

Cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej – czy to już możliwe?

Digital twin of corrugated board packaging – is it already feasible?

TOMASZ GARBOWSKI, DAWID KARASIEWICZ

DOI: 10.15199/54.2026.4.1

Cyfrowy bliźniak stanowi jedno z kluczowych pojęć Przemysłu 4.0 i 5.0, oznaczając dynamiczny, stale aktualizowany model rzeczywistego obiektu, zasilany danymi pomiarowymi oraz wspierający podejmowanie decyzji technicznych. W ostatnich latach koncepcja ta znalazła szerokie zastosowanie w lotnictwie, motoryzacji i energetyce, natomiast sektor opakowań z tektury falistej dopiero rozpoczyna wykorzystanie podobnych narzędzi. Artykuł przedstawia możliwości wdrożenia cyfrowego bliźniaka do opakowań tekturowych, obejmującego cały cykl życia wyrobu – od projektu konstrukcyjnego, poprzez produkcję, magazynowanie i transport, aż po użytkowanie oraz recykling. Omówiono źródła danych niezbędnych do budowy takiego modelu, w tym parametry materiałowe papierów składowych, geometrię fali, warunki klimatyczne, historię obciążeń oraz dane z linii produkcyjnych. Przedstawiono również rolę metod numerycznych, sztucznej inteligencji i systemów IoT w bieżącej aktualizacji modelu oraz przewidywaniu nośności, trwałości i ryzyka uszkodzeń opakowań. Szczególną uwagę zwrócono na możliwość szybkiej oceny wpływu wilgotności, składowania oraz zmian jakości surowca na zachowanie gotowego opakowania. Wskazano, że pełny cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej jest już technicznie osiągalny, jednak jego praktyczne wdrożenie wymaga standaryzacji danych, integracji systemów produkcyjnych oraz uproszczonych modeli obliczeniowych możliwych do zastosowania w warunkach przemysłowych. Technologia ta może w przyszłości znacząco ograniczyć liczbę kosztownych testów fizycznych, skrócić czas projektowania oraz poprawić efektywność materiałową opakowań.

Słowa kluczowe: cyfrowy bliźniak, tektura falista, opakowania, Przemysł 4.0, modelowanie numeryczne, sztuczna inteligencja, optymalizacja, nośność opakowań

The digital twin is one of the key concepts of Industry 4.0 and 5.0, referring to a dynamic and continuously updated virtual representation of a real object, supported by measurement data and used for engineering decision-making. In recent years, this concept has been widely adopted in aerospace, automotive, and energy sectors, while the corrugated packaging industry is only beginning to explore similar solutions. This paper discusses the feasibility of implementing a digital twin for corrugated board packaging, covering the entire product life cycle: structural design, manufacturing, storage, transport, use, and recycling. The study presents the main data sources required for such a model, including material parameters of paper constituents, flute geometry, climatic conditions, load history, and production-line data. The role of numerical methods, artificial intelligence, and IoT systems in continuous model updating and in predicting strength, durability, and failure risk is also discussed. Particular attention is given to the rapid assessment of humidity effects, warehousing conditions, and raw material variability on packaging performance. It is concluded that a full digital twin of corrugated packaging is already technically feasible; however, its industrial implementation still requires data standardization, integration of production systems, and simplified computational models suitable for real-time applications. In the future, this technology may significantly reduce costly physical testing, shorten development time, and improve material efficiency of packaging solutions.

Keywords: digital twin, corrugated board, packaging, Industry 4.0, numerical modeling, artificial intelligence, optimization, packaging strength

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; inż. **D. Karasiewicz** (dawid.karasiewicz@student.put.poznan.pl), Instytut Analizy Konstrukcji, Politechnika Poznańska



Wprowadzenie

Tektura falista od ponad stu lat pozostaje jednym z najważniejszych materiałów opakowaniowych świata. Łączy niską masę własną, korzystny stosunek wytrzymałości do masy, łatwość przetwórstwa, niski koszt jednostkowy oraz wysoki potencjał recyklingu. Dzięki tym cechom stała się podstawą nowoczesnej logistyki, handlu detalicznego i transportu produktów praktycznie każdej branży, od żywności po elektronikę. Współczesny rynek oczekuje jednak od opakowań znacznie więcej niż jedynie funkcji ochronnej. Rosnące wymagania projektowe oraz potrzeba redukcji masy opakowań zwiększają znaczenie narzędzi numerycznych i predykcyjnych [1, 3]. Opakowanie ma być lżejsze, tańsze, bardziej ekologiczne, szybciej projektowane i lepiej dopasowane do zmiennych warunków łańcucha dostaw.

Jednocześnie opakowania z tektury falistej pracują w środowisku silnie zmiennym. Ich właściwości zależą nie tylko od geometrii konstrukcji i jakości papierów składowych, lecz również od wilgotności powietrza, temperatury, czasu magazynowania, sposobu paletyzacji, obciążeń dynamicznych podczas transportu czy lokalnych uszkodzeń eksploatacyjnych. Oznacza to, że rzeczywista nośność pudełka często odbiega od wartości uzyskanej w pojedynczym laboratoryjnym teście wykonanym w warunkach referencyjnych. W praktyce przemysłowej prowadzi to do konieczności stosowania dużych zapasów bezpieczeństwa, nadmiernego zużycia surowca lub kosztownych serii prób fizycznych. Problem ten był wielokrotnie wskazywany w literaturze dotyczącej nośności pudełek transportowych [3, 6].

W ostatnich latach przemysł produkcyjny coraz szerzej wdraża koncepcję cyfrowego bliźniaka. Jest to wirtualny model rzeczywistego obiektu, aktualizowany na podstawie danych pomiarowych i zdolny do prognozowania jego zachowania w czasie. Cyfrowe bliźniaki są już stosowane w lotnictwie, motoryzacji, energetyce czy utrzymaniu ruchu maszyn. Pozwalają przewidywać awarie, optymalizować parametry pracy i ograniczać koszty eksploatacyjne. Naturalnym kierunkiem rozwoju wydaje się przeniesienie tej idei również do sektora opakowań papierniczych.

W przypadku tektury falistej cyfrowy bliźniak mógłby łączyć dane materiałowe, wyniki testów laboratoryjnych, modele numeryczne konstrukcji pudełek, informacje z produkcji oraz dane środowiskowe z magazynu i transportu. Dzięki temu możliwe byłoby bieżące szacowanie wytrzymałości opakowania, szybkie porównywanie wariantów projektowych, wykrywanie ryzyka utraty nośności, a także optymalizacja zużycia materiału bez pogarszania bezpieczeństwa użytkowego.

Celem niniejszego artykułu jest odpowiedź na pytanie, czy cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej jest dziś rozwiązaniem realnym technicznie i ekonomicznie. Przedstawiono najważniejsze elementy takiego systemu, potencjalne korzyści dla producentów i użytkowników opakowań, a także bariery, które nadal ograniczają pełne wdrożenie tej koncepcji.

Czym jest cyfrowy bliźniak?

Pojęcie cyfrowego bliźniaka (ang. *digital twin*) należy dziś do najważniejszych terminów związanych z nowoczesnym przemysłem i transformacją cyfrową przedsiębiorstw. Najprościej można je zdefiniować jako wirtualny odpowiednik rzeczywistego obiektu, procesu lub systemu, który jest stale aktualizowany na podstawie danych pochodzących z eksploatacji, pomiarów lub produkcji. Nie jest to więc zwykły model komputerowy przygotowany jednorazowo, lecz „żywy model”, rozwijający się równoległe z obiektem fizycznym.

Klasyczny model numeryczny pozwala przewidzieć zachowanie konstrukcji w zadanych warunkach, jednak zazwyczaj opiera się na założeniach początkowych i nie uwzględnia zmian zachodzących w czasie. Cyfrowy bliźniak idzie krok dalej. Łączy model matematyczny z rzeczywistymi danymi, dzięki czemu może reagować na zmiany warunków pracy, zużycie materiału, odchylenia produkcyjne czy wpływ otoczenia. Można powiedzieć, że tradycyjny model jest fotografią, natomiast cyfrowy bliźniak przypomina transmisję na żywo.

Koncepcja ta rozwinęła się szczególnie dynamicznie wraz z popularyzacją idei Przemysłu 4.0, w którym kluczową rolę odgrywają automatyzacja, internet rzeczy (IoT), analiza danych oraz inteligentne systemy decyzyjne. W przemyśle lotniczym cyfrowe bliźniaki stosuje się do monitorowania stanu silników i planowania serwisu. W motoryzacji wspierają projektowanie pojazdów oraz diagnostykę podzespołów. W energetyce służą do optymalizacji pracy turbin, sieci i instalacji przemysłowych. Coraz częściej pojawiają się także w budownictwie, medycynie i logistyce.

Niezależnie od branży większość cyfrowych bliźniaków opiera się na czterech podstawowych filarach. Pierwszym jest obiekt rzeczywisty, czyli maszyna, produkt lub proces istniejący fizycznie. Drugim jest model cyfrowy, opisujący geometrię, właściwości materiałowe oraz mechanizmy działania. Trzecim filarem są dane aktualizujące, pochodzące z czujników, systemów produkcyjnych, badań laboratoryjnych lub historii użytkowania. Czwarty element to warstwa analityczna, wykorzystująca symulacje, statystykę lub sztuczną inteligencję do prognozowania przyszłych stanów.

W praktyce cyfrowy bliźniak może realizować wiele funkcji. Umożliwia szybsze projektowanie nowych produktów, testowanie wariantów bez budowy kosztownych prototypów, wykrywanie ryzyka awarii, planowanie konserwacji, redukcję zużycia materiałów oraz poprawę jakości produkcji. Jego siłą jest zdolność łączenia świata fizycznego z cyfrowym w jeden spójny system decyzyjny.

W przypadku opakowań z tektury falistej idea ta jest szczególnie interesująca, ponieważ produkt pozornie prosty podlega w rzeczywistości złożonemu zjawiskom mechanicznym i środowiskowym. Nośność pudełka zależy od wilgotności, geometrii, jakości papieru, sposobu składowania i historii obciążeń. Oznacza to, że cyfrowy bliźniak mógłby nie tylko odwzorowywać konstrukcję opakowania, lecz również przewidywać, jak będzie zachowywać się ono w rzeczywistym łańcuchu dostaw.



W kolejnych latach można oczekiwać przejścia od prostych modeli wspomagających projektowanie do pełnych, samouczących się cyfrowych bliźniaków, które będą automatycznie rekomendować zmiany konstrukcyjne, wskazywać optymalne zużycie surowca i ostrzegać przed spadkiem bezpieczeństwa opakowania. Dla branży papierniczej może to oznaczać początek nowej epoki, w której dane staną się równie ważne jak papier i klej.

Dlaczego opakowania z tektury falistej są dobrym kandydatem?

Na pierwszy rzut oka opakowanie z tektury falistej może wydawać się produktem prostym, dobrze poznanym i niewymagającym zaawansowanych narzędzi cyfrowych. W praktyce jest jednak konstrukcją zaskakująco złożoną, w której ostateczne zachowanie zależy od wielu wzajemnie powiązanych czynników materiałowych, geometrycznych i eksploatacyjnych. To właśnie ta zmienność sprawia, że tektura falista jest bardzo dobrym kandydatem do wdrożenia koncepcji cyfrowego bliźniaka.

Podstawowym argumentem jest naturalna wrażliwość materiału na warunki otoczenia. Papier, będący głównym składnikiem tektury falistej, jest materiałem higroskopijnym, co oznacza zdolność pochłaniania i oddawania wilgoci z otaczającego powietrza. Nawet niewielkie zmiany wilgotności względnej mogą prowadzić do spadku sztywności, osłabienia wytrzymałości na ściskanie czy pogorszenia stabilności geometrycznej opakowania. W rezultacie pudełko zaprojektowane poprawnie w warunkach laboratoryjnych może zachowywać się zupełnie inaczej w wilgotnym magazynie lub podczas transportu morskiego.

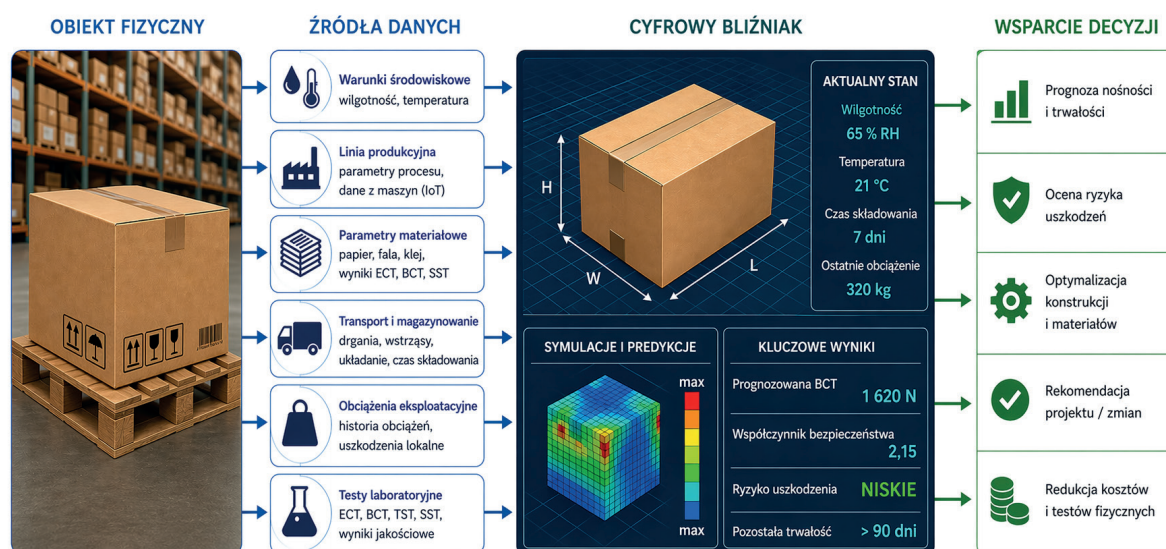
Drugim istotnym czynnikiem jest duża różnorodność samych wyrobów. Branża korzysta z wielu gatunków papierów, różnych gramatur, typów fal, liczby warstw oraz niemal nieograniczonej

liczby geometrii wykrojów. Zmienność właściwości wynikająca z geometrii i budowy wielowarstwowej została szeroko opisana w badaniach homogenizacyjnych [1, 11]. Nawet dwa opakowania o podobnych wymiarach zewnętrznych mogą wykazywać odmienną nośność wskutek różnic w jakości surowca, orientacji włókien, konstrukcji klap czy rozmieszczeniu otworów wentylacyjnych. Oznacza to, że proste uogólnienia mają ograniczoną wartość, a dokładniejsze prognozy wymagają modeli uwzględniających konkretne cechy produktu.

Kolejnym argumentem jest znaczenie logistyki. Opakowania z tektury falistej pracują najczęściej w układach zbiorczych: na paletach, w regałach wysokiego składowania, w kontenerach i środkach transportu. Są poddawane obciążeniom statycznym oraz dynamicznym, wibracjom, uderzeniom, piętrzeniu i lokalnym uszkodzeniom. Ich rzeczywista trwałość zależy więc nie tylko od konstrukcji pojedynczego pudełka, ale także od całego scenariusza użytkowania. Cyfrowy bliźniak może łączyć te informacje i przewidywać ryzyko uszkodzeń zanim pojawią się reklamacje.

Warto również podkreślić presję ekonomiczną i środowiskową. Producenci dążą dziś do ograniczania zużycia surowca, redukcji masy opakowań oraz minimalizacji kosztów transportu. Każdy gram papieru ma znaczenie, ale zbyt agresywne odchudzanie konstrukcji może obniżyć bezpieczeństwo produktu. Branża potrzebuje więc narzędzi pozwalających precyzyjnie określić, gdzie istnieją rezerwy materiałowe, a gdzie zaczyna się ryzyko utraty nośności. To idealne pole działania dla modeli cyfrowych wspieranych danymi rzeczywistymi.

Nie bez znaczenia jest także rosnąca dostępność danych. Linie produkcyjne rejestrują dziś parametry procesu, systemy ERP i MES gromadzą informacje o partiach surowca, a czujniki magazynowe monitorują temperaturę i wilgotność. Dane, które dawniej znikwały bez śladu, mogą obecnie zasilać modele predykcyjne. Branża opa-



Rys. 1. Koncepcja cyfrowego bliźniaka opakowania z tektury falistej



kowaniowa posiada więc coraz lepsze fundamenty technologiczne do budowy cyfrowych bliźniaków.

Z perspektywy inżynierskiej tekstura falista znajduje się w interesującym punkcie rozwoju: materiał tradycyjny, lecz otoczony nowoczesnym ekosystemem danych. To połączenie sprawia, że wdrożenie cyfrowego bliźniaka nie jest futurystyczną wizją, lecz logicznym kolejnym krokiem rozwoju sektora. Tam, gdzie zmienność spotyka skalę produkcji, rodzi się naturalna potrzeba inteligentnego modelowania.

Z czego zbudować cyfrowy bliźniak opakowania?

Cyfrowy bliźniak opakowania z tekstury falistej nie powstaje z jednego programu komputerowego ani pojedynczego modelu obliczeniowego. Jest raczej systemem złożonym z wielu współpracujących warstw danych, modeli i algorytmów, które razem tworzą cyfrowy obraz rzeczywistego produktu. Im lepiej odwzorowane zostaną kluczowe cechy opakowania oraz warunki jego pracy, tym większa będzie wartość praktyczna takiego rozwiązania. Schemat ogólnej architektury cyfrowego bliźniaka opakowania przedstawiono na rysunku 1.

Zakres danych niezbędnych do działania systemu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Główne kategorie danych wejściowych wykorzystywanych w cyfrowym bliźniaku opakowania z tekstury falistej wraz z przykładowymi źródłami ich pozyskania oraz częstotliwością aktualizacji

Kategoria danych	Przykładowe dane	Źródła pozyskania	Częstotliwość aktualizacji
Parametry materiałowe	Gramatura, grubość, ECT, BCT, SST, wilgotność papierów, typ fali	Dostawcy papierów, laboratorium, system jakości	Każda partia / dostawa
Geometria konstrukcji	Wymiary, typ fali, układ warstw, FEFCO/ECMA, CAD 3D	Dział konstrukcji, ERP/PDM	Przy zmianie projektu
Dane produkcyjne	Prędkość linii, temperatura kleju, wilgotność taśmy, nacisk walców	Linia produkcyjna, SCADA/MES	Ciągła (real-time)
Warunki środowiskowe	Wilgotność RH, temperatura, czas składowania	Czujniki IoT, magazyn, transport	Co 5–15 min
Obciążenia i zdarzenia	Obciążenia statyczne, wstrząsy, drgania, upadki	Rejestratory transportowe, WMS, TMS	Podczas transportu
Wyniki testów i kontroli	ECT, BCT, TST, SST, CQI	Laboratorium, SPC, kontrola jakości	Każda partia / wg planu

Pierwszym fundamentem są **dane materiałowe**. Tekstura falista jest materiałem wielowarstwowym, zbudowanym z papierów o różnych właściwościach mechanicznych. Znaczenie mają między innymi gramatura, sztywność, wytrzymałość na ściskanie, odporność na zgniatanie oraz parametry kierunkowe wynikające z orientacji włókien. W cyfrowym bliźniaku dane te powinny być przypisane do konkretnej partii surowca, ponieważ właściwości papieru mogą zmieniać się między dostawami. Innymi słowy, każde opakowanie zaczyna swoją cyfrową historię już na etapie rolki papieru. Parametry mechaniczne tekstury mogą być skutecznie wyznaczane z wykorzystaniem modeli równoważnych oraz analiz numerycznych [4, 8, 11].

Drugim filarem jest **geometria konstrukcji**. Obejmuje ona nie tylko wymiary pudełka, ale również typ fali, liczbę warstw, układ kłap, nacięcia, perforacje, otwory wentylacyjne, nadruk oraz sposób klejenia. Drobne zmiany geometrii potrafią znacząco wpłynąć na nośność i sztywność. Cyfrowy model powinien więc zawierać parametry konstrukcyjne pochodzące bezpośrednio z systemów CAD lub dokumentacji wykojnika.

Trzecią warstwą są **dane procesowe z produkcji**. Parametry linii technologicznej, takie jak temperatura klejenia, prędkość produkcji, wilgotność materiału, naciski walców czy dokładność bigowania, wpływają na jakość gotowej tekstury. W praktyce dwa opakowania zaprojektowane identycznie mogą różnić się zachowaniem z powodu odmiennych warunków wytwarzania. Dlatego nowoczesny cyfrowy bliźniak powinien widzieć nie tylko projekt, ale również sposób jego wykonania.

Kolejny element stanowią **dane środowiskowe i logistyczne**. Są to informacje o temperaturze i wilgotności magazynu, czasie składowania, liczbie warstw na palecie, trasie transportu, drganiach, przeciążeniach czy ekspozycji na opady. To właśnie w tej warstwie model spotyka się z rzeczywistością użytkownika. Opakowanie przewożone przez trzy dni w suchym centrum logistycznym zachowuje się inaczej niż to samo opakowanie transportowane statkiem przez kilka tygodni.

Niezbędnym składnikiem są także **modele obliczeniowe**. Mogą mieć różny poziom złożoności: od prostych zależności empirycznych, przez modele analityczne, aż po symulacje numeryczne MES. W zastosowaniach przemysłowych szczególnie cenne będą modele hybrydowe, łączące szybkość prostych wzorów z dokładnością metod zaawansowanych. Taki model powinien odpowiadać szybko, ale myśleć głęboko.

Coraz większą rolę odgrywa również **sztuczna inteligencja** [9]. Algorytmy uczenia maszynowego mogą wykrywać ukryte zależności między parametrami produkcji a jakością wyrobu, prognozować wyniki testów BCT czy ECT, a także identyfikować ryzyko



reklamacji. AI nie zastępuje fizyki materiału, lecz może stać się jej czujnym partnerem, szczególnie tam, gdzie klasyczne modele są zbyt wolne lub niepełne.

Ostatnią warstwą jest **interfejs decyzyjny**, czyli sposób wykorzystania wyników. Cyfrowy bliźniak powinien dostarczać użytkownikowi jasnych informacji: czy konstrukcja spełnia wymagania, ile materiału można zaoszczędzić, jakie jest ryzyko utraty nośności, kiedy potrzebny jest test laboratoryjny, a kiedy wystarczy prognoza modelu. Dane bez decyzji są tylko hałasem, dlatego ta warstwa ma znaczenie strategiczne.

W praktyce pełny cyfrowy bliźniak opakowania można porównać do orkiestry, w której papier, geometria, produkcja, klimat, logistyka i algorytmy grają wspólny utwór. Jeśli któryś instrument fałszuje, prognoza traci jakość. Jeśli jednak system zostanie dobrze zestrojony, branża zyskuje narzędzie zdolne przewidywać zachowanie opakowania zanim zostanie ono jeszcze złożone na palecie.

Narzędzia obliczeniowe

Sam zbiór danych nie tworzy jeszcze cyfrowego bliźniaka. Dane są paliwem, lecz potrzebny jest także silnik zdolny zamienić je w prognozę, ocenę ryzyka lub decyzję projektową. Tym silnikiem są narzędzia obliczeniowe, czyli zestaw metod matematycznych, numerycznych i informatycznych, które interpretują informacje o opakowaniu oraz przewidują jego zachowanie w rzeczywistych warunkach użytkowania.

Jednym z najważniejszych filarów pozostają **metody numeryczne**, a szczególnie metoda elementów skończonych (MES). Metody MES są obecnie szeroko stosowane do prognozowania nośności pudełek, wpływu otworów wentylacyjnych oraz lokalnych mechanizmów utraty stateczności [2, 5, 6]. Umożliwia ona analizę naprężeń, odkształceń i lokalnych mechanizmów utraty stateczności w konstrukcjach z tektury falistej. Dzięki MES można ocenić wpływ geometrii pudełka, rodzaju fali, rozmieszczenia otworów czy jakości połączeń klejonych na nośność całego opakowania. Jest to narzędzie niezwykle dokładne, lecz często kosztowne obliczeniowo. Z tego powodu pełne modele MES są szczególnie przydatne w fazie projektowania oraz kalibracji uproszczonych modeli przemysłowych.

Drugą grupę stanowią **modele analityczne i empiryczne**, które od lat są szeroko wykorzystywane w branży. Należą do nich równania szacujące wytrzymałość na ściskanie pudełek, zależności oparte na wynikach ECT, BCT czy parametrach geometrycznych opakowania. Ich największą zaletą jest szybkość działania oraz prostota wdrożenia. Choć nie opisują wszystkich zjawisk z pełną dokładnością, mogą być bardzo skuteczne jako pierwsza warstwa decyzyjna cyfrowego bliźniaka.

Coraz większego znaczenia nabierają **modele homogenizacyjne**, w których złożona struktura wielowarstwowej tektury jest

zastępowana materiałem równoważnym o efektywnych właściwościach mechanicznych. Pozwala to analizować całe opakowania bez konieczności modelowania każdej fali osobno. To podejście szczególnie cenne wtedy, gdy potrzebna jest równowaga między dokładnością a szybkością obliczeń.

Nowy rozdział otwiera **sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe**. Skuteczność modeli predykcyjnych wymaga jednak wiarygodnych danych wejściowych oraz walidacji eksperymentalnej [7, 10]. Algorytmy mogą uczyć się na podstawie tysięcy historycznych wyników testów oraz danych produkcyjnych. Dzięki temu potrafią prognozować nośność opakowań, wykrywać nietypowe odchylenia jakościowe, identyfikować najważniejsze parametry wpływające na wynik lub rekomendować optymalne warianty konstrukcyjne. Tam, gdzie klasyczne wzory widzą prostą zależność, AI potrafi dostrzec ukryty labirynt zależności.

W praktyce najbardziej obiecujące są **modele hybrydowe**, łączące wiedzę fizyczną z uczeniem danych. Przykładowo model mechaniczny może opisywać podstawowe prawa pracy konstrukcji, a algorytm AI może korygować prognozę na podstawie rzeczywistych danych z produkcji lub klimatu. Takie podejście zwiększa wiarygodność predykcji i ogranicza ryzyko błędów typowych dla „czarnych skrzynek”.

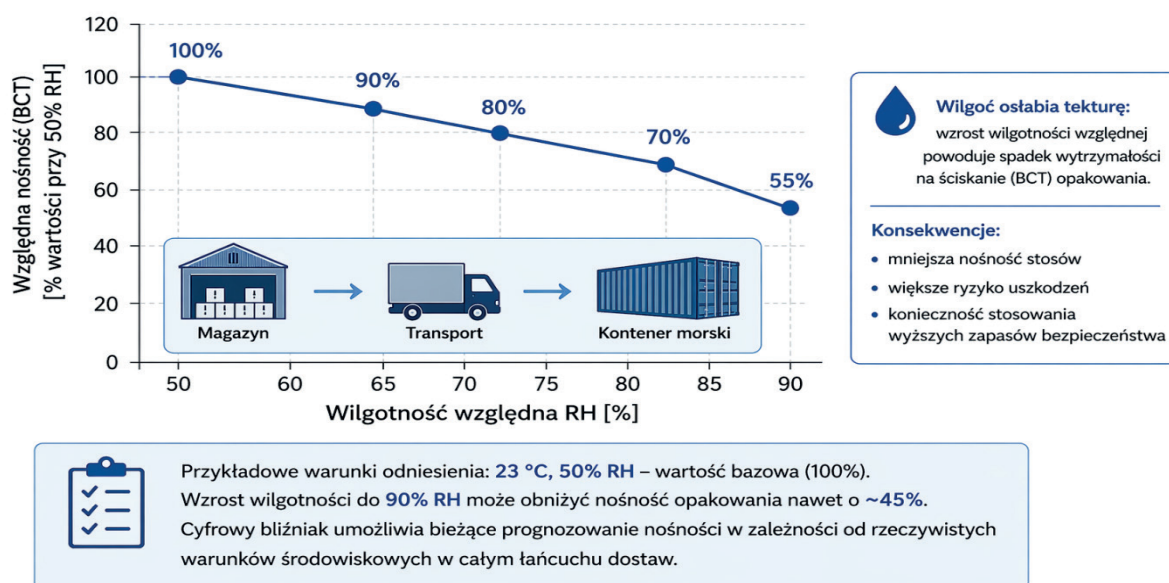
Nie można pominąć roli **systemów czasu rzeczywistego**. Cyfrowy bliźniak przemysłowy powinien działać szybko, często niemal natychmiast. Oznacza to potrzebę stosowania modeli zredukowanych, baz danych, automatycznych pipeline'ów obliczeniowych oraz integracji z systemami ERP, MES i czujnikami IoT. W zakładzie produkcyjnym nikt nie będzie czekał kilku godzin na odpowiedź, czy pudełko wymaga dodatkowych 20 g/m² papieru.

Ważnym zagadnieniem pozostaje również **walidacja modeli**. Nawet najlepszy algorytm musi być regularnie porównywany z wynikami badań laboratoryjnych i rzeczywistymi danymi eksploatacyjnymi. Cyfrowy bliźniak nie jest wyrocznią, lecz narzędziem, które stale się uczy i dojrzewa wraz z napływem nowych informacji.

Można więc powiedzieć, że narzędzia obliczeniowe tworzą mózg cyfrowego bliźniaka. Jedne metody liczą precyzyjnie, inne błyskawicznie, jeszcze inne uczą się na błędach. Największą siłę daje jednak ich współpraca. Właśnie tam rodzi się przyszłość inteligentnego projektowania opakowań z tektury falistej.

Co można przewidywać?

Największa wartość cyfrowego bliźniaka nie polega wyłącznie na tworzeniu eleganckiego modelu komputerowego, lecz na zdolności przewidywania przyszłych zachowań opakowania. W praktyce przemysłowej liczy się nie tyle to, co wydarzyło się wczoraj, ale co stanie się jutro: czy pudełko wytrzyma składowanie, czy produkt dotrze bez uszkodzeń, czy można zmniejszyć zużycie materiału bez wzrostu ryzyka reklamacji. Cyfrowy bliźniak ma odpowiadać właśnie na takie pytania.



Rys. 2. Schemat wpływu wilgotności względnej na nośność opakowania z tektury falistej

Pierwszym i najbardziej oczywistym obszarem predykcji jest **nośność opakowania**, szczególnie odporność na ściskanie pionowe podczas piętrzenia. Zagadnienie to było przedmiotem licznych badań eksperymentalnych i numerycznych [3, 5, 6, 10]. Parametry takie jak BCT są kluczowe dla logistyki magazynowej i transportowej. Model cyfrowy może prognozować wpływ zmiany gramatury papieru, geometrii pudełka, wysokości składowania czy warunków klimatycznych na dopuszczalne obciążenie. Dzięki temu możliwe staje się projektowanie lżejszych konstrukcji bez działania po omacku.

Drugim ważnym zagadnieniem jest **wpływ wilgotności i temperatury**. Tektura falista reaguje na klimat szybciej niż często zakłada praktyka przemysłowa. Cyfrowy bliźniak może przewidywać, jak spadnie sztywność opakowania po kilku dniach w wilgotnym magazynie, jak zmieni się nośność po transporcie morskim lub jak długotrwałe składowanie wpłynie na parametry użytkowe. To szczególnie istotne w branżach spożywczej, e-commerce i eksporcie. Przykładowy schemat wpływu wilgotności względnej na nośność opakowania pokazano na rysunku 2.

Kolejnym obszarem jest **trwałość w czasie**. Wiele opakowań nie ulega awarii natychmiast, lecz stopniowo traci zdolność przenoszenia obciążeń wskutek pełzania materiału, mikrouszkodzeń i zmęczenia wynikającego z wielokrotnego manipulowania. Model może szacować, jak długo dana jednostka paletowa zachowa bezpieczne parametry i kiedy ryzyko deformacji zaczyna rosnąć.

Cyfrowy bliźniak może także przewidywać **ryzyko uszkodzeń transportowych**. Wstrząsy, drgania, lokalne uderzenia czy nieprawidłowe ustawienie na palecie często decydują o jakości dostawy. Integracja danych logistycznych z modelem konstrukcyjnym pozwala wskazać najbardziej wrażliwe strefy pudełka oraz dobrać odpowiednie wzmocnienia lub zmienić sposób pakowania.

Bardzo interesującym kierunkiem jest **predykcja jakości produkcyjnej**. Na podstawie parametrów linii technologicznej system może szacować, czy dana partia tektury spełni oczekiwane parametry wytrzymałościowe jeszcze przed wykonaniem pełnego zestawu testów laboratoryjnych. To otwiera drogę do szybszej kontroli jakości i ograniczenia strat materiałowych.

Nie mniej ważna jest **optymalizacja materiałowa**. Cyfrowy bliźniak może wskazywać, gdzie konstrukcja posiada bezpieczny zapas nośności, a gdzie pracuje blisko granicy. Dzięki temu możliwe jest redukowanie gramatury, zmiana układu warstw lub modyfikacja geometrii bez utraty funkcjonalności. W skali milionów opakowań nawet niewielka oszczędność papieru staje się finansowo i środowiskowo znacząca.

W przyszłości systemy te mogą przewidywać również **ślad środowiskowy opakowania**, możliwość ponownego użycia, zachowanie w recyklingu czy wpływ zmian projektowych na emisję CO₂ w całym cyklu życia produktu. Wtedy cyfrowy bliźniak stanie się nie tylko narzędziem mechanicznym, ale również strategicznym kompasem zrównoważonego rozwoju.

Można więc powiedzieć, że dobrze zaprojektowany cyfrowy bliźniak widzi więcej niż pojedynczy test laboratoryjny. Test mówi, co stało się w jednej chwili. Bliźniak próbuje odpowiedzieć, co wydarzy się później, w innych warunkach i przy kolejnej decyzji projektowej. A właśnie tam ukrywa się największa wartość dla przemysłu.

Barierzy wdrożenia

Choć idea cyfrowego bliźniaka opakowania z tektury falistej wydaje się atrakcyjna zarówno technicznie, jak i biznesowo, droga do jej pełnego wdrożenia nie jest pozbawiona przeszkód. W wielu



zakładach produkcyjnych istnieją już pojedyncze elementy takiego systemu, jednak połączenie ich w spójne, wiarygodne i użyteczne narzędzie wymaga pokonania szeregu barier organizacyjnych, technologicznych oraz ekonomicznych.

Pierwsze i najczęściej spotykane trudności to **jakość oraz dostępność danych**. Cyfrowy bliźniak potrzebuje informacji uporządkowanych, aktualnych i spójnych. Tymczasem dane w przedsiębiorstwach bywają rozproszone pomiędzy działem produkcji, laboratorium, logistyką, sprzedażą i systemami informatycznymi różnych generacji. Część parametrów jest rejestrowana automatycznie, część ręcznie, a część w ogóle nie jest archiwizowana. Model karmiony chaotycznymi danymi zaczyna przypominać kompas w burzy.

Drugą barierą jest **zmienność samego materiału**. Tektura falista powstaje z surowców naturalnych, których właściwości mogą różnić się pomiędzy partiami, dostawcami, sezonami czy warunkami magazynowania. Oznacza to, że model raz skalibrowany nie zawsze pozostaje aktualny. Konieczna staje się regularna aktualizacja parametrów oraz ciągłe uczenie systemu na nowych danych.

Kolejnym wyzwaniem jest **złożoność fizyczna zjawisk**. Zachowanie opakowań zależy jednocześnie od mechaniki konstrukcji, wilgotności, czasu działania obciążeń, jakości połączeń klejonych, lokalnych uszkodzeń oraz warunków transportu. Stworzenie modelu obejmującego wszystkie te aspekty z wysoką dokładnością bywa kosztowne obliczeniowo i trudne wdrożeniowo. Przemysł

potrzebuje rozwiązań praktycznych, a nie matematycznych pałaców z marmuru.

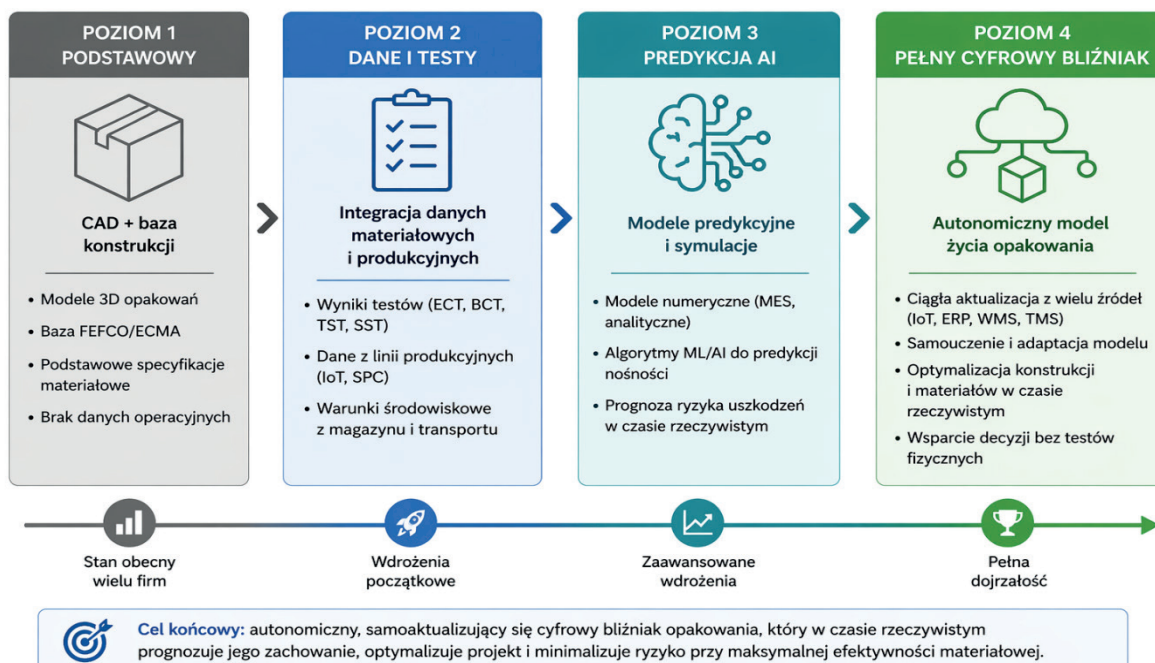
Istotną przeszkodą pozostaje również **integracja systemów IT**. W wielu przedsiębiorstwach funkcjonują równoległe systemy ERP, MES, bazy laboratoryjne, arkusze kalkulacyjne i lokalne aplikacje tworzone przez lata. Aby cyfrowy bliźniak działał efektywnie, musi komunikować się z tym ekosystemem bez generowania dodatkowego chaosu. To wymaga inwestycji nie tylko w modele, ale także w architekturę danych.

Nie można pominąć kwestii **kosztów i zwrotu z inwestycji**. Dla dużych producentów wdrożenie zaawansowanych narzędzi może być naturalnym krokiem strategicznym, natomiast dla mniejszych firm pojawia się pytanie, czy korzyści przewyższą koszty zakupu oprogramowania, czujników, integracji i szkoleń. Cyfrowy bliźniak musi udowodnić swoją wartość liczbami: mniejszą liczbą reklamacji, niższym zużyciem papieru, szybszym projektowaniem lub redukcją testów fizycznych.

Ważnym aspektem jest także **czynniki ludzki**. Nawet najlepszy system nie zadziała, jeśli użytkownicy nie będą mu ufać lub nie zrozumieją sposobu interpretacji wyników. Wdrożenie wymaga współpracy technologów, konstruktorów, лаборantów, działów IT oraz kadry zarządzającej. Czasem najtrudniej zintegrować nie dane, lecz ludzi.

Kolejna bariera dotyczy **standaryzacji branżowej**. Sektor opakowań nadal korzysta z różnych metod testowania, odmiennych sposobów zapisu danych i lokalnych procedur jakościowych. Bez

Rys. 3. Etapy rozwoju cyfrowego bliźniaka w branży opakowań z tektury falistej



Rys. 3. Etapy rozwoju cyfrowego bliźniaka w branży opakowań z tektury falistej



wspólnego języka danych trudno budować rozwiązania skalowalne i porównywalne pomiędzy zakładami czy krajami.

Mimo tych ograniczeń większość barier ma charakter przejściowy, a nie fundamentalny. Dane stają się coraz łatwiej dostępne, systemy informatyczne dojrzewają, a algorytmy są coraz bardziej wydajne. Historia przemysłu pokazuje, że to, co dziś wydaje się trudne, jutro staje się standardem. Cyfrowy bliźniak opakowania prawdopodobnie przejdzie właśnie taką drogę: od ambitnej nowinki do codziennego narzędzia pracy.

Czy to już możliwe? Studium realności

Pytanie postawione w tytule artykułu nie dotyczy już wyłącznie teorii, lecz praktycznej gotowości technologii do zastosowań przemysłowych. Czy cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej można zbudować dziś? Odpowiedź brzmi: **tak, ale w określonym zakresie**. Nie istnieje jeszcze powszechny, uniwersalny system obejmujący cały rynek, jednak większość jego kluczowych elementów jest już dostępna i stosowana w różnych formach. Dotyczy to zarówno modeli mechanicznych, jak i metod uproszczonej identyfikacji parametrów materiałowych [4, 7, 8]. Poziomy dojrzałości wdrożeń cyfrowych bliźniaków w branży opakowań przedstawiono na rysunku 3.

W obszarze **projektowania konstrukcji** branża dysponuje rozwiniętymi narzędziami CAD, bazami FEFCO, systemami generowania wykrojów oraz oprogramowaniem do analiz wytrzymałościowych. Oznacza to, że cyfrowa reprezentacja geometrii opakowania istnieje już na starcie procesu. W wielu przedsiębiorstwach modele konstrukcyjne są standardem, a nie wyjątkiem.

W zakresie **danych materiałowych** sytuacja również jest korzystna. Laboratoria regularnie wykonują badania takie jak ECT, BCT, SCT, Cobb, gramatura czy pomiary wilgotności. Problemem nie jest więc brak danych, lecz ich rozproszenie i niewystarczające wykorzystanie analityczne. Mówiąc obrazowo: skarbiec istnieje, ale klucze leżą w różnych kieszeniach.

Duży postęp nastąpił także w **monitorowaniu procesu produkcyjnego**. Nowoczesne linie tekturowe rejestrują parametry pracy, prędkość produkcji, temperaturę, wilgotność oraz odchylenia ja-

kościowe. Dane te mogą bezpośrednio zasilać modele predykcyjne, pozwalając ocenić jakość partii jeszcze przed zakończeniem produkcji.

W obszarze **modelowania obliczeniowego** dostępne są zarówno zaawansowane symulacje MES, jak i szybkie modele uproszczone oraz narzędzia sztucznej inteligencji. Oznacza to, że część analityczna cyfrowego bliźniaka jest już technicznie możliwa. Szczególnie realne są rozwiązania hybrydowe, w których modele fizyczne współpracują z uczeniem maszynowym.

Również **infrastruktura danych** rozwija się dynamicznie. Systemy ERP, MES, chmura obliczeniowa, platformy BI i czujniki IoT są coraz bardziej dostępne cenowo. To ważna zmiana, ponieważ jeszcze kilka lat temu wiele z tych rozwiązań było zarezerwowanych głównie dla największych koncernów.

Nie oznacza to jednak, że branża stoi u progu pełnej automacji cyfrowej. Nadal ograniczeniem pozostaje brak integracji wszystkich warstw w jeden spójny ekosystem decyzyjny. W wielu firmach funkcjonują osobno: dział konstrukcyjny, laboratorium, produkcja i logistyka, lecz dane między nimi płyną wolniej niż same opakowania. Cyfrowy bliźniak wymaga właśnie tej integracji.

Najbardziej realistycznym scenariuszem na najbliższe lata nie jest więc od razu „bliźniak totalny”, lecz **cyfrowe bliźniaki częściowe**, wdrażane etapami. Mogą to być systemy przewidujące BCT, platformy optymalizacji gramatury, modele ryzyka zawilgocenia w magazynie czy narzędzia wspierające dobór konstrukcji pod konkretny produkt. Każdy z tych modułów stanowi cegłę przyszłego pełnego systemu.

Można zatem stwierdzić, że pytanie „czy to już możliwe?” należy zastąpić pytaniem „na jakim poziomie dojrzałości jesteśmy?”. Technologia jest gotowa, dane w dużej mierze istnieją, a korzyści są zrozumiałe. Największym wyzwaniem nie jest już brak narzędzi, lecz decyzja o ich połączeniu i konsekwentnym wdrażaniu. Najczęściej oczekiwane efekty biznesowe i techniczne wdrożeń zestawiono w tabeli 2.

Cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej nie jest dziś science fiction. Jest raczej placem budowy, na którym stoją już ściany, dach i instalacje. Pozostało połączyć je w funkcjonalny dom.

Tabela 2. Potencjalne korzyści techniczne, ekonomiczne i organizacyjne wynikające z wdrożenia cyfrowego bliźniaka w projektowaniu, produkcji i eksploatacji opakowań z tektury falistej

Obszar	Korzyść	Opis efektu	Szacowany efekt
Projektowanie	Skrócenie czasu projektowania	Szybka weryfikacja wariantów	20–50% krótszy czas
Testy i walidacja	Redukcja testów fizycznych	Mniej prototypów i badań	30–70% mniej testów
Koszty materiałowe	Optymalizacja gramatury	Lepsze dopasowanie do wymagań	5–15% oszczędności
Logistyka i transport	Redukcja uszkodzeń	Lepsza prognoza ryzyka	10–40% mniej reklamacji
Zrównoważony rozwój	Niższy ślad środowiskowy	Mniej materiału i odpadów	5–20% niższe zużycie
Decyzje biznesowe	Lepsze decyzje oparte na danych	Scenariusze if-then, prognozy	Wyższa efektywność operacyjna



Wnioski

Tektura falista pozostaje jednym z filarów współczesnej gospodarki opakowaniowej, lecz jednocześnie staje się materiałem coraz bardziej wymagającym pod względem projektowym. Presja redukcji kosztów, ograniczania zużycia surowców, wzrost znaczenia e-commerce oraz rosnące wymagania logistyczne powodują, że tradycyjne podejście oparte wyłącznie na doświadczeniu i pojedynczych testach laboratoryjnych może okazać się niewystarczające. Branża potrzebuje narzędzi szybszych, bardziej elastycznych i zdolnych do pracy w warunkach rosnącej zmienności.

Koncepcja cyfrowego bliźniaka odpowiada na te potrzeby w sposób naturalny. Łączy wiedzę materiałową, modele mechaniczne, dane produkcyjne oraz informacje z rzeczywistego użytkowania opakowań. Dzięki temu możliwe staje się prognozowanie nośności, ocena wpływu wilgotności i transportu, optymalizacja konstrukcji oraz ograniczenie liczby kosztownych prób fizycznych. W praktyce oznacza to przejście od reaktywnego rozwiązywania problemów do świadomego zarządzania ryzykiem i jakością.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że wdrożenie cyfrowego bliźniaka opakowania z tektury falistej jest już technicznie realne. Większość niezbędnych komponentów istnieje: systemy CAD, dane laboratoryjne, monitoring produkcji, modele numeryczne, algorytmy sztucznej inteligencji oraz infrastruktura informatyczna. Ograniczeniem nie jest więc brak technologii, lecz stopień integracji dostępnych zasobów oraz gotowość organizacyjna przedsiębiorstw.

W krótkiej perspektywie najbardziej prawdopodobny rozwój będzie dotyczył rozwiązań częściowych, ukierunkowanych na konkretne potrzeby przemysłu, takich jak predykcja BCT, optymalizacja gramatury, kontrola jakości online czy ocena wpływu klimatu na trwałość opakowań. W dłuższym horyzoncie można oczekiwać powstania pełnych systemów obejmujących cały cykl życia produktu – od projektu, przez produkcję i logistykę, aż po recykling.

Cyfrowy bliźniak może stać się dla branży papierniczej tym, czym kiedyś automatyzacja była dla linii produkcyjnych: początkowo ciekawostką, później przewagą konkurencyjną, a ostatecznie standardem. Firmy, które wcześniej nauczą się wykorzystywać dane i modele, zyskają przewagę nie tylko technologiczną, lecz również ekonomiczną i środowiskową.

Można więc odpowiedzieć na pytanie zawarte w tytule jednoznacznie: **tak, cyfrowy bliźniak opakowania z tektury falistej jest już możliwy**. Nie jest jeszcze rozwiązaniem powszechnym, ale wszystkie elementy tej układanki znajdują się już na stole. Teraz czas, aby branża zdecydowała, jak szybko chce je złożyć.

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] Fadji T., Ambaw A., Coetzee C.J., Berry T.M., Opara U.L. 2018. "Application of finite element analysis to predict the mechanical strength of ventilated corrugated packaging during handling and storage of horticultural produce". *Biosystems Engineering* 174 : 260-281. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.07.014
- [3] Frank B. 2014. "Corrugated box compression – A literature survey". *Packaging Technology and Science* 27 (2) : 105-128. DOI: 10.1002/pts.2019
- [4] Garbowski T., Gajewski T. 2021. "Determination of transverse shear stiffness of sandwich panels with a corrugated core by numerical homogenization". *Materials* 14 (8) : 1976. DOI: 10.3390/ma14081976
- [5] Garbowski T., Gajewski T., Grabski J.K. 2020. "The role of buckling in the estimation of compressive strength of corrugated cardboard boxes". *Materials* 13 (20) : 4578. DOI: 10.3390/ma13204578
- [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. DOI: 10.3390/en14010155
- [7] Garbowski T., Grabski J.K., Marek A. 2021. "Full-field measurements in the edge crush test of a corrugated board – Analytical and numerical predictive models". *Materials* 14 (11) : 2840. DOI: 10.3390/ma14112840
- [8] Garbowski T., Knitter-Piątkowska A., Mrówczyński D. 2021. "Numerical homogenization of multi-layered corrugated cardboard with creasing or perforation". *Materials* 14 (14) : 3786. DOI: 10.3390/ma14143786
- [9] Garbowski T. 2023. „Zastosowanie sztucznej inteligencji do optymalnej produkcji tektury falistej”/The use of artificial intelligence for the optima production of corrugated board. *Przegląd Papierniczy* 79 (5) : 279-288. DOI: 10.15199/54.2023.5.2.
- [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 modelling of corrugated cardboard". *Composite Structures* 88 (2) : 280-289. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.04.008