i obciążenie, a wzajemne oddziaływania decydują o pracy całego układu. Szczególnie istotne pozostają właściwości ścinania poprzecznego, wpływające na deformacyjność i pracę całej struktury warstwowej [4]. To konstrukcja bardziej przypominająca orkiestrę niż pojedynczy instrument. Modele równoważnych właściwości takiej struktury przedstawiono m.in. w pracach [1, 11]. Dlatego tektury falistej nie należy oceniać miarą stali. Jest lżejsza, bardziej ekologiczna i niezwykle efektywna materiałowo, lecz jej logika mechaniczna jest inna. Zrozumienie tej odmienności stanowi pierwszy krok do nowoczesnego projektowania opakowań, w których czas, warunki klimatyczne i warunki użytkowania są równie ważne jak sama geometria.

Narodziny opakowania – stan początkowy po produkcji

Życie opakowania z tektury falistej nie rozpoczyna się w magazynie ani w momencie zapakowania produktu. Jego rzeczywista historia zaczyna się znacznie wcześniej, na linii produkcyjnej, gdzie powstaje materiał o określonych właściwościach mechanicznych, strukturalno-wymiarowych i wilgotnościowych. To właśnie tam kształtuje się stan początkowy opakowania, który w dużej mierze decyduje o dalszym zachowaniu podczas użytkowania.

Proces wytwarzania tektury falistej obejmuje: formowanie warstwy pofalowanej, nanoszenie kleju, łączenie z warstwami płaskimi oraz stabilizację materiału w warunkach podwyższonej temperatury. Każdy z tych etapów wpływa na końcowe parametry wyrobu. Temperatura produkcji, wilgotność papieru wejściowego, ilość kleju, docisk walców czy prędkość linii mogą zmieniać sztywność połączeń między warstwami oraz geometrię fali. Opakowanie rodzi się więc nie jako abstrakcyjny model z katalogu, lecz jako efekt konkretnego procesu technologicznego.

Szczególne znaczenie ma **wilgotność materiału po produkcji**. Arkusze opuszczające linię nie zawsze znajdują się w równowadze z otaczającym środowiskiem. W kolejnych godzinach lub dniach mogą pobierać albo oddawać wilgoć, co prowadzi do zmian wymiarów oraz parametrów mechanicznych. Z punktu widzenia użytkownika pudełko świeżo wyprodukowane może być innym materiałem niż to samo pudełko po dwóch dobach składowania.

Istotnym zagadnieniem są również **naprężenia resztkowe** powstające podczas procesu formowania, suszenia i chłodzenia. Różnice odkształceń pomiędzy warstwami mogą powodować lokalne skręcanie arkuszy, falowanie powierzchni lub tendencję do deformacji po wykrojeniu. Choć zjawiska te bywają subtelne, w produkcji seryjnej mogą wpływać na jakość składania, klejenia oraz estetykę wyrobu końcowego.



Kolejnym etapem narodzin opakowania jest **przetwórstwo wykrojów**: bigowanie, nacinanie, perforowanie i składanie. Operacje te są niezbędne funkcjonalnie, lecz jednocześnie lokalnie osłabiają materiał. Wpływ uszkodzeń geometrii fali oraz lokalnego zgniecenia na późniejszą nośność pudełek wykazano w badaniach eksperymentalnych i numerycznych [3]. Linia zagięcia ułatwia złożenie pudełka, ale zmienia ciągłość warstw papieru i rozkład sztywności. Otwory wentylacyjne poprawiają użyteczność, lecz mogą obniżać nośność ścian bocznych. Każda funkcjonalność ma swój mechaniczny koszt.

W praktyce przemysłowej często zakłada się, że po zakończeniu produkcji opakowanie posiada już swoje docelowe parametry. Jest to uproszczenie. W wielu przypadkach materiał przechodzi jeszcze okres **stabilizacji po produkcji**, w którym następuje wyrównanie wilgotności, relaksacja lokalnych naprężeń oraz dostosowanie geometrii do warunków magazynowych. Można powiedzieć, że pudełko opuszcza linię jako produkt gotowy handlowo, lecz jeszcze dojrzewający materiałowo.

Znajomość tego etapu ma duże znaczenie praktyczne. Jeśli testy laboratoryjne wykonywane są zbyt wcześnie lub w warunkach odbiegających od realnego magazynowania, uzyskane wyniki mogą nie oddawać zachowania produktu u klienta. Podobnie problemy jakościowe obserwowane później w logistyce mogą mieć źródło nie w transporcie, lecz w parametrach procesu produkcyjnego.

Narodziny opakowania to zatem nie chwila, lecz proces. To wtedy ustalana jest jego mechaniczna osobowość: ile uniesie, jak zareaguje na wilgoć, czy zachowa geometrię i jak zniesie drogę do odbiorcy. Kto chce zrozumieć całe życie pudełka, powinien zacząć właśnie od tego pierwszego rozdziału.

Pierwsze godziny i dni – stabilizacja materiału

Moment opuszczenia linii produkcyjnej nie oznacza końca zmian zachodzących w tekturze falistej. Wręcz przeciwnie, dla wielu wyrobów rozpoczyna się wtedy krótki, lecz bardzo istotny etap stabilizacji materiału. W pierwszych godzinach i dniach po produkcji opakowanie dostosowuje się do warunków otoczenia, a jego właściwości mechaniczne i geometryczne mogą ulegać zauważalnym zmianom.

Najważniejszym zjawiskiem jest **wyrównywanie wilgotności**. Podczas procesu produkcyjnego papier i tektura przechodzą przez strefy podwyższonej temperatury, kontakt z klejem oraz intensywne oddziaływania mechaniczne. Po opuszczeniu maszyny materiał rzadko znajduje się w stanie równowagi higroskopijnej z powietrzem hali produkcyjnej lub magazynu. Oznacza to, że w kolejnych godzinach włókna celulozowe zaczynają pochłaniać lub oddawać wilgoć, aż do osiągnięcia nowego stanu równowagi. Proces ten wpływa bezpośrednio na parametry użytkowe. Przy

wzroście wilgotności materiał zwykle staje się bardziej podatny, a jego odporność na ściskanie może maleć. W warunkach suchych wzrasta sztywność, lecz jednocześnie może pojawić się większa kruchość i podatność na pękanie w strefach zagięć. Oznacza to, że nawet w krótkim czasie po produkcji pudełko może zmieniać swoje zachowanie bez jakiegokolwiek widocznej ingerencji.

Drugim ważnym mechanizmem są **zmiany wymiarowe**. Papier jako materiał włóknisty reaguje na wilgoć poprzez pęcznienie lub skurcz, przy czym zmiany te bywają różne w kierunku MD i CD. W rezultacie arkusze mogą lekko falować, zmieniać płaskość lub wykazywać tendencję do skręcania. W gotowych wykrojach może to utrudniać automatyczne składanie, klejenie lub utrzymanie wysokiej estetyki nadruku.

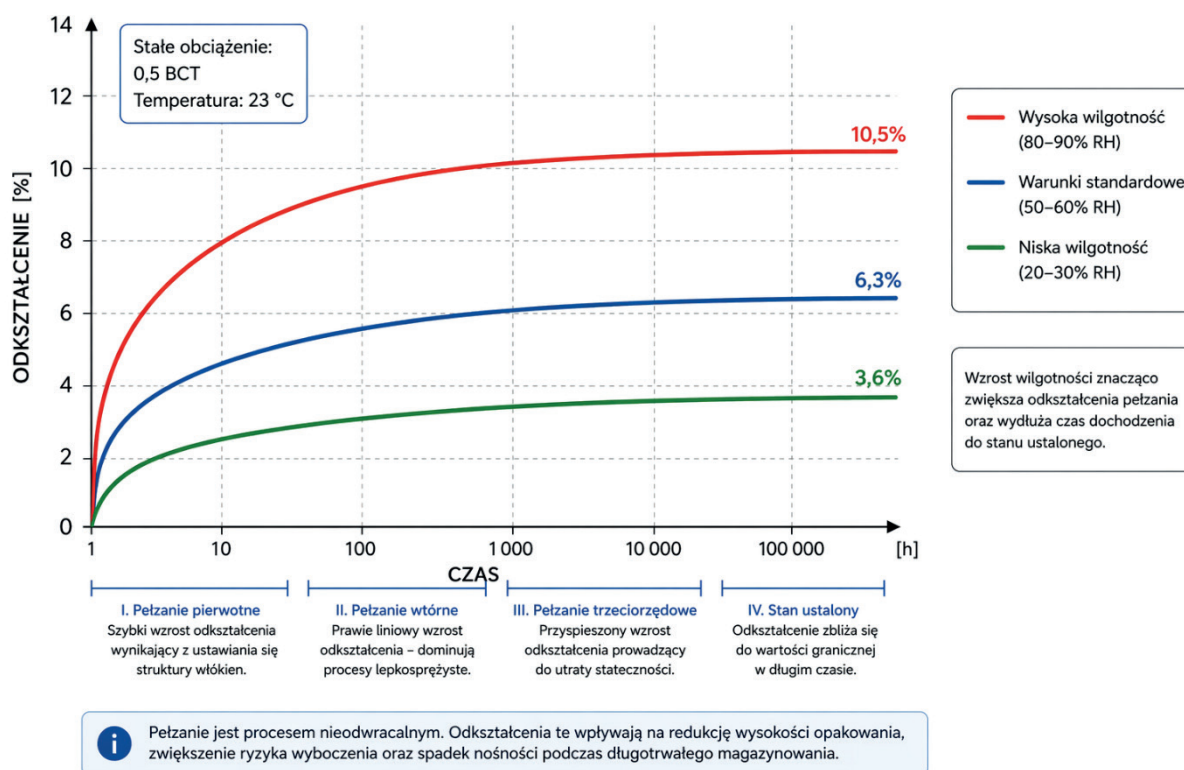
W pierwszych dniach następuje również **relaksacja naprężeń resztkowych** powstałych podczas: procesu produkcji tektury, prasowania, chłodzenia i bigowania. Materiał stopniowo „uspokaja się” po intensywnym procesie technologicznym. To zjawisko bywa niewidoczne gołym okiem, lecz może wpływać na dokładność wymiarową i powtarzalność późniejszych testów laboratoryjnych.

Znaczenie tego etapu rośnie wraz z sezonowością produkcji. Tektura wytwarzana zimą, gdy powietrze bywa suche i chłodne, może inaczej zachowywać się po przeniesieniu do ogrzewanego magazynu niż materiał produkowany latem w warunkach podwyższonej wilgotności. Dlatego dwa identyczne wykroje wyprodukowane w różnych miesiącach roku nie zawsze rozpoczynają życie w tym samym stanie.

Z punktu widzenia praktyki przemysłowej pierwsze godziny po produkcji mają duże znaczenie dla planowania badań jakościowych. Test wykonany bezpośrednio po zejściu z linii może dać inny wynik niż badanie tego samego materiału po 24 lub 48 godzinach kondycjonowania. Stąd rola procedur klimatycznych i standaryzowanych warunków przygotowania próbek. Można powiedzieć, że świeżo wyprodukowana tektura jest jak instrument po nastrojeniu, który potrzebuje chwili, aby ustabilizować brzmienie. Dopiero po osiągnięciu równowagi z otoczeniem pokazuje pełniej swoje rzeczywiste możliwości. Dla producenta oznacza to potrzebę kontroli warunków składowania, a dla projektanta świadomość, że parametry startowe opakowania nie są punktem stałym, lecz początkiem krótkiej ewolucji.

Czas pod obciążeniem – pętlanie i zmęczenie

Jednym z najczęściej niedocenianych zjawisk w eksploatacji opakowań z tektury falistej jest wpływ czasu działania obciążenia. W praktyce logistycznej pudełka rzadko pracują jedynie chwilowo. Najczęściej pozostają przez wiele godzin lub dni ustawione w stosach, na paletach, w regałach magazynowych albo w kontenerach transportowych. Oznacza to, że materiał poddawany jest długotrwałemu naciskowi, a jego odpowiedź mechaniczna zmienia się



Rys. 2. Schematyczny przebieg pelzania tektury falistej pod stałym obciążeniem w różnych warunkach wilgotnościowych

wraz z upływem czasu. Znaczenie długotrwałego ściskania dla pudeł transportowych potwierdzają liczne badania nośności BCT [2, 5, 10].

Kluczowym mechanizmem jest **pelzanie**, czyli stopniowy wzrost odkształcenia przy stałym obciążeniu (rys. 2). Jeżeli na pudełko działa niezmienna siła pochodząca od wyżej ustawionych warstw, ściany boczne mogą z czasem coraz bardziej się odkształcać, mimo że obciążenie nie rośnie. Zjawisko to wynika z lepkosprężystej natury papieru oraz powolnych zmian zachodzących w strukturze włókien celulozowych.

W pierwszym etapie pelzanie może być niewielkie i trudne do zauważenia. Po dłuższym czasie deformacje stają się jednak bardziej widoczne – pojawia się wybrzuszenie ścian, lokalne fałdowanie, utrata pionowości naroży lub osiadanie całych warstw paletowych. Konstrukcja, która podczas testu laboratoryjnego wykazała odpowiedni zapas nośności, może po kilku dniach pracy znajdować się znacznie bliżej stanu krytycznego.

Szczególnie narażone są **dolne warstwy jednostek paletowych**, które przez cały okres składowania przenoszą ciężar produktów i wyższych pudełek. To właśnie tam kumuluje się ryzyko stopniowej utraty sztywności i lokalnego wybożenia. W praktyce uszkodzenie jednej warstwy może uruchomić efekt domina, prowadząc do destabilizacji całej palety.

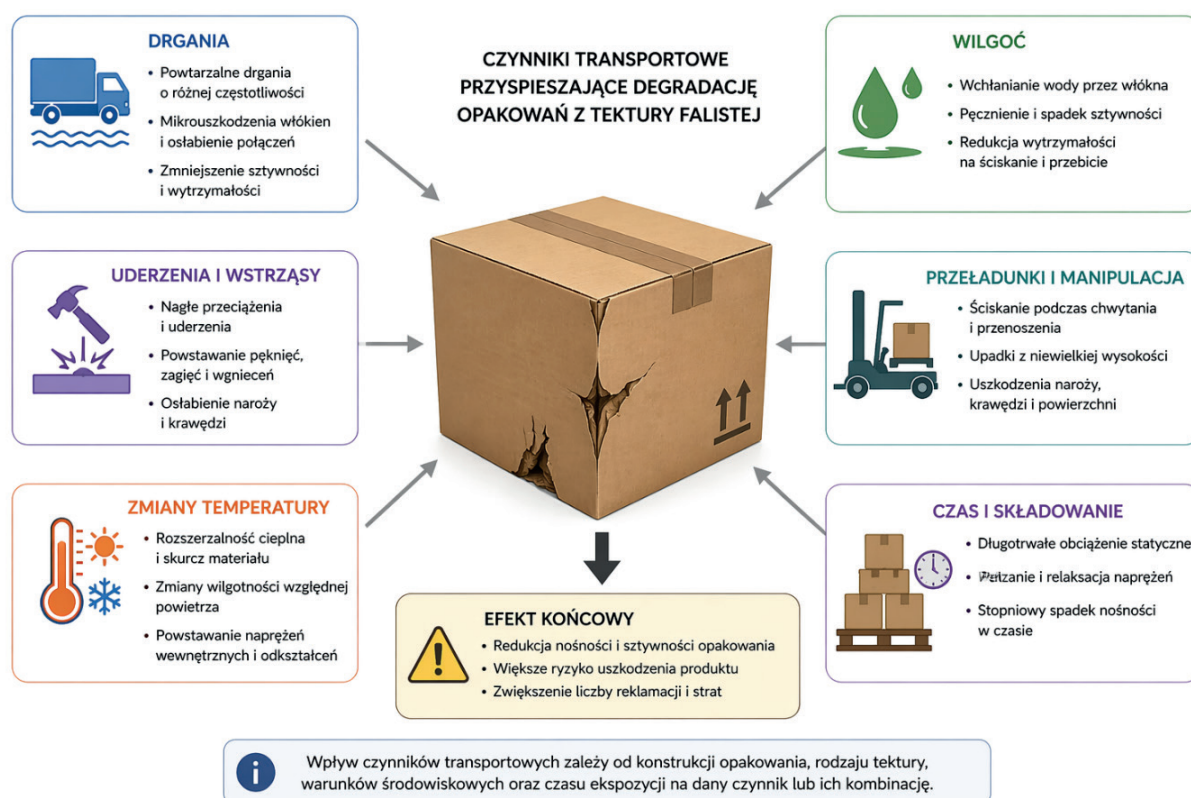
Drugim istotnym zjawiskiem jest **zmęczenie eksploatacyjne**. Opakowania poddawane są wielokrotnym, zmiennym oddziały-

waniom: podnoszeniu, odkładaniu, drganiom transportowym, krótkotrwałym przeciążeniom czy wielokrotnemu otwieraniu i zamykaniu. Choć pojedyncze oddziaływanie może być niegroźne, ich suma osłabia materiał oraz połączenia klejone. Włókna nie pękają spektakularnie, lecz powoli tracą zdolność współpracy.

Warto podkreślić, że pelzanie i zmęczenie silnie zależą od **warunków klimatycznych**. Podwyższona wilgotność przyspiesza deformacje trwałe i obniża odporność na ściskanie. To oznacza, że identyczna paleta może zachowywać się inaczej w suchym centrum logistycznym i inaczej w wilgotnym magazynie sezonowym.

Z punktu widzenia projektowania opakowań ma to ważne konsekwencje. Test BCT wykonany w krótkim czasie informuje o nośności chwilowej, lecz nie zawsze oddaje zachowanie po tygodniu składowania. Coraz większego znaczenia nabiera więc projektowanie uwzględniające **czas użytkowania**, a nie jedynie wartość maksymalnej siły w laboratorium.

Nowoczesne podejście powinno obejmować scenariusze logistyczne: jak długo produkt będzie magazynowany, ile warstw znajdzie się na palecie, w jakim klimacie będzie transportowany oraz czy nastąpi wielokrotne manipulowanie opakowaniem. Tylko wtedy zapas bezpieczeństwa staje się racjonalny, a nie przypadkowy. Można powiedzieć, że tektura najcięższą pracę wykonuje po cichu, gdy nikt na nią nie patrzy. Nie podczas testu, lecz nocą w magazynie, pod stałym naciskiem kolejnych warstw. Właśnie tam czas zamienia się w siłę konstrukcyjną.



Rys. 3. Główne czynniki transportowe przyspieszające degradację właściwości opakowań z tektury falistej

Transport jako przyspieszone starzenie

Jeżeli magazynowanie jest dla opakowania próbą cierpliwości, to transport stanowi próbę charakteru. W trakcie przewozu pudełko z tektury falistej poddawane są oddziaływaniom znacznie bardziej złożonym niż statyczne obciążenie pionowe. Drgania, uderzenia, zmiany temperatury, wilgotność, wielokrotne przeładunki oraz lokalne przemieszczenia ładunku sprawiają, że transport można traktować jako formę przyspieszonego starzenia materiału (rys. 3).

Jednym z najważniejszych czynników są **drgania i wibracje** występujące podczas przewozu drogowego, kolejowego, morskiego i lotniczego. Nawet jeśli ich amplituda jest niewielka, działają one przez długi czas i w dużej liczbie cykli. Powodują mikroruchy pomiędzy opakowaniami, tarcie powierzchni, stopniowe osłabianie naroży oraz lokalne zmęczenie ścian bocznych. Konstrukcja nie musi doznać jednego silnego uderzenia, aby ulec uszkodzeniu. Czasem wystarczy tysiące drobnych impulsów.

Kolejnym zagrożeniem są **uderzenia i przeciążenia krótkotrwałe**, związane z hamowaniem pojazdu, najechaniem na nierówność, upadkiem podczas przeładunku czy gwałtownym kontaktem z inną jednostką ładunkową. Takie zdarzenia mogą prowadzić do zagniecenia naroży, lokalnego pęknięcia warstw papieru, uszkodzeń połączeń klejonych lub utraty geometrii pudełka. Co istotne,

uszkodzenie zewnętrzne bywa niewielkie, podczas gdy rezerwa nośności spada zauważalnie.

Szczególnie wymagającym środowiskiem jest **transport morski i kontenerowy**, gdzie opakowania narażone są na długotrwałe zmiany warunków klimatycznych. Wahania temperatury między dniem a nocą sprzyjają kondensacji wilgoci, a podwyższona wilgotność powietrza może stopniowo osłabiać papierowe warstwy. Pudełko zapakowane jako sztywne i stabilne może dotrzeć do odbiorcy bardziej miękkie, odkształcone lub podatne na dalsze uszkodzenia.

W praktyce logistycznej znaczenie ma również **przemieszczanie się ładunku wewnątrz opakowania**. Jeśli produkt nie jest dobrze ustabilizowany, jego ruch podczas transportu generuje dodatkowe naciski na ściany i klapy. Wtedy opakowanie nie tylko chroni produkt, ale samo staje się polem dynamicznej walki z bezwładnością.

Transport wpływa także na **warstwy dolne palet**, które równocześnie przenoszą ciężar stosu i podlegają drganiom całej jednostki ładunkowej. Połączenie obciążenia statycznego z dynamicznym jest szczególnie niekorzystne i może przyspieszać deformacje trwałe oraz utratę stateczności. Z punktu widzenia projektowania oznacza to, że opakowanie przeznaczone do sprzedaży lokalnej może wymagać innych parametrów niż opakowanie eksportowe podróżujące kilka tygodni przez różne strefy klimatyczne. Ten sam produkt nie zawsze potrzebuje tego samego pudełka. Trasa staje



się częścią projektu. W praktyce wymaga to projektowania pod konkretny scenariusz logistyczny [6].

Coraz większą rolę odgrywa więc monitoring warunków przewozu: rejestratory temperatury, wilgotności, wstrząsów czy przechyłów. Dane te mogą zasilać modele predykcyjne i pomagać lepiej dobierać konstrukcje opakowań do realnych scenariuszy transportowych.

Można powiedzieć, że transport zapisuje na pudełku niewidzialny dziennik podróży. Każdy kilometr, każdy wstrząs i każda wilgotna noc pozostawiają drobny ślad. Razem decydują, w jakim stanie opakowanie przekroczy próg odbiorcy.

Koniec życia czy drugie życie?

Dla wielu użytkowników życie opakowania kończy się w chwili rozpakowania produktu. Pudełko zostaje zgniecione, ołożone na bok lub trafia do pojemnika na makulaturę. Z perspektywy gospodarki obiegu zamkniętego jest to jednak dopiero kolejny etap, a nie definitywny finał. Tekstura falista należy do materiałów, które potrafią powracać do obiegu, często wielokrotnie, choć każda podróż pozostawia swój ślad.

Pierwszym scenariuszem po zakończeniu podstawowej funkcji jest **ponowne użycie opakowania**. W handlu internetowym, logistyce zwrotów czy obiegu wewnętrznym przedsiębiorstw pudełko bywają wykorzystywane więcej niż jeden raz. To rozwiązanie, korzystne ekonomicznie i środowiskowo, jednak wymaga świadomości, że opakowanie po pierwszym cyklu nie jest już materiałem „jak nowe”. Zagięcia są osłabione, naroża mogą być częściowo zgniecione, a połączenia klejone narażone na zużycie. Drugie życie jest możliwe, ale rzadko identyczne z pierwszym.

Drugim i najważniejszym kierunkiem jest **recykling włókien celulozowych**. Zużyta tekstura trafia do rozwłókniania, gdzie odzyskuje się surowiec do produkcji kolejnych papierów. To jedna z największych przewag branży papierniczej nad wieloma innymi sektorami opakowaniowymi. Włókna mogą wracać do obiegu wielokrotnie, zmniejszając zapotrzebowanie na surowce pierwotne oraz ograniczając ilość odpadów.

Warto jednak pamiętać, że włókna celulozowe nie są „nieśmiertelne”. Każdy kolejny cykl przetwarzania prowadzi do ich **stopniowego skracania i osłabiania**. Maleje zdolność tworzenia mocnych połączeń między włóknami, pogarsza się część parametrów wytrzymałościowych, a do utrzymania jakości często potrzebny jest dodatek włókien pierwotnych. Można powiedzieć, że papier pamięta swoje poprzednie wcielenia.

Znaczenie ma również **historia użytkowania opakowania przed recyklingiem**. Długotrwałe zawilgocenie, kontakt z zabrudzeniami, tłuszczami lub chemikaliami, nadmierne uszkodzenia mechaniczne czy obecność wielomateriałowych dodatków mogą utrudniać odzysk i obniżać jakość surowca wtórnego. Nie każde pudełko wraca do obiegu z taką samą wartością materiałową.

W nowoczesnym podejściu coraz częściej mówi się o **projektowaniu dla recyklingu**. Oznacza to dobór takich materiałów, klejów, nadruków i dodatków konstrukcyjnych, które nie pogarszają późniejszego odzysku włókien. Projekt opakowania nie kończy się więc na wymaganiach transportowych, lecz obejmuje także jego przyszłość po użyciu.

Interesującym kierunkiem rozwoju jest również **cyfrowa identyfikacja opakowań**, np. poprzez kody, znaczniki lub systemy śledzenia partii materiału. W przyszłości może to umożliwić lepsze sortowanie strumieni odpadowych, ocenę jakości surowca wtórnego oraz bardziej efektywne zarządzanie recyklingiem.

Z perspektywy czasu opakowanie z tekstury falistej nie jest produktem jednorazowym, lecz elementem krążącego systemu materiałowego. Jego „koniec życia” bywa tylko zmianą roli. Najpierw chroni produkt, później staje się surowcem, z którego powstaje kolejne opakowanie. Można więc stwierdzić, że pudełko nie znika. Zmienia jedynie formę, trochę jak aktor schodzący ze sceny po to, by za chwilę wrócić w nowym kostiumie.

Jak mierzyć czasowe starzenie tekstury?

Skoro właściwości tekstury falistej zmieniają się w czasie, należy znaleźć sposób ich wiarygodnego pomiaru. Tradycyjne badania laboratoryjne bardzo często określają stan materiału w jednej chwili, zwykle po kondycjonowaniu w standardowych warunkach klimatycznych. Taki wynik jest cenny, lecz nie zawsze wystarcza do oceny zachowania opakowania po tygodniu magazynowania, po transporcie kontenerowym, czy po długotrwałym obciążeniu na palecie. Potrzebne są więc metody, które mierzą nie tylko parametr, ale również jego ewolucję.

Podstawowym narzędziem pozostają **badania klimatyczne**. Próbkę tekstury lub gotowe opakowania poddaje się działaniu kontrolowanej temperatury i wilgotności przez określony czas, a następnie wykonuje się standardowe testy wytrzymałościowe. Pozwala to określić, jak zmieniają się parametry ECT, BCT, sztywność zginania i odporność na zgniatanie po ekspozycji na konkretne warunki środowiskowe. Dzięki temu można odtworzyć scenariusze zbliżone do rzeczywistej logistyki.

Drugą ważną grupą metod są **testy długotrwałego obciążenia**, wykorzystywane do oceny pełzania materiału. Opakowanie lub próbka pozostaje przez wiele godzin albo dni pod stałą siłą, a w czasie rejestrowane są odkształcenia. Wynik pokazuje nie tylko wartość nośności początkowej, lecz także tempo utraty sztywności i narastania deformacji. To szczególnie istotne dla opakowań magazynowanych w stosach.

Istotne znaczenie mają również **badania transportowe i dynamiczne**. Stoły wibracyjne, testy uderzeniowe, symulatory transportu oraz próby upadku umożliwiają ocenę odporności opakowań na rzeczywiste obciążenia występujące podczas przewozu. W połączeniu z wcześniejszą ekspozycją klimatyczną pozwalają anali-



zować efekt skumulowany, gdy osłabiony wilgocią materiał trafia następnie w warunki dynamiczne.

Coraz większą rolę odgrywa **monitoring online**. Rejestratory temperatury, wilgotności, przyspieszeń, przechyłów czy czasu składowania mogą towarzyszyć jednostce ładunkowej w realnym łańcuchu dostaw. Takie dane są niezwykle cenne, ponieważ pokazują, co naprawdę spotkało opakowanie, a nie jedynie co zakładano w laboratorium. Rzeczywistość logistyczna bywa bowiem bardziej kreatywna niż procedura testowa.

W nowoczesnym podejściu pomiar coraz częściej wspierają **modele predykcyjne**. Na podstawie danych z badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych można budować algorytmy przewidujące spadek nośności w czasie, wpływ wilgotności oraz bezpieczny okres magazynowania. To krok w stronę cyfrowego bliźniaka, który nie tylko mierzy przeszłość, ale prognozuje przyszłość [8].

Warto podkreślić, że kluczowe znaczenie ma **powtarzalność procedur badawczych**. Nawet niewielkie różnice w kondycjonowaniu próbek, czasie od rozpoczęcia produkcji, sposobie obciążania lub dokładności pomiaru mogą wpływać na wynik. Przy badaniu zjawisk czasowych precyzja metodologii staje się równie ważna jak sama aparatura.

Dla przemysłu optymalnym rozwiązaniem jest połączenie kilku poziomów oceny: standardowych testów jakościowych, badań okresowych starzenia, monitoringu wybranych dostaw oraz modeli analitycznych. Tylko taki system pozwala zrozumieć zarówno stan początkowy materiału, jak i jego zachowanie po drodze do klienta. Można powiedzieć, że mierzenie starzenia tektury przypomina obsługę zegara, którego wskazówki poruszają się pod wpływem wilgoci, nacisku i czasu. Sam odczyt jednej godziny nie wystarczy, trzeba zobaczyć cały mechanizm ruchu (tabela 1).

Tabela 1. Główne mechanizmy odpowiedzialne za zmiany właściwości opakowań z tektury falistej w czasie wraz z ich typowymi skutkami oraz skalą czasową występowania

Mechanizm	Skutek	Typowy czas	Znaczenie
Stabilizacja wilgotności	zmiana sztywności	godziny	Wysokie
Pelzanie	deformacje trwałe	dni/tyg.	bardzo wysokie
Zmęczenie	osłabienie naroży	cykle	Średnie
Transport	lokalne uszkodzenia	godziny/dni	Wysokie
Recykling	spadek jakości włókien	kolejne cykle	Średnie

Co z tego wynika dla producentów?

Wiedza o czasowej zmienności właściwości tektury falistej nie jest wyłącznie ciekawostką naukową. Ma bardzo konkretne znaczenie dla producentów papieru, wytwórców opakowań, firm logistycznych oraz marek korzystających z opakowań transportowych. Zrozumienie, że właściwości pudełka zmieniają się

w czasie, prowadzi do bardziej świadomych decyzji technicznych, ekonomicznych i organizacyjnych.

Pierwszą konsekwencją jest potrzeba **projektowania pod rzeczywisty scenariusz użytkowania**, a nie wyłącznie pod wynik jednego testu laboratoryjnego. Opakowanie przeznaczone do lokalnej dystrybucji przez 48 godzin może wymagać innych parametrów niż pudełko eksportowe podróżujące trzy tygodnie przez kilka stref klimatycznych. Producent, który zna trasę życia opakowania, może lepiej dobrać konstrukcję i materiały.

Drugim ważnym wnioskiem jest możliwość **bardziej racjonalnego doboru gramatury papierów**. W wielu przypadkach nadmierny zapas bezpieczeństwa prowadzi do przewymiarowania opakowań i niepotrzebnego zużycia surowca. Z drugiej strony zbyt agresywna redukcja masy może skutkować reklamacjami i stratami logistycznymi. Uwzględnienie wpływu czasu pozwala znaleźć punkt równowagi między ekonomią a bezpieczeństwem.

Kolejnym obszarem jest **kontrola jakości produkcji**. Jeżeli wiadomo, że parametry opakowania stabilizują się po określonym czasie lub silnie reagują na wilgotność, procedury badań mogą zostać lepiej dopasowane do rzeczywistych warunków. Test wykonany w odpowiednim momencie i po właściwym kondycjonowaniu jest znacznie cenniejszy niż szybki wynik pozbawiony kontekstu.

Znajomość procesów starzeniowych pomaga również ograniczać **liczbę reklamacji i uszkodzeń w dostawach**. Wiele problemów przypisywanych transportowi lub niewłaściwemu składowaniu ma źródło w niedoszacowaniu zmian właściwości materiału w czasie. Jeśli producent potrafi przewidzieć takie ryzyko wcześniej, może zmodyfikować konstrukcję, zmienić konfigurację palety lub zalecić inne warunki magazynowania.

Istotne korzyści dotyczą także **współpracy z klientem końcowym**. Coraz częściej odbiorcy oczekują nie tylko pudełka, ale rozwiązania opakowaniowego dopasowanego do produktu, logistyki i wymagań środowiskowych. Producent, który potrafi argumentować decyzje danymi i scenariuszami eksploatacyjnymi, staje się partnerem technologicznym, a nie jedynie dostawcą.

W dłuższej perspektywie rośnie znaczenie **cyfryzacji procesów decyzyjnych**. Dane z laboratoriów, produkcji, transportu i reklamacji mogą zasilać systemy wspierające dobór konstrukcji oraz ocenę ryzyka. To naturalny krok w stronę cyfrowych bliźniaków i predykcyjnego zarządzania jakością.

Nie można pominąć aspektu środowiskowego. Lepsze dopasowanie opakowania do rzeczywistego cyklu życia oznacza mniej nadmiarowego papieru, mniej strat transportowych i wyższą efektywność surowcową. W epoce raportowania ESG i rosnących oczekiwań klientów ma to znaczenie strategiczne.

Można więc powiedzieć, że czas nie jest wrogiem producenta, lecz parametrem, który wcześniej był zbyt rzadko zapraszany do stołu projektowego. Gdy zostanie uwzględniony, decyzje stają się trafniejsze, a opakowania „mądrzejsze” (tabela 2).



Tabela 2. Praktyczne konsekwencje uwzględniania zmian właściwości tektury falistej w czasie dla producentów opakowań, logistyki oraz zarządzania jakością

Obszar	Korzyść
Projektowanie	lepszy dobór gramatur
Logistyka	mniej reklamacji
Testy jakości	trafniejsze procedury
ESG	mniej papieru
Eksport	lepsza odporność klimatyczna

Wnioski

Tektura falista jest materiałem powszechnym, lecz nie prostym. Choć na co dzień postrzegana bywa jako zwykłe opakowanie jednorazowe, z punktu widzenia inżynierskiego stanowi strukturę wielowarstwową o właściwościach silnie zależnych od czasu, warunków klimatycznych i warunków użytkowania. Oznacza to, że jej zachowanie nie może być w pełni opisane jedynie przez zestaw parametrów zmierzonych w chwili produkcji.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że właściwości opakowań zmieniają się już od pierwszych godzin po opuszczeniu linii technologicznej. Stabilizacja wilgotności, relaksacja naprężeń reszkowych oraz dostosowanie do warunków magazynowych wpływają na stan początkowy materiału. W dalszych etapach cyklu życia znaczenia nabierają pełzanie pod długotrwałym obciążeniem, zmęczenie eksploatacyjne, drgania transportowe oraz oddziaływanie temperatury i wilgotności.

W praktyce oznacza to, że pudełko zaprojektowane poprawnie w laboratorium nie zawsze zachowuje te same parametry po tygodniu składowania lub po wymagającej trasie logistycznej. Czas staje się więc ukrytym, lecz realnym parametrem nośności. Pomijanie tego czynnika może prowadzić zarówno do przewymiarowania konstrukcji, jak i do niedoszacowania ryzyka uszkodzeń.

Dla producentów i użytkowników opakowań wnioski jest jednoznaczny: projektowanie powinno coraz częściej uwzględniać rzeczywisty scenariusz życia wyrobu. Znaczenie mają nie tylko wymiary pudełka i gramatura papieru, lecz również długość magazynowania, warunki klimatyczne, sposób transportu oraz możliwość ponownego użycia lub recyklingu. Strategia lightweightingu wymaga jednoczesnej kontroli bezpieczeństwa konstrukcyjnego [7].

W tym kontekście rośnie rola badań klimatycznych, testów długotrwałego obciążenia, monitoringu transportu oraz modeli predykcyjnych wspierających decyzje projektowe. To właśnie te narzędzia mogą przekształcić tradycyjne podejście oparte na pojedynczym teście w nowoczesne zarządzanie zachowaniem opakowania w czasie.

Można więc stwierdzić, że tektura falista powinna być traktowana nie jako materiał statyczny, lecz jako materiał dynamiczny.

Jej parametry nie są zapisane raz na zawsze, lecz ewoluują wraz z kolejnymi etapami użytkowania. Zrozumienie tej zmienności staje się jednym z kluczowych warunków tworzenia lżejszych, bezpieczniejszych i bardziej zrównoważonych opakowań przyszłości.

Pudełko ma swój kalendarz. Im lepiej nauczymy się go czytać, tym lepiej będziemy projektować cały system pakowania.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Biancolini M.E. 2005. "Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board". *Composite Structures* 69 (3) : 322-328. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.07.014.
- [2] Frank B. 2014. "Corrugated box compression – A literature survey". *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128. DOI: 10.1002/pts.2019.
- [3] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. "Komputerowo wspomagane wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz. 1. Wpływ zgniecenia tektury falistej na jej podstawowe parametry". *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388. DOI: 10.15199/54.2018.6.1.
- [4] Garbowski T., Gajewski T. 2020. „Moduł ścinania poprzecznego tektury falistej”. *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. DOI: 10.15199/54.2020.2.1.
- [5] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2021. "Estimation of the compressive strength of corrugated cardboard boxes with various perforations". *Energies* 14 (4) : 1095. DOI: 10.3390/en14041095.
- [6] Garbowski T. 2025. "Inteligentne projektowanie opakowań transportowych – jak optymalizować bezpieczeństwo i koszty?". *Przegląd Papierniczy* 81(7) : 351-358. DOI: 10.15199/54.2025.7.1.
- [7] Garbowski T. 2025. "Exploring the Future of Novel Flute Shapes and Their Mechanical Benefits". *BioResources* 20 (2) : 2003-2006. DOI: 10.15376/biores.20.2.2483-2486.
- [8] Garbowski T., Karasiewicz D. 2026. „Cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej – czy to już możliwe?”. *Przegląd Papierniczy* 82 (4) : 187-195. DOI: 10.15199/54.2026.4.1.
- [9] Jamsari MA, Kueh C, Gray-Stuart EM, Dahm K, Bronlund JE. 2019. „Experimental and numerical performance of corrugated fibreboard at different orientations under four-point bending test”. *Packag Technol Sci* 32 (11) :555-565. DOI: 10.1002/pts.2471.
- [10] Suarez B., Muneta M.L., Sanz-Bobi J.D., Romero G. 2021. "Efficient Design of Thin Wall Seating Made of a Single Piece of Heavy-Duty Corrugated Cardboard". *Materials Testing* 14 (21) : 6645. DOI: 10.3390/ma14216645.
- [11] Talbi N., Batti A., Ayad R., Guo Y.Q. 2009. "An analytical homogenization model for finite element modeling of corrugated cardboard". *Composite Structures* 88 (2) : 280-289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.04.008.