

Inteligentne projektowanie opakowań transportowych – jak optymalizować bezpieczeństwo i koszty?

Smart transport packaging design – how to optimize safety and cost?

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2025.7.1

W artykule przedstawiono zintegrowane podejście do projektowania opakowań transportowych, które łączy techniki numeryczne, zaawansowaną diagnostykę eksperymentalną oraz analizę rzeczywistego cyklu logistycznego. Kluczowym elementem jest precyzyjne szacowanie współczynników bezpieczeństwa, z uwzględnieniem warunków klimatycznych (wilgotność, temperatura), dynamiki transportu (wibracje, wstrząsy), długotrwałego magazynowania (relaksacja i pełzanie materiałów), a także specyfiki rozmieszczenia ładunku na palecie. Dzięki zastosowaniu czujników wilgotności, temperatury i przyspieszeń oraz zaplanowanemu cyklowi badań laboratoryjnych możliwa jest kalibracja modeli numerycznych w celu odwzorowania rzeczywistego zachowania opakowania. Podejście to umożliwia optymalizację doboru tekstury i geometrii opakowania do konkretnego cyklu logistycznego, prowadząc do istotnych oszczędności materiałowych bez pogorszenia bezpieczeństwa transportu.

Słowa kluczowe: inteligentne opakowania, modelowanie numeryczne, eksperyment, logistyka, współczynniki bezpieczeństwa

This article presents an integrated approach to the design of transport packaging that combines numerical modeling, advanced experimental diagnostics, and analysis of real-world logistics cycles. A key element of the methodology is the precise estimation of safety factors, taking into account climatic conditions (humidity, temperature), transport dynamics (vibrations, shocks), long-term storage (material creep and relaxation), and real palletization scenarios, including overhang and non-uniform loading. Particular attention is given to the impact of structural discontinuities such as perforations, hand holes, and cutouts, which are often omitted in empirical strength estimations. The use of sensors to record humidity, temperature, and acceleration, along with a carefully planned experimental program, enables calibration of numerical models that reflect the actual behavior of packaging structures. This approach

makes it possible to optimize the selection of board grade and package geometry according to a specific logistics profile, leading to significant material savings without compromising transport safety.

Keywords: smart packaging, numerical modeling, safety factor, logistics conditions, experimental validation

Wprowadzenie

Znaczenie efektywnego projektowania opakowań transportowych

Współczesne systemy logistyczne charakteryzują się rosnącą złożonością i zmiennością. Produkty transportowane są na coraz większe odległości, z wykorzystaniem różnorodnych środków transportu, przy wielokrotnym przeładunku oraz narażeniu na zmienne warunki atmosferyczne i mechaniczne. W tym kontekście opakowanie przestaje być jedynie barierą ochronną – staje się integralnym elementem całego łańcucha dostaw, który musi spełniać szereg funkcji: ochronną, logistyczną, informacyjną i środowiskową.

Efektywne projektowanie opakowań transportowych [13, 14, 17, 18, 20, 21] nabiera kluczowego znaczenia nie tylko w kontekście bezpieczeństwa przewożonych towarów [21, 22], ale również z punktu widzenia kosztów operacyjnych oraz wpływu na środowisko [6, 7]. Nieadekwatnie dobrana konstrukcja może prowadzić do nadmiernego zużycia materiałów, zwiększenia kosztów jednostkowych produkcji, a także do zwiększonego ryzyka uszkodzenia ładunku, co pociąga za sobą koszty reklamacyjne i logistyczne. Z drugiej strony, zbyt słabe lub niedostatecznie przetestowane opakowania mogą nie sprostać warunkom rzeczywistego transportu, co skutkuje stratami w produktach i utratą zaufania klientów.

W związku z tym rośnie potrzeba wdrażania podejść, które pozwalają na precyzyjne dopasowanie konstrukcji opakowania

do przewidywanego cyklu logistycznego. Obejmuje to m.in. uwzględnienie rodzaju transportu (drogowy, morski, lotniczy), czasu trwania i intensywności drgań oraz warunków klimatycznych panujących w trakcie przewozu i magazynowania. Projektowanie efektywnych opakowań wymaga dziś nie tylko wiedzy inżynierskiej, ale również dostępu do danych pomiarowych, które umożliwiają dokładne modelowanie warunków eksploatacyjnych.

Ograniczenia klasycznych podejść i potrzeba indywidualizacji konstrukcji

Tradycyjne metody projektowania opakowań transportowych oparte są zazwyczaj na empirycznych formułach lub uproszczonych normatywnych procedurach testowych [31]. Choć pozwalają na szybkie oszacowanie podstawowych parametrów wytrzymałościowych, nie uwzględniają pełnego spektrum czynników wpływających na zachowanie opakowania w rzeczywistym cyklu logistycznym. Na przykład, klasyczne testy statyczne (jak ECT [3, 8, 29, 54, 55] czy BCT) nie uwzględniają wpływu długotrwałego obciążenia, zmiennej wilgotności, obecności otworów i perforacji w strukturze opakowania [4].

Ponadto większość standardowych metod zakłada idealne warunki magazynowania (pełne wsparcie, brak wystawiania poza paletę, równomierne rozłożenie masy), co rzadko znajduje odzwierciedlenie w rzeczywistej praktyce. W sytuacji, gdy opakowanie częściowo wystaje poza obrys palety lub jest ułożone na nierównej powierzchni, lokalne przeciążenia mogą prowadzić do inicjacji uszkodzeń, które nie zostałyby przewidziane w klasycznym podejściu.

Kolejnym istotnym ograniczeniem klasycznych metod jest brak zdolności do uwzględnienia zjawisk zależnych od czasu, takich jak pełzanie i relaksacja materiału. Tektura falista, będąca najczęściej stosowanym materiałem w opakowaniach transportowych, wykazuje wyraźne właściwości lepkosprężyste, które prowadzą do obniżenia jej nośności podczas długotrwałego obciążenia [23], szczególnie w warunkach podwyższonej wilgotności. Zjawiska te mogą znacząco wpłynąć na rzeczywistą wytrzymałość opakowania, zwłaszcza w przypadku długiego magazynowania.

W związku z powyższym rośnie zapotrzebowanie na podejścia projektowe, które pozwalają na pełną indywidualizację konstrukcji opakowania, w oparciu o rzeczywiste warunki logistyczne danego produktu. Tylko poprzez integrację danych z pomiarów rzeczywistych (rejestrowanych za pomocą czujników), modelowania numerycznego oraz eksperymentów laboratoryjnych możliwe jest uzyskanie dokładnego obrazu zachowania opakowania i wdrożenie skutecznych strategii optymalizacyjnych [24, 26].

Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zintegrowanego podejścia do projektowania opakowań transportowych, które łączy metody numeryczne z nowoczesnymi technikami pomiarowymi

i eksperymentalnymi. Proponowane podejście umożliwia precyzyjne szacowanie rzeczywistych współczynników bezpieczeństwa w oparciu o dane pochodzące z czujników wilgotności, temperatury i przyspieszenia, zarejestrowanych w czasie rzeczywistych testów transportowych i magazynowych. Model numeryczny, skalibrowany na podstawie rzeczywistych danych, pozwala następnie zoptymalizować dobór materiałów oraz geometrię opakowania względem specyficznych warunków logistycznych. W rezultacie możliwe jest nie tylko zwiększenie bezpieczeństwa produktów, ale również redukcja nadmiernego zużycia materiałów opakowaniowych.

Czynniki wpływające na bezpieczeństwo opakowań

Bezpieczeństwo konstrukcyjne opakowania transportowego nie może być analizowane w oderwaniu od rzeczywistych warunków jego użytkowania. Złożony charakter współczesnych łańcuchów logistycznych sprawia, że pakiet oddziałujących czynników jest bardzo szeroki – obejmuje zarówno aspekty środowiskowe, dynamiczne [13, 51], jak i konstrukcyjne. Zrozumienie i uwzględnienie tych czynników jest kluczowe przy projektowaniu zoptymalizowanych opakowań, których masa i koszt materiałowy są minimalne, a jednocześnie gwarantują one wymaganą nośność [32].

Rodzaj i długość transportu

Transport drogowy, morski, lotniczy oraz intermodalny różnią się znacząco pod względem obciążeń działających na opakowanie. Na przykład, transport morski wiąże się z długotrwałą ekspozycją na wilgoć oraz działaniem niskoczęstotliwościowych przechyłów, podczas gdy transport drogowy charakteryzuje się dużą częstością krótkookresowych wibracji i uderowań. Równie istotna jest długość trwania podróży – im dłuższy okres transportu, tym bardziej prawdopodobna jest kumulacja efektów takich jak pełzanie, zmęczenie materiału i degradacja właściwości mechanicznych. Długość transportu staje się więc parametrem, który musi być jawnie uwzględniony przy definiowaniu współczynnika bezpieczeństwa – niezależnie od przyjętego modelu (empirycznego lub numerycznego).

Warunki klimatyczne (wilgotność, temperatura)

Tektura falista, jako materiał higroskopijny, jest szczególnie wrażliwa na warunki środowiskowe, zwłaszcza na podwyższoną wilgotność względną powietrza. Już przy 70–90% RH dochodzi do znacznej utraty sztywności i nośności opakowań [37], a efekt ten potęgowany jest przez podwyższoną temperaturę. Cykl zmiennych warunków klimatycznych – np. transport nocą i magazynowanie w nasłonecznionym kontenerze – może prowadzić do gwałtownych zmian w naprężeniach wewnętrznych oraz przyspieszenia procesów starzenia materiału. Dlatego też coraz częściej wdraża się czujniki rejestrujące wilgotność i temperaturę [12] w czasie

rzeczywistym, w celu późniejszej kalibracji modeli numerycznych. Modele te mogą następnie uwzględniać zależności materiałowe zależne od wilgotności (tzw. moisture-dependent stiffness degradation) oraz prognozować spadek nośności w czasie.

Dynamika transportu: wibracje, udary, przechyty

Podczas transportu opakowania narażone są na powtarzające się drgania i nagłe wstrząsy, których charakterystyka zależy od typu pojazdu, nawierzchni i sposobu mocowania ładunku. Szczególnie niebezpieczne są rezonansowe częstotliwości pobudzenia, które mogą skutkować gwałtownym wzrostem amplitudy drgań, prowadząc do lokalnych uszkodzeń mechanicznych lub poluzowania ułożenia ładunku wewnątrz opakowania. W transporcie morskim dodatkowo występują przechyty i długookresowe przyspieszenia związane z kołysaniem statku. Zastosowanie akcelermetrów w testach terenowych umożliwia rejestrację rzeczywistego widma obciążeń dynamicznych, co pozwala na dokładne odtworzenie tych warunków w środowisku numerycznym lub laboratoryjnym (np. na stole wibracyjnym).

Warunki magazynowania i układanie na palety

Kluczowym aspektem wpływającym na bezpieczeństwo opakowania jest sposób jego składowania. W wielu przypadkach zdarza się, że opakowania wystają poza obrys palety lub są nierównomiernie obciążone. Takie warunki prowadzą do miejscowego przeciążenia dolnych warstw paletyzacji oraz do inicjacji uszkodzeń zginających lub lokalnego wyboczenia ścianek. Dodatkowym czynnikiem jest czas magazynowania – długotrwała ekspozycja na obciążenie powoduje stopniowe obniżenie sztywności materiału, z uwagi na pełzanie. W projektowaniu nowoczesnych opakowań konieczne staje się uwzględnienie geometrii podparcia, rozmieszczenia sąsiednich opakowań oraz symetrii układu warstw w całej jednostce paletowej. Modele numeryczne oparte na rzeczywistych warunkach brzegowych mogą znacząco zmniejszyć niepewność projektową wynikającą z uproszczonych założeń.

Wpływ relaksacji i pełzania materiału w czasie

Relaksacja i pełzanie to zjawiska lepkosprężyste, które szczególnie silnie manifestują się w opakowaniach przechowywanych przez dłuższy czas pod stałym obciążeniem. Tektura falista, choć często traktowana jako materiał sprężysty, z biegiem czasu traci część swojej zdolności do przenoszenia obciążeń – zwłaszcza w warunkach wysokiej wilgotności. Zjawisko pełzania prowadzi do zwiększenia ugięcia konstrukcji, natomiast relaksacja powoduje redukcję sił wewnętrznych i naprężeń, co może skutkować obniżeniem nośności całego układu. Aby uwzględnić te efekty w projektowaniu, konieczne jest przeprowadzanie długookresowych testów BCT oraz wdrażanie modeli konstytutywnych opisujących właściwości reologiczne materiału w funkcji czasu i wilgotności.

Otworki, perforacje i inne osłabienia geometryczne

W wielu przypadkach projekt opakowania zawiera otworki uchwytowe, perforacje [4], nacięcia, przegniecenia [27, 34], nadruki [5] lub okna ekspozycyjne, które znacząco wpływają na jego wytrzymałość. Tego typu elementy osłabiają przekrój nośny, powodując koncentrację naprężeń oraz lokalne efekty wyboczeniowe. Niestety, wiele klasycznych metod szacowania nośności opakowań (np. bazujących na SCT i ECT [28, 36, 46-48], SST [9, 15, 30]) nie uwzględnia obecności takich osłabień. W niniejszym podejściu zakłada się, że zarówno w modelach numerycznych, jak i eksperymentalnych, otworki te są jawnie uwzględniane. Umożliwia to oszacowanie lokalnych współczynników korekcyjnych oraz zidentyfikowanie potencjalnych punktów krytycznych w geometrii opakowania.

Podejście eksperymentalne i pomiarowe

W celu precyzyjnego odzwierciedlenia rzeczywistych warunków eksploatacji opakowań transportowych niezbędne jest przeprowadzenie przemyślanej kampanii eksperymentalnej. Dane pochodzące z pomiarów terenowych stanowią podstawę zarówno do kalibracji modeli numerycznych, jak i do opracowania bardziej realistycznych współczynników bezpieczeństwa. Kluczową rolę odgrywa tutaj zastosowanie odpowiednio dobranych czujników oraz kontrolowane eksperymenty symulujące rzeczywisty cykl logistyczny.

Planowanie kampanii badawczej

Kampania badawcza powinna być zaprojektowana w taki sposób, aby objąć reprezentatywne scenariusze transportu i magazynowania danego typu produktu. W pierwszym kroku identyfikuje się główne zagrożenia dla struktury opakowania: zmienność klimatu, intensywność wibracji, czas trwania obciążenia i potencjalne niestandardowe układy paletowe. Na tej podstawie definiuje się układ testowy – zarówno w warunkach terenowych (rzeczywiste trasy transportowe, magazyny), jak i laboratoryjnych (komory klimatyczne, stoły wibracyjne itp.). Dobrze zaprojektowany plan badań powinien umożliwić rejestrację zmiennych czasowych i przestrzennych dla całego cyklu użytkowego opakowania.

Zastosowanie czujników: wilgotność, temperatura, akceleracja

Podstawowymi źródłami danych pomiarowych są miniaturowe czujniki rejestrujące parametry środowiskowe i dynamiczne. Czujniki wilgotności i temperatury umieszczane są wewnątrz opakowania oraz w jego otoczeniu, aby uchwycić zmienność klimatu w transporcie i magazynowaniu. Akcelerometry rejestrują wibracje, udary i przeciążenia w trzech osiach. Dane te pozwalają na analizę spektralną drgań oraz identyfikację krytycznych impulsów.

Ważnym aspektem jest synchronizacja czasowa i przestrzenna danych z wielu czujników. Zebrane informacje nie tylko pozwalają

na ocenę warunków transportowych, ale stanowią bezpośrednie wejście do modeli symulacyjnych, umożliwiając realistyczne odwzorowanie obciążeń działających na opakowanie.

Rejestracja warunków rzeczywistego transportu i magazynowania

Dane zbierane w terenie są szczególnie cenne, ponieważ pozwalają uchwycić niestandardowe i trudne do przewidzenia sytuacje: gwałtowne zmiany temperatury, przypadkowe uderzenia, przechylenie palet, kondensację pary wodnej, a nawet błędy ludzkie podczas załadunku. Monitorowanie obejmuje cały cykl logistyczny – od momentu zapakowania produktu, przez transport między magazynami i centrami dystrybucji, aż po końcowy rozładunek u klienta.

W przypadku dłuższych tras (np. transport kontenerowy drogą morską), możliwe jest prowadzenie długoterminowej rejestracji danych z wykorzystaniem rejestratorów zasilanych bateryjnie. Warto również gromadzić dane z różnych stref magazynowych (np. chłodni, kontenerów otwartych, hal nieogrzewanych), aby uwzględnić zmienność klimatyczną pomiędzy regionami.

Warunki brzegowe i ich implementacja w modelu

Jednym z największych wyzwań przy wykorzystaniu danych eksperymentalnych w analizie numerycznej jest właściwe odwzorowanie warunków brzegowych. W kontekście opakowań istotne są: rzeczywisty sposób podparcia, rozkład nacisków od opakowań leżących powyżej, lokalne anomalie wynikające z rozmieszczenia perforacji lub asymetrii geometrii, a także kontakt z powierzchnią palety lub podłoża.

Na podstawie zebranych danych możliwe jest sparametryzowanie tych warunków, np. poprzez odwzorowanie spektrum drgań jako wymuszenia czasowo-zmiennych przyspieszeń lub odwzorowanie zawilgocenia jako funkcji wpływającej na lokalne parametry

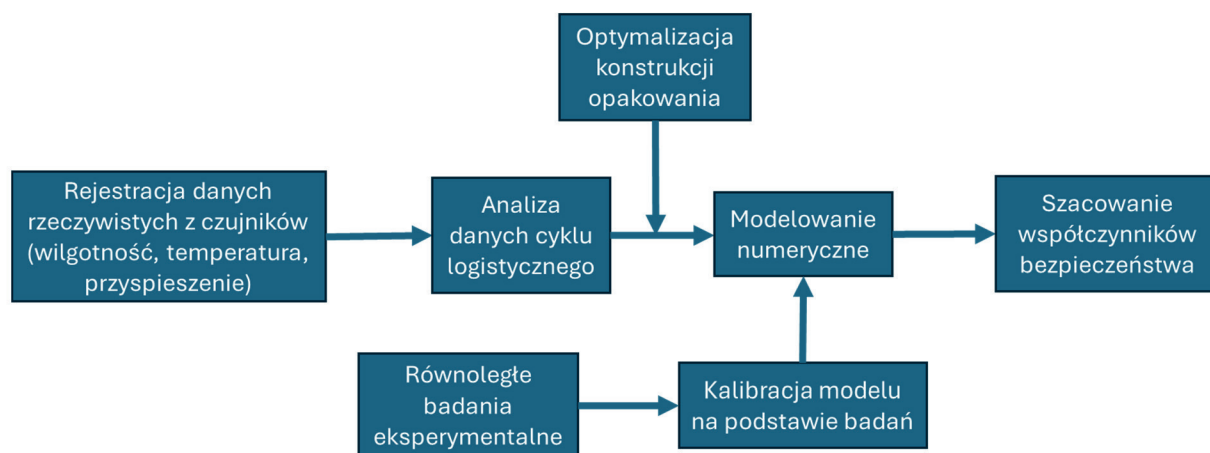
materiałowe. Dane z czujników stają się zatem nie tylko obserwacją rzeczywistości, ale też punktem wyjścia do realistycznego modelowania i późniejszej optymalizacji konstrukcji opakowania.

Modelowanie numeryczne opakowań

Modelowanie numeryczne stanowi jeden z filarów współczesnego projektowania opakowań transportowych. Umożliwia ono nie tylko odzwierciedlenie złożonych zjawisk mechanicznych [44], środowiskowych i dynamicznych, ale także pozwala na przeprowadzenie analiz wariantowych oraz optymalizacyjnych w sposób znacznie szybszy i tańszy niż tradycyjne podejścia eksperymentalne. Szczególnie istotne jest to w przypadku materiałów o strukturze warstwowej i niejednorodnej, takich jak tektura falista, w której obecność otworów, perforacji [4] i stref lokalnego osłabienia znacząco wpływa na rozkład naprężeń i nośność całkowitą.

Najczęściej wykorzystywaną techniką obliczeniową jest Metoda Elementów Skończonych (MES) [14, 40-43], która może przyjmować różny stopień złożoności w zależności od potrzeb danego etapu projektowania [2, 10, 40, 41]. Modele uproszczone, oparte na efektywnych parametrach sztywności uzyskanych metodą homogenizacji [1, 20, 38, 39], świetnie sprawdzają się w analizach globalnych, takich jak ocena nośności całej konstrukcji poddanej obciążeniu pionowemu. Bardziej zaawansowane modele warstwowe odwzorowują geometrię poszczególnych warstw tektury – linerów i flutingu – w układzie trójwymiarowym, co pozwala na analizę lokalnych efektów, takich jak wyboczenie, rozwarstwienie, czy pękanie fal. W przypadkach złożonych konstrukcji stosuje się także modele hybrydowe, łączące elementy powłokowe z belkowymi i kontaktowymi, z dodatkowymi zależnościami materiałowymi od wilgoci i temperatury.

Aby zapewnić zgodność modelu z rzeczywistością, konieczna jest jego kalibracja na podstawie wyników badań eksperymentalnych.



Schemat ilustrujący przepływ informacji i proces projektowania inteligentnych opakowań transportowych

Proces ten obejmuje zarówno testy wytrzymałościowe (BCT [11], ECT, SCT), jak i długookresowe badania pełzania prowadzone w kontrolowanych warunkach klimatycznych. Parametry materiałowe, takie jak moduł sprężystości czy granica plastyczności, muszą być dopasowane do danych pomiarowych. W modelach nieliniowych kluczowe znaczenie mają także charakterystyki degradacji materiału zależne od czasu i warunków środowiskowych. Kalibracja może mieć charakter manualny, oparty na dopasowaniu wykresów siła-przemieszczenie, lub zautomatyzowany, z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych, takich jak algorytmy genetyczne czy estymacja bayesowska.

Po przeprowadzeniu kalibracji możliwe jest symulowanie pełnego cyklu logistycznego, obejmującego fazę paletowania, magazynowania i transportu. W analizach tych uwzględnia się rzeczywiste rozkłady obciążeń, asymetrie ułożenia, zmienne warunki środowiskowe oraz efekty długotrwałego działania sił, prowadzące do pełzania i relaksacji naprężeń. Modele dynamiczne mogą uwzględniać dane z czujników akcelerometrycznych jako rzeczywiste przebiegi czasowe obciążeń, co pozwala na ocenę odporności opakowania na wibracje, wstrząsy i przeciążenia występujące w transporcie.

Ostatecznym celem modelowania jest wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa, które uwzględniają nie tylko ekstremalne obciążenia, ale także degradację materiału i akumulację efektów środowiskowych w czasie. Zamiast stosować jedną konserwatywną wartość, jak ma to miejsce w klasycznych normach, możliwe jest określenie lokalnych współczynników dla poszczególnych stref konstrukcji oraz analizowanie ich zmienności w czasie. Pozwala to na bardziej racjonalne podejście do projektowania, umożliwiające obniżenie zużycia materiału przy zachowaniu wymaganej niezawodności.

Optymalizacja konstrukcji opakowania

Po zbudowaniu i skalibrowaniu modelu numerycznego możliwe staje się jego wykorzystanie do optymalizacji konstrukcji opakowania. Celem tego etapu jest znalezienie takiej konfiguracji materiałowej i geometrycznej, która przy minimalnym koszcie i masie zapewni spełnienie kryteriów nośności, stabilności i funkcjonalności w zadanym cyklu logistycznym. Kluczową rolę odgrywa tu integracja wiedzy na temat obciążeń środowiskowych, dynamicznych oraz lokalnych warunków paletowania i magazynowania.

Proces optymalizacji rozpoczyna się od określenia celów projektowych. Zazwyczaj są nimi minimalizacja zużycia tektury lub jej masy, redukcja kosztów jednostkowych, poprawa odporności na zawilgocenie, a także możliwość automatyzacji składania i pakowania. Jednocześnie należy spełnić wiele warunków: minimalna nośność musi zostać zachowana, a przemieszczenia i odkształcenia nie mogą przekroczyć wartości dopuszczalnych, zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa, jak i estetyki lub ergonomii użytkownika.

Dobór materiałów [15, 16, 34, 50] i geometrii opakowania musi być dostosowany do konkretnego produktu oraz warunków jego transportu. W praktyce oznacza to konieczność precyzyjnego wyboru rodzaju fali, liczby warstw, jakości i gramatury papierów, jak również optymalnego rozmieszczenia otworów, wzmocnień i stref zginania. W konstrukcjach narażonych na duże wahania wilgotności [56] szczególnie ważne jest zastosowanie materiałów o podwyższonej odporności klimatycznej lub takich, które wykazują mniejszą podatność na pełzanie.

Największą efektywność optymalizacji uzyskuje się wówczas, gdy model numeryczny wykorzystuje dane rzeczywiste z pomiarów środowiskowych i dynamicznych, zarejestrowane w trakcie rzeczywistych transportów. Umożliwia to odwzorowanie pełnego cyklu użytkowego, w tym sekwencji zmiennych warunków klimatycznych, przyspieszeń oraz sposobu magazynowania. Dzięki temu można projektować opakowania przeznaczone do konkretnych tras transportowych, klientów i warunków eksploatacyjnych, zamiast stosować podejście uniwersalne oparte na najgorszym scenariuszu.

Zoptymalizowana konstrukcja może zostać wyznaczona zarówno metodą lokalną – przy użyciu algorytmów gradientowych – jak i metodami globalnymi, opartymi np. na algorytmach genetycznych [55], które pozwalają na przeszukiwanie szerokiego spektrum rozwiązań o różnej topologii. Często stosuje się również analizę wrażliwości [19, 33, 35, 36] oraz wielokryterialną optymalizację, gdzie dobierane są rozwiązania kompromisowe pomiędzy kosztami, masą i bezpieczeństwem. Całość procesu kończy się walidacją rozwiązania w formie fizycznego prototypu lub testów laboratoryjnych, a także aktualizacją bazy danych projektowych, co umożliwia wykorzystanie zdobytej wiedzy w kolejnych projektach.

Studium przypadku (wariant hipotetyczny)

W celu zilustrowania praktycznego zastosowania zaproponowanej metodyki, przeprowadzono koncepcyjną analizę opakowania transportowego pod kątem jego dopasowania do wieloetapowego cyklu logistycznego. Studium przypadku opiera się na danych reprezentatywnych dla typowych scenariuszy dystrybucji międzykontynentalnej, w których produkty podlegają długotrwałemu magazynowaniu oraz transportowi morskemu i drogowemu. Konstrukcja opakowania została zaprojektowana z myślą o transporcie wrażliwego towaru, wymagającego wysokiej ochrony, przy jednocześnie presji kosztowej i ograniczenia masy jednostkowej.

Zgodnie z przyjętą procedurą, cykl projektowy rozpoczął się od definicji warunków środowiskowych i dynamicznych na podstawie zarejestrowanych danych z wcześniejszych kampanii pomiarowych autora i jego grupy badawczej. Uwzględniono typowe profile wilgotnościowe (osiągające okresowo 90-95% RH), zmienność temperatur w zakresie od 5°C do 35°C, jak również widmo drgań i przyspieszeń odpowiadające warunkom transportu morskiego

oraz drogowego w Europie. Dodatkowo zasymulowano przypadek długotrwałego magazynowania opakowań na dolnej warstwie palety, w warunkach braku pełnego podparcia.

Model numeryczny wykonano z zastosowaniem elementów powłokowych oraz wiązań kontaktowych, przy odwzorowaniu geometrii otworów uchwytych i stref osłabionych przez perforacje [4]. Właściwości materiałowe zależne od wilgotności zaimplementowano w oparciu o wcześniej skalibrowane charakterystyki dla papierów siarczanowych i siarczanowo-makulaturowych (kraftliner i testliner), bazując na wynikach badań SCT i ECT [49] w warunkach zmiennej wilgotności. Wprowadzono również model pełzania, który pozwalał śledzić zmiany przemieszczeń i naprężeń w funkcji czasu podczas obciążenia magazynowego trwającego 20-30 dni.

Analizowano szereg wariantów konstrukcyjnych, w których zmieniano m.in. typ tektury (fale B, C, E oraz kombinacje BC i EB), jakość i gramaturę warstw zewnętrznych, liczbę warstw oraz geometrię podstawy opakowania względem palety [52]. W niektórych wariantach model odzwierciedlał również przypadek wystawiania opakowania poza obrys palety, co znacząco wpływało na lokalne koncentracje naprężeń i sztywność boczną konstrukcji [45].

Wyniki symulacji wykazały wyraźną wrażliwość konstrukcji na warunki klimatyczne i sposób ułożenia na palecie. W przypadku niektórych konfiguracji możliwe było osiągnięcie redukcji zużycia materiału na poziomie 8-12% względem wariantu referencyjnego, przy zachowaniu współczynnika bezpieczeństwa powyżej 1,5. Szczególnie efektywne okazały się warianty z bardziej jednorodnym rozkładem sztywności w płaszczyźnie ścian bocznych, jak również zastosowanie odporniejszych linerów o mniejszej podatności na degradację wilgotnościową.

Symulacje potwierdziły również, że klasyczne podejścia nie są w stanie uchwycić lokalnych efektów wynikających z obecności otworów czy asymetrycznego podparcia. W konstrukcjach zawierających otwory chwytowe, nieuwzględnionych w empirycznych estymacjach nośności, model wykazał lokalne obniżenie marginesu bezpieczeństwa nawet o 30%, co w projektowaniu opartym na danych numerycznych może być skorygowane przez modyfikację geometrii lub lokalne wzmocnienia.

Choć przedstawione wyniki opierają się na założeniach numerycznych i danych historycznych, a nie na pełnym wdrożeniu przemysłowym, doświadczenie autora w pracy z rzeczywistymi danymi pozwala sądzić, że potencjalne oszczędności materiałowe rzędu kilku do kilkunastu procent są osiągalne w praktyce. Wdrożenie takiego podejścia w środowisku przemysłowym wymagałoby zintegrowania pomiarów środowiskowych z systemami planowania produkcji oraz wdrożenia procedur automatycznej kalibracji modeli do określonych klas opakowań.

Powyższe studium potwierdza, że zaproponowana metodologia może stanowić wartościowe narzędzie wspierające projektowanie inteligentnych, zoptymalizowanych opakowań transportowych. Jej wdrożenie może prowadzić do lepszego wykorzystania materiału,

zwiększenia niezawodności konstrukcji i redukcji kosztów całkowitych – szczególnie w logistyce wieloetapowej, gdzie ryzyko uszkodzeń jest wysokie, a warunki środowiskowe znacznie odbiegają od laboratoryjnych.

Wnioski i rekomendacje

Przedstawiona w artykule koncepcja inteligentnego projektowania opakowań transportowych, integrująca modelowanie numeryczne, dane eksperymentalne oraz rejestrację warunków rzeczywistych, stanowi obiecujące podejście do projektowania konstrukcji lepiej dopasowanych do złożonych cykli logistycznych. Analiza przeprowadzona na danych hipotetycznych wskazuje, że wdrożenie takiego podejścia może prowadzić do wymiernych korzyści w postaci redukcji zużycia materiału, zwiększenia efektywności strukturalnej opakowań oraz poprawy przewidywalności ich zachowania w warunkach eksploatacyjnych.

Szczególnie istotnym elementem jest możliwość szacowania rzeczywistych współczynników bezpieczeństwa, nie jako wartości szacunkowej, opartej na uniwersalnych normach, lecz jako parametru dynamicznego, zależnego od konkretnego środowiska transportowego i magazynowego. Umożliwia to bardziej świadome podejmowanie decyzji projektowych i pozwala lepiej zrównoważyć wymagania bezpieczeństwa z presją na ograniczenie masy i kosztów materiałowych.

Zastosowanie modeli numerycznych kalibrowanych na podstawie danych pomiarowych, w tym rejestracji wilgotności, temperatury i przyspieszeń, pozwala na realistyczne odwzorowanie całego cyklu życia opakowania – od momentu załadunku aż po dostawę do odbiorcy końcowego. Pozwala to również identyfikować niewralgiczne momenty cyklu logistycznego, w których konstrukcja opakowania jest szczególnie narażona na uszkodzenia, co z kolei otwiera możliwość projektowania celowanych wzmocnień lub zmian w układzie geometrii.

Chociaż przeprowadzona analiza miała charakter koncepcyjny, uzyskane rezultaty wskazują na zasadność rozwijania i wdrażania tej metodyki w praktyce przemysłowej. Wstępne symulacje pokazały, że w zależności od warunków logistycznych, skali produkcji i rodzaju zastosowanego materiału, możliwa jest optymalizacja konstrukcji opakowań w zakresie od kilku do kilkunastu procent zużycia surowca, przy zachowaniu lub nawet podniesieniu poziomu bezpieczeństwa. Takie możliwości wpisują się w aktualne trendy gospodarki cyrkularnej, zrównoważonego rozwoju oraz cyfryzacji projektowania [25].

W dalszej perspektywie wskazane jest prowadzenie badań z wykorzystaniem danych rzeczywistych pochodzących z pomiarów terenowych oraz rozwijanie algorytmów optymalizacji wielokryterialnej, które uwzględniają nie tylko wytrzymałość i koszt, ale również aspekty środowiskowe i logistyczne. Wprowadzenie cyfrowych bliźniaków opakowań, zintegrowanych z platformami

monitoringu łańcucha dostaw, mogłoby stanowić kolejny krok w kierunku pełnej personalizacji projektowania opakowań transportowych, dostosowanych do rzeczywistego ryzyka operacyjnego.

Artykuł recenzowany

LITERATURA

- [1] Aduke R.N., Venter M.P., Coetzee C.J. 2023. "An Analysis of Numerical Homogenisation Methods Applied on Corrugated Paperboard". *Mathematical and Computational Applications* 28 (2) : 46.
- [2] Aduke R.N. Venter M.P., Coetzee C.J. 2024. "Numerical Modelling of Corrugated Paperboard Boxes". *Mathematical and Computational Applications* 29 (4) : 70.
- [3] Anastas J.V. 1998. "Edgewise compression test". International Corrugated Containers Conference & Trade Fair, Proceedings.
- [4] Andrzejak K., Mrówczyński D., Gajewski T., Garbowski T. 2024. „Investigating the Effect of Perforations on the Load-Bearing Capacity of Cardboard Packaging”. *Materials* 17 (17) : 4205. doi.org/10.3390/ma17174205.
- [5] Andrzejak K., Garbowski T. 2021. "The influence of analog and digital printing on the strength parameters of corrugated board | Wpływ nadruku techniką analogową i cyfrową na parametry wytrzymałościowe tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 77 (11) : 593-599. DOI: 10.15199/54.2021.11.2.
- [6] Berry T.M., Defraeye T., Ambaw A., Coetzee C.J., Opara U.L. 2022. "Exploring novel carton footprints for improved refrigerated containers usage and a more efficient supply chain". *Biosystems Engineering* 220 : 181-202.
- [7] Berry T.M., Defraeye T., Shrivastava C., Ambaw A., Coetzee C., UL Opara U.L. 2022. „Designing Ventilated Packaging for the Fresh Produce Cold Chain”. *Food and Bioproducts Processing* 134 : 121-149.
- [8] Brittain J. 2003. "ECT: Edge crush test | ECT: Prueba de aplastamiento del borde". *Mari Papel y Corrugado* 16 (3) : 49-50.
- [9] Chalmers I.R. 2007. "The use of MD shear stiffness by the torsional stiffness technique to predict corrugated board properties and box performance". *Appita Annual Conference* 1 : 145-150.
- [10] Cillie J., Coetzee C. 2022. „Experimental and Numerical Investigation of the In-Plane Compression of Corrugated Paperboard Panels”. *Mathematical and Computational Applications* 27 (6) : 108.
- [11] Coffin D.W., Wade K., Hussain S. 2019. "Links between BCT and lifetime for corrugated boxes". *Paper Conference and Trade Show, PaperCon* 2 : 1334-1348.
- [12] Cornaggia A., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2023. „Influence of humidity and temperature on mechanical properties of corrugated board – Numerical investigation”. *BioResources* 18 : 7490-7509. doi.org/10.15376/biores.18.4.7490-7509.
- [13] Cornaggia A., Mrówczyński D., Gajewski T., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. 2024. "Advanced Numerical Analysis of Transport Packaging". *Applied Sciences* 14 (24) : 11932. doi.org/10.3390/app142411932.
- [14] Di Russo F.M., Desole M.M., Gisario A., Barletta M. 2023. "Evaluation of wave configurations in corrugated boards by experimental analysis (EA) and finite element modeling (FEM): the role of the micro-wave in packaging design". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126 (11-12) : 4963-4982.
- [15] Garbowski T. 2025. "Numerical analysis of transverse shear in corrugated board with non-standard fluting geometry | Numeryczna analiza ścinania poprzecznego płyt z tektury falistej z warstwą pofalowaną o niestandardowej geometrii". *Przegląd Papierniczy* 81 (5) : 249-257. DOI: 10.15199/54.2025.5.1.
- [16] Garbowski T. 2025. "Flat crush analysis of corrugated board with futuristic fluting geometries | Analiza zginięcia płaskiego tektury falistej z warstwą pofalowaną o futurystycznych kształtach". *Przegląd Papierniczy* 81 (4) : 205-212. DOI: 10.15199/54.2025.4.1.
- [17] Garbowski T., Rutkowski J. 2024. "Corrugated board as a versatile material for packaging and engineering structures – an overview of applications | Tektura falista jako wszechstronny materiał do opakowań i konstrukcji inżynierskich – przegląd zastosowań". *Przegląd Papierniczy* 80 (12) : 678-682. DOI: 10.15199/54.2024.12.3.
- [18] Garbowski T., Pośpiech M. 2024. "The Impact of Scientific Research on Corrugated Board on the Lifecycle of Packaging | Wpływ badań nad tekturą falistą na cykl życia opakowań". *Packaging Review* 4 : 6-17. DOI: 10.15199/42.2024.4.1.
- [19] Garbowski T., Borecki P. 2024. "Analysis of the impact of futuristic corrugated layer shape on mechanical properties and cost of single-wall corrugated board | Analiza wpływu futurystycznych kształtów warstwy pofalowanej na parametry mechaniczne i koszt trójwarstwowej tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 80 (11) : 609-615. DOI: 10.15199/54.2024.11.1.
- [20] Garbowski T. 2024. "The role of homogenization in predicting the load-bearing capacity of corrugated packaging – a short review of methods and applications | Rola homogenizacji w predykcji nośności opakowań z tektury falistej – przegląd metod i zastosowań". *Przegląd Papierniczy* 80 (5) : 271-278. DOI: 10.15199/54.2024.5.1.
- [21] Garbowski T. 2023. "Evaluating safety factors in corrugated packaging for extreme environmental conditions | Ocena czynników bezpieczeństwa opakowań z tektury falistej w ekstremalnych warunkach środowiskowych". *Packaging Review* 4 : 6-15. DOI: 10.15199/42.2023.4.1.
- [22] Garbowski T. 2023. "Safety Factors in the Design of Corrugated Board Packaging | Współczynniki bezpieczeństwa w projektowaniu opakowań z tektury falistej". *Packaging Review* 3 : 16-22. DOI: 10.15199/42.2023.3.2.
- [23] Garbowski T. 2023. "The most common mistakes when estimating the load-bearing capacity of corrugated board packaging | Najczęściej popełniane błędy podczas szacowania nośności opakowań z tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 79 (9) : 485-488. DOI: 10.15199/54.2023.9.1.
- [24] Garbowski T. 2023. "The use of artificial intelligence for the optimal production of corrugated board | Zastosowanie sztucznej inteligencji do optymalnej produkcji tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 79 (5) : 279-288. DOI: 10.15199/54.2023.5.2.
- [25] Garbowski T. 2022. "Digitization of corrugated board | Digitalizacja tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 78 (12) : 683-686. DOI: 10.15199/54.2022.12.2.
- [26] Garbowski T. 2022. "Optimal corrugated board – what does it mean? | Optymalna tektura falista – czyli jaka?". *Przegląd Papierniczy* 78 (9) : 517-524. DOI: 10.15199/54.2022.9.1.
- [27] Garbowski T. 2022. "Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board | Wpływ wstępnych imperfekcji na odporność tektury falistej na zginięcie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 78 (6) : 337-341. DOI: 10.15199/54.2022.6.1.

- [28] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "From paper to corrugated board – modeling the edge crush test | Od papieru do tektury – modelowanie testu zgniatania krawędziowego". *Przegląd Papierniczy* 78 (5) : 271-277. DOI: 10.15199/54.2022.5.1.
- [29] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board | Związek między SCT papieru a ECT jednościennej tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 78 (4) : 210-216. DOI: 10.15199/54.2022.4.1.
- [30] Garbowski T., Gajewski T. 2020. "Transverse shear modulus in corrugated materials | Moduł ścinania poprzecznego tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. DOI: 10.15199/54.2020.2.1.
- [31] Garbowski T., Nizialek-Łukawska M., Kuca M. 2019. "Analytical verification of popular McKee's formula | Analityczna weryfikacja popularnej formuły McKee". *Przegląd Papierniczy* 75 (12) : 767-773. DOI: 10.15199/54.2019.12.2.
- [32] Garbowski T., Garbowska L. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 3. Laboratory-numerical procedure for an identification of elastic properties of corrugated board | Komputerowo wspomaganie wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz.3. Laboratoryjno-numeryczna procedura identyfikacji sprężystych parametrów materiałowych tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 74 (9) : 577-585. DOI: 10.15199/54.2018.9.2.
- [33] Garbowski T., Garbowska L. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 2. The sensitivity analysis in selected laboratory tests of corrugated board | Komputerowo wspomaganie wyznaczanie nośności opakowań z tektury falistej. Cz.2. Analiza wrażliwości w wybranych testach laboratoryjnych tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 74 (8) : 503-508. DOI: 10.15199/54.8.1.
- [34] Garbowski T., Czelusta I., Graczyk Ł. 2018. "Computer aided estimation of corrugated board box compression strength. Part 1. The influence of flute crash 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. DOI: 10.15199/54.2018.6.1.
- [35] Garbowski T., Przybyszewski G. 2015. "The Sensitivity Analysis of Critical Force in Box Compression Test | Analiza wrażliwości siły krytycznej w teście zgniatania pudła z tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 71 (5) : 275-280. DOI: 10.15199/54.2015.5.1.
- [36] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity Analysis of Edge Crush Test | Analiza wrażliwości w teście krawędziowego zgniatania". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [37] Garbowski T., Borysiewicz A. 2014. "The Stability of Corrugated Board Packages | Stateczność opakowań z tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 70 (8) : 452-458.
- [38] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 2. Numerical homogenization | Homogenizacja tektury falistej Cz. 2. Homogenizacja numeryczna". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [39] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 1. Analytical homogenization | Homogenizacja tektury falistej Cz. 1. Homogenizacja analityczna". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [40] Garbowski T., Jarmuszcak 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.
- [41] Garbowski T., Jarmuszcak 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.
- [42] Gilchrist A.C., Suhling J.C., Urbanik T.J. 1999. "Nonlinear finite element modeling of corrugated board". American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD 231 : 101-106.
- [43] Haj-Ali R., Choi J., Wei B.-S., Popil R., Schaepe M. 2009. "Refined nonlinear finite element models for corrugated fiberboards". *Composite Structures* 87 (4) : 321-333.
- [44] Hiller B. 2017. "Optical strain field analysis an innovative test method to analyse the mechanical properties of fibre-based materials". International Paperworld IPW 2017-Janua (11-12) : 11-13.
- [45] Hoon M.L., Park J.M. 2004. "Flexural stiffness of selected corrugated structures". *Packaging Technology and Science* 17 (5) : 275-286.
- [46] Jamsari A., Nevins A., Kueh C., Gray-Stuart E., Dahm K., Bronlund J. 2020. "Modelling the Edge Crushing Performance of Corrugated Fibreboard Under Different Moisture Content Levels". *Mechanisms and Machine Science* 75 : 609-620.
- [47] Jamsari M.A., Kueh C., Gray-Stuart E.M., Dahm K., Bronlund J.E. 2020. "Modelling the impact of crushing on the strength performance of corrugated fibreboard". *Packaging Technology and Science* 33 (4-5) : 159-170.
- [48] Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kotakowski Z. 2020. "Calculation of honeycomb paperboard resistance to EDGE crush test". *Materials* 13 (7) : 1706.
- [49] Łęcka M., Mania R., Marynowski K. 2006. "New method of the ECT index of corrugated board determination | Nowa metoda wyznaczania odporności na zgniatanie krawędziowe tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 62 (4) : 207-210.
- [50] Mikami E., Ibaraki T., Kodaka I. 2005. "Optimum design of flute structure for edgewise compression of corrugated fiberboard". *Kami Pa Gikyoshi/Japan Tappi Journal* 59 (10) : 94-100.
- [51] Mrówczyński, D.; Gajewski, T.; Garbowski, T. 2023. „A Simplified Dynamic Strength Analysis of Cardboard Packaging Subjected to Transport Loads”. *Materials* 16 (14) : 5131. doi.org/10.3390/ma16145131.
- [52] Mrówczyński, D., Gajewski, T., Pośpiech, M., Garbowski, T. 2024. „Estimation of the Compressive Strength of Cardboard Boxes Including Packaging Overhanging on the Pallet”. *Applied Sciences* 14 (2) : 819. doi.org/10.3390/app14020819.
- [53] Rogalka, M.; Grabski, J.K.; Garbowski, T. 2023. „Identification of Geometric Features of the Corrugated Board Using Images and Genetic Algorithm”. *Sensors* 23 (13) : 6242. doi.org/10.3390/s23136242.
- [54] Schrampf K.E., Whitsitt W.J. 1988. "Faster, alternative ECT test procedure". Corrugated Containers Conference, Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry : 65-69.
- [55] Szewczyk W. 2008. "Edge crush test of corrugated board | Odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 64 (2) : 93-96.
- [56] Tutak D., Özakhun C., Akgul A. 2007. "The examination of the impact of humidity on cardboard endurance in the offset printed and laminated packages". Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts, TAGA : 575-584.