

Inteligentna tektura falista w erze Przemysłu 5.0

Intelligent Corrugated Board in the Era of Industry 5.0

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2025.6.1

Celem artykułu jest przedstawienie transformacji przemysłu opakowaniowego w duchu koncepcji Przemysłu 5.0 – idei zakładającej synergiczną współpracę człowieka i maszyny, rozwój sztucznej inteligencji, personalizację produktów oraz dążenie do zrównoważonego rozwoju. W centrum rozważań znajduje się tektura falista, materiał powszechnie stosowany, lecz stale ewoluujący pod wpływem nowych technologii i wymagań środowiskowych. Opisano, czym jest tzw. inteligentna tektura – wzbogacona o sensory, cyfrowe paszporty materiałowe, biodegradowalne powłoki oraz funkcjonalności umożliwiające śledzenie w łańcuchu dostaw. Zwrócono uwagę na rolę symulacji numerycznych, metod uczenia maszynowego i systemów predykcyjnych w procesie projektowania opakowań oraz na zmieniający się paradygmat produkcji – od masowej skali do produkcji na żądanie, z lokalnych źródeł, z minimalnym śladem węglowym. Omówiono także konkretne kierunki rozwoju badań naukowych i przemysłowych wdrożeń, które wspólnie tworzą nową jakość w obszarze logistyki, magazynowania i recyklingu. Artykuł ma charakter przeglądowy, interdyscyplinarny i wskazuje możliwe scenariusze rozwoju branży opakowań w świetle przemian technologicznych i klimatycznych.

Słowa kluczowe: przemysł 5.0, inteligentna tektura falista, opakowania, cyfryzacja, gospodarka o obiegu zamkniętym, recykling, sztuczna inteligencja

This article presents a novel perspective on the transformation of the packaging industry in light of the Industry 5.0 concept, which combines automation, artificial intelligence, and product personalization with a strong emphasis on environmental responsibility. The focus is placed on corrugated board as a future-oriented material – lightweight, durable, recyclable, and increasingly integrated with digital technologies. The concept of intelligent corrugated board is introduced, encompassing features such as sensors, digital material passports, biodegradable coatings, and smart traceability within the supply chain. The article discusses the role of mechanical simulations, machine learning algorithms, and predictive systems in the structural design of corrugated packaging. It also explores the evolution of production systems – from mass production to localized, on-demand, and digitally controlled manufacturing with a reduced carbon footprint. Finally, it highlights ongoing research directions and examples of industrial implementation that together shape a new paradigm in packaging design, logistics, and sustainability. The article takes an interdisciplinary, review-based approach and outlines potential development paths for corrugated packaging in the context of technological and climate transitions.

Keywords: industry 5.0, intelligent corrugated board, packaging, digitalization, circular economy, recycling, artificial intelligence

Wprowadzenie – od Przemysłu 1.0 do 5.0

Historia przemysłu to opowieść o kolejnych przełomach technologicznych, które nie tylko zmieniały sposób produkcji, ale też kształtowały społeczne i ekonomiczne oblicze świata. Początki tej drogi sięgają drugiej połowy XVIII w., kiedy pojawiły się pierwsze maszyny parowe i mechanizacja – zjawisko, które zapoczątkowało Przemysł 1.0. Kolejna rewolucja, utożsamiana z Przemysłem 2.0, przyniosła elektryfikację zakładów produkcyjnych, upowszech-

Introduction – From Industry 1.0 to 5.0

The history of industry is a story of successive technological breakthroughs that not only changed production methods but also shaped the social and economic face of the world. This journey began in the second half of the 18th century with the emergence of the first steam engines and mechanization – a phenomenon that marked the advent of Industry 1.0. The next revolution, associated with Industry 2.0, brought the electrification of factories, the

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP (tomasz.garbowski@up.poznan.pl; ORCID: 0000-0002-9588-2514), Uniwersyteckie Centrum Ekomateriałów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu



nienie taśmowego systemu pracy i wzrost skali wytwarzania, co zrewolucjonizowało przemysł ciężki i produkcję masową. W drugiej połowie XX w. nastąpiło przejście do Przemysłu 3.0, opartego na komputeryzacji i automatyzacji. Wprowadzenie sterowników numerycznych, robotów przemysłowych i systemów informatycznych pozwoliło na zwiększenie precyzji i kontroli procesów produkcyjnych. Współczesność zdominowana została natomiast przez Przemysł 4.0, którego fundamentem są systemy cyberfizyczne, internet rzeczy, zaawansowana robotyka oraz sztuczna inteligencja. W tym modelu maszyny komunikują się autonomicznie, dane przepływają przez chmurę, a procesy stają się samoregulujące.

Choć każdy z tych etapów wniósł ogromne korzyści, pojawiły się też nowe wyzwania. Postępująca automatyzacja doprowadziła do ograniczenia roli człowieka w procesach produkcyjnych, często redukując jego udział do funkcji nadzorczych lub marginalnych. Jednocześnie rosnące tempo konsumpcji, nadprodukcja i globalizacja łańcuchów dostaw przyczyniły się do wzrostu śladu węglowego i coraz bardziej widocznych skutków środowiskowych.

W odpowiedzi na te problemy pojawiła się koncepcja Przemysłu 5.0, która kładzie nacisk na ponowne uwzględnienie człowieka jako współtwórcy procesów przemysłowych, a nie jedynie biernego uczestnika lub odbiorcy. Przemysł 5.0 to nie tylko integracja nowych technologii, lecz przede wszystkim dążenie do ich humanizacji – do tworzenia systemów produkcyjnych, w których technologia wspiera decyzje człowieka, zamiast go zastępować. Jednocześnie model ten promuje personalizację produktów, lokalność wytwarzania, krótsze łańcuchy dostaw oraz zrównoważony rozwój i gospodarkę o obiegu zamkniętym.

Na tym tle szczególnego znaczenia nabiera tektura falista – materiał pozornie prosty, lecz coraz częściej poddawany nowym interpretacjom i technologicznym transformacjom. Dzięki swojej konstrukcji, odnawialności i możliwości recyklingu, tektura staje się doskonałą platformą do wdrażania założeń Przemysłu 5.0. W dalszej części pracy przedstawiono, jak jej inteligentne wersje – wzbogacone o technologie cyfrowe, czujniki, sztuczną inteligencję i analizę danych – mogą zmienić sposób myślenia o projektowaniu, produkcji i użytkowaniu opakowań w zrównoważonej gospodarce przyszłości.

Czym jest inteligentna tektura falista?

Tektura falista to materiał, który od dziesięcioleci pełni istotną rolę w logistyce, handlu i przechowywaniu towarów. Choć powszechnie kojarzy się z opakowaniami o prostej budowie i funkcji, współczesne trendy technologiczne oraz wymagania środowiskowe nadają jej zupełnie nowy wymiar. W kontekście Przemysłu 5.0 mówi się dziś o tzw. inteligentnej tekturze falistej – zaawansowanym technologicznie materiale, który integruje funkcje mechaniczne, informacyjne i środowiskowe.

widespread adoption of assembly lines, and the scaling up of production, which revolutionized heavy industry and mass manufacturing.

In the second half of the 20th century, the transition to Industry 3.0 occurred, driven by computerization and automation. The introduction of numerical control systems, industrial robots, and IT infrastructures allowed for increased precision and control of production processes. Today, we are living in the era of Industry 4.0, whose foundation lies in cyber-physical systems, the Internet of Things, advanced robotics, and artificial intelligence. In this model, machines communicate autonomously, data flows through the cloud, and processes become self-regulating.

Although each of these stages brought tremendous benefits, they also introduced new challenges. The advancement of automation has led to a reduced role for humans in production processes, often limiting their involvement to supervisory or marginal functions. Simultaneously, the accelerating pace of consumption, overproduction, and globalization of supply chains have contributed to increased carbon footprints and increasingly visible environmental impacts.

In response to these issues, the concept of Industry 5.0 has emerged, emphasizing the reintegration of the human as a co-creator in industrial processes, rather than merely a passive participant or end-user. Industry 5.0 is not just about integrating new technologies, but more importantly about humanizing them – creating production systems in which technology supports human decision-making instead of replacing it. This model also promotes product personalization, localized manufacturing, shorter supply chains, sustainable development, and the circular economy.

Against this backdrop, corrugated cardboard gains particular significance – a material that may seem simple, yet is increasingly being reinterpreted and technologically transformed. Thanks to its structure, renewability, and recyclability, corrugated board becomes an excellent platform for implementing the principles of Industry 5.0. In the following chapters, we will explore how its smart variants – enhanced with digital technologies, sensors, artificial intelligence, and data analytics – can transform how we think about the design, production, and use of packaging in the sustainable economy of the future.

What Is Smart Corrugated Board?

Corrugated board has played a vital role in logistics, commerce, and goods storage for decades. Although commonly associated with packaging of simple construction and function, modern technological trends and environmental demands are giving it an entirely new dimension. In the context of Industry 5.0, we now speak of *smart corrugated board* – a technologically



Podstawowa struktura tektury, oparta na przemiennej warstwach płaskich i falistych, jest systematycznie udoskonalana zarówno pod względem geometrii, jak i jakości surowców [18]. Zmiany te obejmują nie tylko parametry fizyczne, takie jak wysokość i kształt fali [6, 7, 8, 11, 42] czy gramatura papierów, ale także sposób ich łączenia, odporność na wilgoć oraz podatność na recykling. Obecnie konstrukcja tektury może być projektowana z wykorzystaniem zaawansowanych metod numerycznych, takich jak analiza MES [6, 34, 35], która pozwala zoptymalizować jej właściwości wytrzymałościowe pod kątem konkretnych zastosowań i warunków środowiskowych [30-33, 45].

Na inteligencję tektury składa się jednak nie tylko jej struktura fizyczna. Coraz częściej wzbogacana jest ona o technologie umożliwiające komunikację i identyfikację – znaczniki RFID, układy NFC, nadruki zawierające kody QR. Dzięki nim opakowanie staje się nośnikiem informacji, które można odczytać na różnych etapach łańcucha dostaw. Informacje te obejmują m.in. dane o partii produkcyjnej, warunkach transportu, lokalizacji, a nawet parametrach środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność.

Równolegle rozwijane są także nowe rodzaje powłok funkcjonalnych, które rozszerzają możliwości materiału. Biodegradowalne powłoki hydrofobowe, kleje na bazie skrobi czy kompostowalne warstwy ochronne to przykłady rozwiązań, które nie tylko poprawiają właściwości użytkowe tektury, ale również ułatwiają jej odzysk i ponowne przetworzenie. Dzięki temu możliwe jest spełnienie rosnących wymagań dotyczących zgodności z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Nowym i szczególnie istotnym elementem w rozwoju inteligentnych opakowań stają się cyfrowe paszporty materiałowe. Są to zbiory danych przypisane konkretnemu produktowi lub partii opakowań, dostępne za pomocą internetu lub zintegrowanych systemów zarządzania. Takie paszporty zawierają m.in. informacje o pochodzeniu surowców, metodach produkcji, emisyjności CO₂, a także rekomendacje dotyczące sposobów recyklingu. Ich celem jest zwiększenie transparentności i umożliwienie użytkownikowi końcowemu podejmowania świadomych decyzji zakupowych i środowiskowych.

Coraz więcej firm wdraża te rozwiązania w praktyce. Międzynarodowe koncerny opakowaniowe testują opakowania ze zintegrowanymi czujnikami środowiskowymi, rozwijają produkcję na żądanie z zastosowaniem cyfrowych drukarek przemysłowych, a także implementują systemy monitorowania warunków logistycznych w czasie rzeczywistym. Tektura falista, wyposażona w takie możliwości, staje się nie tylko środkiem ochrony produktu, ale również aktywnym uczestnikiem zrównoważonego i inteligentnego łańcucha dostaw.

Symulacja i sztuczna inteligencja w projektowaniu opakowań

Współczesne projektowanie opakowań z tektury falistej przebiega z procesem opartego głównie na doświadczeniu i pró-

advanced material that integrates mechanical, informational, and environmental functions.

The basic structure of corrugated board, based on alternating flat and fluted layers, is continuously improved in terms of both geometry and raw material quality [18]. These improvements include not only physical parameters such as flute height and shape [6, 7, 8, 11, 42] or paper grammage, but also bonding methods, moisture resistance, and recyclability. Today, corrugated board structures can be designed using advanced numerical methods, such as the Finite Element Method (FEM) [6, 34, 35], which enables optimization of mechanical performance for specific applications and environmental conditions [30-33, 45].

However, the "intelligence" of corrugated board lies not only in its physical structure. Increasingly, it is being enhanced with technologies that enable communication and identification – such as RFID tags, NFC systems, and printed QR codes. These elements transform packaging into an information carrier that can be read at various stages of the supply chain. The information may include batch data, transport conditions, location tracking, or even environmental parameters like temperature and humidity.

At the same time, new types of functional coatings are being developed to extend the material's capabilities. Biodegradable hydrophobic coatings, starch-based adhesives, and compostable protective layers are examples of solutions that not only improve usability but also facilitate recovery and recycling. This makes it possible to meet growing requirements for compliance with circular economy principles.

A particularly important and emerging component in the development of smart packaging is the *digital material passport*. These are datasets assigned to a specific product or batch of packaging, accessible via the Internet or integrated management systems. Such passports include information on raw material origin, production methods, carbon emissions, and recycling recommendations. Their purpose is to increase transparency and empower end users to make informed purchasing and environmental decisions.

More and more companies are putting these solutions into practice. International packaging corporations are testing boxes with integrated environmental sensors, expanding on-demand production using industrial digital printers, and implementing real-time logistics monitoring systems. Corrugated board, equipped with such capabilities, becomes not just a product protection medium, but an active participant in a sustainable and intelligent supply chain.

Simulation and Artificial Intelligence in Packaging Design

Modern corrugated packaging design is evolving from a process based mainly on experience and physical trials into



bach fizycznych w nowoczesne podejście wykorzystujące symulacje komputerowe [38, 39], modelowanie predykcyjne [23-26, 38, 39] i metody sztucznej inteligencji [16]. W duchu Przemysłu 5.0 projektant nie tylko wspomaga się narzędziami cyfrowymi [10, 17], ale współpracuje z nimi, korzystając z ich zdolności do szybkiej analizy danych, poszukiwania optymalnych rozwiązań i przewidywania zachowania materiału w różnych warunkach.

Metoda elementów skończonych (MES) odgrywa kluczową rolę w analizie właściwości mechanicznych tekstury [36-37]. Umożliwia dokładne odwzorowanie struktury warstwowej i falistej, ocenę sztywności [4, 22, 37], nośności [5, 29] oraz odporności na zginanie pionowe [1, 3, 20, 21, 41, 43, 44], zarówno w skali pojedynczego opakowania, jak i całej palety. Dzięki symulacjom można projektować konstrukcje o zoptymalizowanej geometrii, redukując zużycie materiału bez pogorszenia parametrów użytkowych [13-15]. Dodatkowo, możliwe jest modelowanie wpływu zmiennych warunków środowiskowych – takich jak imperfekcje [19], wilgotność i temperatura – na zachowanie tekstury w czasie transportu i magazynowania [45].

Równolegle rozwijają się narzędzia wykorzystujące uczenie maszynowe. Modele predykcyjne, oparte na danych eksperymentalnych i symulacyjnych, pozwalają przewidywać takie cechy, jak wytrzymałość na ściskanie, sztywność w zginaniu i czas osiągnięcia stanu powietrzno-suchego. Dzięki zastosowaniu regresji opartej na procesach gaussowskich, sieci neuronowych lub algorytmów inspirowanych procesami ewolucyjnymi, możliwe jest szybkie i dokładne szacowanie właściwości opakowania już na etapie wstępnego projektu [16]. Co więcej, algorytmy te mogą identyfikować kluczowe czynniki wpływające na jakość konstrukcji, co pozwala projektantom lepiej rozumieć zależności między parametrami geometrycznymi, materiałowymi a funkcjonalnością opakowania.

W kontekście Przemysłu 5.0 szczególne znaczenie mają systemy wspomagania decyzji, które integrują wyniki analiz mechanicznych, dane środowiskowe oraz oczekiwania klienta końcowego. Takie systemy umożliwiają podejmowanie świadomych decyzji dotyczących wyboru materiału, konstrukcji czy strategii produkcji. Dzięki temu możliwa jest adaptacja projektów do zmiennych warunków rynkowych, logistyki i regulacji środowiskowych bez konieczności każdorazowego przeprowadzania pełnych testów fizycznych.

Coraz większe znaczenie zyskuje również generatywne projektowanie, w którym algorytmy tworzą wiele wariantów konstrukcyjnych opakowania, optymalizując je pod kątem określonych kryteriów, takich jak minimalna masa, maksymalna sztywność i najniższy ślad węglowy [9]. Projektant pełni w tym modelu rolę selektora i weryfikatora – wykorzystuje narzędzia sztucznej inteligencji nie jako zamiennik swojej wiedzy, lecz jako partnera w procesie twórczym.

W procesie cyfrowego odwzorowania opakowań z tekstury falistej coraz większą rolę odgrywa koncepcja pełnej wirtualizacji [17], która obejmuje zarówno mikrostrukturę materiału, jak i jego zachowanie w skali makro. Jak przedstawiono na rysunku 1, cały proces rozpo-

a cutting-edge approach that uses computer simulations [38, 39], predictive modeling [23-26, 38, 39], and artificial intelligence methods [16]. In the spirit of Industry 5.0, the designer not only uses digital tools [10, 17] but collaborates with them, leveraging their capabilities for rapid data analysis, solution optimization, and material behavior prediction under varying conditions.

The Finite Element Method (FEM) plays a key role in analyzing the mechanical properties of corrugated board [36, 37]. It enables accurate representation of layered and fluted structures, and allows for the evaluation of stiffness [4, 22, 37], load-bearing capacity [5, 29], and vertical crush resistance [1, 3, 20, 21, 41, 43, 44] – both at the level of individual packages and entire pallets. Simulations make it possible to design structures with optimized geometry, reducing material usage without compromising functional performance [13-15]. Moreover, it is possible to model the effects of variable environmental conditions – such as imperfections [19], humidity, and temperature – on corrugated board behavior during transport and storage [45].

In parallel, machine learning tools are being developed. Predictive models based on experimental and simulation data can forecast characteristics such as compression strength, bending stiffness, or the time to reach an air-dry state. Using Gaussian process regression, neural networks, or algorithms inspired by evolutionary processes, designers can quickly and accurately estimate packaging properties at the early design stage [16]. Furthermore, these algorithms can identify key factors influencing construction quality, helping designers better understand the relationships between geometric, material, and functional parameters.

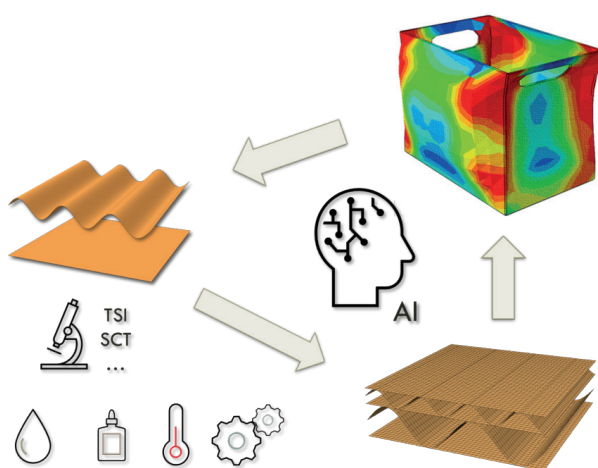
In the context of Industry 5.0, decision-support systems are of particular importance. These systems integrate mechanical analysis results, environmental data, and end-user expectations. They enable informed decisions regarding material selection, structural design, or production strategy. This allows for design adaptation to changing market conditions, logistics requirements, and environmental regulations – without the need for repeated physical testing.

Generative design is also gaining prominence. In this approach, algorithms generate numerous structural variants of packaging, optimizing them according to defined criteria such as minimum weight, maximum stiffness, or lowest carbon footprint [9]. The designer becomes a selector and validator – using AI tools not as a replacement for their knowledge but as a creative partner in the design process.

The concept of full virtualization [17] is playing an increasingly important role in the digital representation of corrugated packaging. It encompasses both the material's microstructure and its macro-scale behavior. As illustrated in Figure 1, the entire process begins with defining paper parameters – such as Short Compression



czyna się od opisu parametrów papierów – takich jak: wytrzymałość na zgniatanie (SCT), sztywność warstw (TSI) i podatność na działanie wilgoci – które stanowią podstawę do dalszego modelowania. Przejście od właściwości warstw papieru do wirtualnej struktury tektury falistej odbywa się przez etap produkcji, który charakteryzuje się wieloma czynnikami o złożonej i często nie do końca poznanej naturze. Należą do nich zarówno zmienne trudne do jednoznacznego zmierzenia, takie jak lokalne niedoskonałości technologiczne czy zmienność surowców, jak i parametry dobrze znane, których wpływ na końcowe właściwości materiału jest jednak trudny do pełnego oszacowania. Do tej drugiej grupy należą m.in. prędkość linii produkcyjnej, temperatura i wilgotność otoczenia, sposób opasania fali, ciśnienie docisku walców oraz czas ekspozycji na zmienne warunki procesowe.



Rys. 1. Bliźniak cyfrowy tektury falistej
Fig. 1. Digital clone of corrugated board

Właśnie w tym miejscu sztuczna inteligencja odgrywa kluczową rolę wspierającą – umożliwia modelowanie, prognozowanie i korektę wpływu tych parametrów na podstawie danych historycznych, uczenia się na podstawie eksperymentów oraz identyfikacji zależności ukrytych w dużych zbiorach danych. Dzięki temu możliwe jest wirtualne przejście od struktury warstw papieru do trójwymiarowej reprezentacji gotowej tektury falistej, uwzględniającej realia produkcyjne. Dopiero po zbudowaniu takiego reprezentatywnego modelu możliwe jest przejście do skali makro, w której projektowane opakowanie analizowane jest przy użyciu sprawdzonych metod, takich jak homogenizacja [12, 30, 31], analiza wrażliwości [27, 28] i modelowanie numeryczne (MES) [6, 34, 35, 40]. Umożliwiają one ocenę nośności, sztywności oraz zachowania konstrukcyjnego w warunkach rzeczywistych. Efektem całego procesu jest cyfrowy bliźniak opakowania, integrujący wiedzę materiałową, procesową i konstrukcyjną, który wspiera optymalizację projektu bez konieczności fizycznych testów i wielokrotnych iteracji produkcyjnych.

Test (SCT) strength, Taber Stiffness Index (TSI) of the layers, and moisture sensitivity – which serve as the foundation for further modeling. The transition from paper properties to a virtual model of corrugated board occurs through the production stage, characterized by numerous factors of complex and often poorly understood nature. These include variables that are difficult to measure directly – such as local technological imperfections or raw material variability – as well as well-known parameters whose impact on the final material properties is still hard to fully assess. The latter include production line speed, ambient temperature and humidity, flute wrapping method, roller pressure, and exposure time to variable process conditions.

It is precisely at this stage that artificial intelligence plays a crucial supportive role – enabling the modeling, prediction, and correction of parameter impacts based on historical data, learning from experiments, and identifying relationships hidden within large datasets. As a result, it becomes possible to virtually transition from the structure of paper layers to a three-dimensional representation of finished corrugated board that reflects real-world production conditions.

Only after constructing such a representative model is it possible to move to the macro scale, where the designed packaging is analyzed using proven methods – such as homogenization [12, 30, 31], sensitivity analysis [27, 28], and numerical modeling (FEM) [6, 34, 35, 40] – to assess load-bearing capacity, stiffness, and structural behavior under real conditions. The outcome of the entire process is a *digital twin* of the package, integrating material, process, and structural knowledge. This twin supports project optimization without the need for physical testing and multiple production iterations.

The use of simulation and artificial intelligence in corrugated packaging design is not only a sign of technological advancement but a manifestation of a new approach to product development – an approach in which technology, data, and humans collaborate to create solutions that are more efficient, sustainable, and personalized than ever before.

Production and Logistics of the Future

The transformation of the packaging industry toward the Industry 5.0 model extends far beyond design alone. It also reshapes how packaging is manufactured, distributed, and monitored in real time. Traditional production lines – focused on long runs and uniformity – are giving way to flexible, digitally controlled solutions integrated with industrial-grade IT systems. Corrugated board, thanks to its adaptability and ease of processing, fits perfectly into this new reality.

Modern packaging production increasingly relies on digital printing, which enables short runs, customized prints, and rapid



Zastosowanie symulacji i sztucznej inteligencji w projektowaniu opakowań z tektury falistej to nie tylko przejaw postępu technologicznego, ale wyraz nowego podejścia do tworzenia produktów – podejścia, w którym technologia, dane i człowiek działają razem, by stworzyć rozwiązania bardziej efektywne, zrównoważone i spersonalizowane niż kiedykolwiek wcześniej.

Produkcja i logistyka przyszłości

Transformacja przemysłu opakowaniowego w kierunku modelu Przemysłu 5.0 nie ogranicza się do samego projektowania. Zmienia się również sposób, w jaki opakowania są wytwarzane, dystrybuowane i kontrolowane w czasie rzeczywistym. Tradycyjne linie produkcyjne, nastawione na długie serie i jednolitość, ustępują miejsca rozwiązaniom elastycznym, cyfrowo sterowanym i zintegrowanym z systemami informatycznymi klasy przemysłowej. Tektura falista – dzięki swojej podatności na przetwarzanie i modyfikację – doskonale wpisuje się w tę nową rzeczywistość.

Współczesna produkcja opakowań coraz częściej opiera się na druku cyfrowym, który umożliwia realizację krótkich serii, personalizację nadruków i szybkie dostosowanie projektu do aktualnych potrzeb klienta lub kampanii marketingowej. Dzięki technologii druku bezpośredniego można eliminować konieczność tworzenia form drukowych, co skraca czas realizacji i pozwala na bieżąco aktualizować treść komunikatów na opakowaniach, a także sam proces nie przegniata tektury w trakcie nadruku [2]. Personalizacja staje się standardem, a produkcja na żądanie odpowiedzią na potrzebę minimalizacji odpadów magazynowych i ograniczenia nadprodukcji.

Równolegle rozwijają się systemy automatyzacji oparte na robotyce współpracującej. Tak zwane coboty, czyli roboty zdolne do bezpiecznej interakcji z człowiekiem, znajdują coraz szersze zastosowanie na liniach pakujących. Wykonują powtarzalne czynności, jak: składanie, pakowanie, etykietowanie, paletyzacja, jednocześnie pozostawiając operatorom rolę nadzoru i bieżącej adaptacji procesu. Współpraca człowieka z maszyną, charakterystyczna dla paradygmatu Przemysłu 5.0, przyczynia się do zwiększenia wydajności bez rezygnacji z elastyczności.

Nową jakość w logistyce wprowadza integracja danych środowiskowych z systemami zarządzania łańcuchem dostaw. Tektura falista może być nośnikiem czujników rejestrujących temperaturę, wilgotność, wibracje i czas przebywania w określonych warunkach. Dane te, przesyłane w czasie rzeczywistym do chmury, pozwalają na dynamiczną kontrolę jakości transportu, identyfikację ryzyka uszkodzenia towaru oraz podejmowanie decyzji o ewentualnej interwencji jeszcze przed dostarczeniem produktu do odbiorcy. Logistyka przestaje być procesem reaktywnym – staje się inteligentna i predykcyjna.

Istotnym elementem produkcji przyszłości jest również integracja recyklingu jako pełnoprawnego ogniwa cyklu życia produktu. Opakowania projektowane są z myślą o ich późniejszym odzysku,

adaptation of designs to current customer needs or marketing campaigns. Direct printing technology eliminates the need for printing plates, shortens production lead times, and allows on-the-fly updates to package messaging – without crushing the board during the process [2]. Personalization is becoming the norm, and on-demand production is the answer to the need to reduce warehouse waste and minimize overproduction.

At the same time, automation systems based on collaborative robotics are evolving. So-called *cobots* – robots designed for safe interaction with humans – are increasingly used on packing lines. They perform repetitive tasks such as folding, packing, labeling, or palletizing, while leaving human operators responsible for supervision and real-time process adjustments. Human-machine collaboration, characteristic of the Industry 5.0 paradigm, enhances efficiency without sacrificing flexibility.

A new quality in logistics emerges from the integration of environmental data with supply chain management systems. Corrugated board can carry sensors that record temperature, humidity, vibrations, or time spent under specific conditions. These data, transmitted to the cloud in real time, allow dynamic quality control during transport, early risk detection of product damage, and intervention decisions before the product even reaches the recipient. Logistics is no longer a reactive process – it becomes intelligent and predictive.

Another essential aspect of future manufacturing is the integration of recycling as a fully legitimate phase in the product lifecycle. Packaging is now designed with recovery in mind, which includes using mono-materials that are easy to separate, along with proper labeling, user guidance, and closing the material loop. More and more packaging producers are offering take-back services for used cartons, which are then returned into the production cycle as secondary raw material.

In this new model, production and logistics are no longer linear processes but rather an integrated system of cooperation between technology, people, and data. Corrugated board – lightweight, easy to process, and recyclable – becomes not only an object within this system, but also an active participant: it responds, communicates, adapts, and returns to circulation. This approach perfectly reflects the spirit of Industry 5.0, where innovation goes hand in hand with responsibility and sustainable development.

Sustainability and Circular Economy in Industry 5.0

Unlike previous phases of technological development, Industry 5.0 does not view innovation as an end in itself. Instead, it assumes that technological progress must go hand in hand with care for both people and the environment. This model emphasizes responsibility for the entire product lifecycle – from raw material extraction, through design and use, to recycling and reuse. In this



co oznacza nie tylko stosowanie materiałów jednorodnych i łatwo oddzielnych, ale także odpowiednie znakowanie, informowanie użytkownika i zamykanie obiegu materiałowego. Coraz częściej producenci opakowań oferują usługę odbioru zużytych kartonów, które trafiają z powrotem do cyklu produkcyjnego jako surowiec wtórny.

W tym nowym modelu produkcja i logistyka nie są już liniowym procesem, lecz zintegrowanym systemem współpracy technologii, ludzi i danych. Tektura falista – lekka, podatna na obróbkę i recykling – staje się nie tylko przedmiotem, lecz także podmiotem w tym systemie. Reaguje, komunikuje, dostosowuje się i wraca do obiegu. Takie podejście doskonale odzwierciedla ducha Przemysłu 5.0, w którym innowacja idzie w parze z odpowiedzialnością i zrównoważonym rozwojem.

Zrównoważony rozwój i gospodarka o obiegu zamkniętym w Przemysłu 5.0

Przemysł 5.0, w przeciwieństwie do poprzednich faz rozwoju technologicznego, nie postrzega innowacyjności jako celu samego w sobie. Zakłada on bowiem, że postęp techniczny powinien iść w parze z troską o człowieka i środowisko. Model ten uwzględnia potrzebę odpowiedzialności za cały cykl życia produktu – od wydobycia surowców, przez projektowanie i użytkowanie, aż po recykling i ponowne wykorzystanie materiałów. W tym kontekście tektura falista jawi się jako szczególnie cenny materiał, który łączy właściwości użytkowe z potencjałem do wielokrotnego przetwarzania oraz integracji z rozwiązaniami cyfrowymi i środowiskowymi.

Projektowanie opakowań z myślą o ich wpływie na środowisko opiera się dziś w coraz większym stopniu na analizach cyklu życia produktu, znanych jako LCA (*Life Cycle Assessment*). Narzędzia te pozwalają oszacować łączny ślad węglowy, zużycie energii, wody oraz emisje związane z produkcją, użytkowaniem i utylizacją danego wyrobu. Dzięki nim możliwe jest świadome podejmowanie decyzji projektowych, prowadzących do zmniejszenia masy opakowania, rezygnacji z trudnych do odzysku dodatków i ograniczenia długości łańcucha dostaw.

Tektura falista, dzięki swojej naturalnej kompozycji opartej na włóknach celulozowych, doskonale nadaje się do recyklingu. Jednak nawet ona wymaga udoskonaleń, które zwiększą efektywność tego procesu. Duże znaczenie mają tu nowe generacje klejów i powłok – biodegradowalne, oparte na skrobi lub polimerach naturalnych, nieutrudniające oddzielania warstw papieru. Współczesne rozwiązania eliminują klasyczne bariery recyklingu, takie jak powłoki foliowe czy agresywne atramenty, pozwalając na bardziej wydajny odzysk włókien i ich ponowne wykorzystanie w produkcji.

W ramach Przemysłu 5.0 coraz więcej uwagi poświęca się również skróceniu łańcuchów logistycznych oraz przeniesieniu produkcji bliżej konsumenta. Takie podejście redukuje emisje związane z transportem, zmniejsza ryzyko zakłóceń w dostawach i umożliwia szybszą

context, corrugated board stands out as a particularly valuable material, combining functional properties with the potential for multiple reuse and integration with digital and environmental solutions.

Designing packaging with environmental impact in mind increasingly relies on Life Cycle Assessment (LCA). These tools allow for the estimation of the total carbon footprint, energy and water consumption, and emissions associated with the production, use, and disposal of a product. Thanks to LCA, designers can make informed decisions that lead to reducing packaging weight, eliminating hard-to-recycle additives, and shortening supply chains.

Corrugated board, composed naturally of cellulose fibers, is highly recyclable. Yet even this material requires improvements to enhance the efficiency of recycling. New generations of adhesives and coatings – biodegradable, starch-based, or made from natural polymers – play an important role here, as they do not hinder the separation of paper layers. Modern solutions eliminate traditional recycling barriers such as plastic coatings or aggressive inks, allowing for more efficient fiber recovery and reuse in production.

Industry 5.0 also places growing emphasis on shortening supply chains and relocating production closer to the consumer. This approach reduces transport-related emissions, lowers the risk of supply disruptions, and enables faster response to market needs. Local production facilities, supported by digital systems and automation, can manufacture short runs of packaging tailored to specific customers, while also minimizing material waste.

A key element of the circular economy (CE) strategy now being implemented in the packaging sector is the *digital material passport*. These are data sets assigned to specific products or components that include information about material composition, environmental footprint, place of manufacture, usage conditions, and recovery options. Through integration with IT systems and identification technologies such as RFID or QR codes, these passports allow for the tracking of material flows throughout the entire lifecycle – from production and use to disposal and recycling.

Thus, sustainability in the context of Industry 5.0 is not merely about minimizing the negative environmental impact of production. It is a systemic model in which technology, design, and business decisions are aligned with a long-term vision of harmonious coexistence between industry, society, and nature. Corrugated board – with its structure, recyclability, and compatibility with digital tools – embodies these ideas both symbolically and practically.

Implementation Examples and Research Directions

Although the concept of Industry 5.0 may seem like a vision of the future, many of its principles are already being practically



reakcję na potrzeby rynku. Lokalne zakłady produkcyjne, wspomagane przez systemy cyfrowe i automatyzację, mogą produkować krótkie serie opakowań, dostosowane do konkretnego odbiorcy, przy jednoczesnym ograniczeniu strat materiałowych.

Szczególnym elementem strategii GOZ, wdrażanym obecnie w obszarze opakowań, są tzw. cyfrowe paszporty materiałowe. To zestawy danych przypisanych do konkretnego produktu lub jego komponentu, które zawierają informacje o składzie materiałowym, śladzie środowiskowym, miejscu produkcji, warunkach użytkowania i możliwościach odzysku. Dzięki integracji z systemami informatycznymi i technologiami identyfikacji, takimi jak RFID czy QR, paszporty te umożliwiają śledzenie obiegu materiału w całym cyklu życia – od produkcji, przez użytkowanie, aż po utylizację i recykling.

Zrównoważony rozwój w rozumieniu Przemysłu 5.0 nie polega zatem jedynie na ograniczaniu negatywnego wpływu produkcji na środowisko. To model systemowy, w którym technologia, projektowanie i decyzje biznesowe są podporządkowane długofalowej wizji harmonijnego współistnienia przemysłu, społeczeństwa i natury. Tektura falista, dzięki swojej strukturze, kompatybilności z recyklingiem oraz możliwości integracji z narzędziami cyfrowymi, stanowi idealny nośnik tych idei – zarówno symbolicznie, jak i praktycznie.

Przykłady wdrożeń i kierunki badań

Choć koncepcja Przemysłu 5.0 może wydawać się wizją przyszłości, w rzeczywistości wiele jej założeń znajduje już dziś praktyczne zastosowanie. Branża opakowaniowa, a w szczególności sektor zajmujący się produkcją i przetwarzaniem tektury falistej, należy do tych obszarów przemysłu, które wyjątkowo szybko i skutecznie adaptują nowe technologie oraz modele działania zorientowane na zrównoważony rozwój i cyfryzację. Innowacje wdrażane przez czołowe firmy opakowaniowe pokazują, że połączenie zaawansowanej technologii, odpowiedzialności środowiskowej i orientacji na użytkownika nie tylko jest możliwe, ale wręcz konieczne do dalszego rozwoju branży.

Wiodący producenci tektury falistej i opakowań już dziś implementują rozwiązania wpisujące się w filozofię Przemysłu 5.0. Przykładem mogą być inteligentne opakowania zdolne do monitorowania temperatury w czasie transportu, wykorzystywane w logistyce farmaceutycznej i spożywczej. Inne rozwiązania obejmują systemy identyfikacji produktów z użyciem znaczników RFID, które umożliwiają pełną transparentność łańcucha dostaw i wspierają strategię odpowiedzialności środowiskowej.

Szczególne miejsce wśród wdrażanych innowacji zajmują cyfrowe drukarki przemysłowe, umożliwiające w pełni spersonalizowane, niskonakładowe nadruki na opakowaniach. Dzięki nim możliwa jest realizacja produkcji na żądanie, eliminacja zbędnych zapasów oraz szybka reakcja na zmieniające się potrzeby rynku i kampanii marketingowych. Innym przykładem są rozwiązania cięcia i bigowania w pełnym cyfrowym procesie, w którym do cięcia wykorzystuje się

implemented today. The packaging industry – especially the sector focused on the production and processing of corrugated board – is among the areas of industry that most rapidly and effectively adopt new technologies and operational models oriented toward sustainability and digitalization. Innovations introduced by leading packaging companies demonstrate that combining advanced technology, environmental responsibility, and user orientation is not only possible but essential for the industry's continued development.

Leading manufacturers of corrugated board and packaging are already implementing solutions aligned with the philosophy of Industry 5.0. Examples include smart packaging capable of monitoring temperature during transport, used in pharmaceutical and food logistics. Other solutions involve product identification systems using RFID tags, enabling full supply chain transparency and supporting environmental responsibility strategies.

One of the most prominent innovations being implemented is the use of industrial digital printers, allowing for fully personalized, short-run prints on packaging. These technologies make on-demand production possible, eliminate unnecessary inventory, and enable rapid responses to changing market needs and marketing campaigns. Another example involves fully digital cutting and creasing processes, using lasers for precision cutting and custom polymer-coated drums for creasing. These technologies perfectly reflect the principles of localization and personalization that define Industry 5.0.

Alongside industrial implementation, intensive research is being conducted to further improve the material and environmental efficiency of corrugated board. Research centers and universities are experimenting with new fluting geometries [7, 8, 11] designed to increase stiffness while reducing raw material usage. These studies often combine numerical analysis with physical mechanical testing, creating advanced predictive models supported by artificial intelligence.

Research into integrating environmental sensors directly into packaging materials is also gaining importance. The goal is to develop corrugated board that can “respond” to environmental changes – by changing color, sending data to the cloud, or activating warning functions. This approach opens the door to self-analyzing packaging that acts as an active participant in the logistics chain.

In the coming years, a significant research direction will be the development of digital tools to track and analyze packaging lifecycles. Digital material passports – based on LCA data and blockchain technology – may become standard in documenting product compliance with circular economy principles. Their implementation will empower both manufacturers and consumers to make purchasing decisions based on the actual environmental impact of products.



lasery, a do bigowania specjalne bębny z nadrukowanym polimerem. Technologie te idealnie wpisują się w idee lokalności i personalizacji, charakterystyczne dla Przemysłu 5.0.

Równolegle do wdrożeń przemysłowych rozwijane są intensywne prace badawcze, których celem jest dalsze zwiększanie efektywności materiałowej i środowiskowej tektury falistej. W centrach badawczych i uczelniach wyższych prowadzi się eksperymenty dotyczące nowych geometrii warstwy falistej [7, 8, 11], mających na celu zwiększenie sztywności przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia surowca. Badania te często łączą analizy numeryczne z fizycznymi testami mechanicznymi, tworząc zaawansowane modele predykcyjne wspierane sztuczną inteligencją.

Rosnące znaczenie zyskują również badania nad integracją czujników środowiskowych z materiałem opakowaniowym. Celem tych prac jest stworzenie tektury, która będzie w stanie „reagować” na zmienne warunki otoczenia – poprzez zmianę koloru, przesyłanie danych do chmury czy aktywację określonych funkcji ostrzegawczych. Takie podejście otwiera drogę do opakowań samoanalizujących, które będą pełnić rolę aktywnego uczestnika w łańcuchu logistycznym.

W perspektywie najbliższych lat istotnym kierunkiem badań stanie się także rozwój narzędzi cyfrowych umożliwiających śledzenie i analizę cyklu życia opakowań. Cyfrowe paszporty materiałowe, oparte na danych LCA i technologii blockchain, mogą stać się standardem w dokumentowaniu zgodności produktów z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Ich wdrożenie pozwoli zarówno producentom, jak i konsumentom podejmować decyzje zakupowe w oparciu o rzeczywisty wpływ środowiskowy produktów.

Zarówno praktyka przemysłowa, jak i badania naukowe wyraźnie wskazują, że tektura falista ma szansę odegrać kluczową rolę w nowym paradygmacie przemysłu. Jest materiałem prostym w strukturze, lecz wyjątkowo podatnym na modyfikacje i adaptację technologii. Dzięki temu może pełnić funkcję nośnika innowacji – łączącego świat technologii cyfrowej, zrównoważonej gospodarki i odpowiedzialnego projektowania.

Podsumowanie i wnioski

Przemysł 5.0 to nie tylko kolejna faza rozwoju technologicznego, lecz przede wszystkim jakościowa zmiana w sposobie myślenia o produkcji, użytkowaniu i odpowiedzialności za cykl życia produktów. W centrum tej koncepcji znajduje się człowiek – nie jako bierny uczestnik, ale jako świadomy projektant, użytkownik i decydent. Współpraca z technologią, rozwój sztucznej inteligencji i cyfryzacja stają się narzędziami nie tyle automatyzacji, co personalizacji, lokalności i zrównoważonego działania.

Tektura falista, choć od lat obecna w przemyśle opakowaniowym, dziś przechodzi cichą rewolucję. Z materiału funkcjonalnego i masowego staje się strukturą zdolną do komunikacji, adaptacji i powrotu do obiegu. Wspierana przez cyfrowe paszporty,

Both industrial practice and scientific research clearly indicate that corrugated board has the potential to play a key role in the new industrial paradigm. Though simple in structure, it is remarkably adaptable to technological innovations. As such, it can serve as a carrier of innovation – bridging the worlds of digital technology, sustainable economy, and responsible design.

Summary and Conclusions

Industry 5.0 is not merely the next phase of technological development – it represents a qualitative shift in how we think about production, product use, and responsibility for the product lifecycle. At the heart of this concept is the human being – not as a passive participant, but as an active designer, user, and decision-maker. Collaboration with technology, the development of artificial intelligence, and digitalization are no longer just tools of automation, but instruments for personalization, localization, and sustainable action.

Corrugated board, long present in the packaging industry, is now undergoing a quiet revolution. From a purely functional and mass-produced material, it is evolving into a structure capable of communication, adaptation, and reintegration into the cycle. Supported by digital passports, advanced coatings, sensors, and AI algorithms, it is becoming a carrier of innovation – both technologically and environmentally. Thanks to its simplicity and versatility, it can act as a bridge between advanced digitalization and the vision of a circular economy.

The use of simulation methods, machine learning, and decision-support systems enables the creation of packaging that is more efficient, precisely tailored to user needs, and environmentally friendly. Production becomes flexible and responsive to changing market conditions, while logistics become intelligent and predictive. The entire system – from raw materials, through design, to recycling – can be managed in a holistic, transparent, and responsible way.

This article demonstrates that smart corrugated board is not just a part of the broader transformation taking place in industry – it is a symbol of it. It connects the analog with the digital; the local with the global; the practical with the ethical. In the world of Industry 5.0, corrugated board is no longer merely packaging – it becomes part of a socio-technical system that unites technology with care for both humanity and the planet.

Peer-reviewed article



zaawansowane powłoki, czujniki oraz algorytmy sztucznej inteligencji, staje się nośnikiem innowacji – zarówno w wymiarze technologicznym, jak i środowiskowym. Dzięki swej prostocie i uniwersalności może pełnić rolę pomostu między zaawansowaną cyfryzacją a ideą gospodarki cyrkularnej.

Zastosowanie metod symulacyjnych, uczenia maszynowego i systemów wspomagania decyzji pozwala tworzyć opakowania bardziej efektywne, precyzyjnie dopasowane do potrzeb użytkownika i przyjazne środowisku. Produkcja staje się elastyczna, reagująca na zmieniające się warunki rynkowe, a logistyka – inteligentna i przewidywalna. Cały system – od surowca, przez projekt, aż po recykling – może być zarządzany w sposób holistyczny, transparentny i odpowiedzialny.

Niniejszy artykuł pokazuje, że inteligentna tektura falista jest nie tylko elementem większego procesu przemian w przemyśle, ale wręcz jego symbolem. Łączy to, co analogowe, z tym, co cyfrowe; to, co lokalne, z tym, co globalne; oraz to, co praktyczne, z tym, co etyczne. W świecie Przemysłu 5.0 tektura przestaje być jedynie opakowaniem – staje się częścią systemu społeczno-technicznego, który łączy technologię z troską o człowieka i planetę.

Artykuł recenzowany

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Anastas J.V. 1998. "Edgewise compression test". International Corrugated Containers Conference & Trade Fair, Proceedings.
- [2] 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.
- [3] Brittain J 2003. "ECT: Edge crush test | ECT: Prueba de aplastamiento del borde". *Mari Papel y Corrugado* 16 (3) : 49-50.
- [4] 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.
- [5] Coffin D.W., Wade K., Hussain S. 2019. "Links between BCT and lifetime for corrugated boxes". Paper Conference and Trade Show, PaperCon 2019 2 : 1334-1348.
- [6] 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.
- [7] Garbowski T. 2025. "Numerical analysis of transverse shear in corrugated board with non-standard fluting geometry | Numeryczna analiza ścinania poprzecznego płyty z tektury falistej z warstwą pofalowaną o niestandardowej geometrii". *Przegląd Papierniczy* 81 (5) : 249-257. DOI: 10.15199/54.2025.5.1.
- [8] Garbowski T. 2025. "Flat crush analysis of corrugated board with futuristic fluting geometries | Analiza zgniatania płaskiego tektury falistej z warstwą pofalowaną o futurystycznych kształtach". *Przegląd Papierniczy* 81 (4) : 205-212. DOI: 10.15199/54.2025.4.1.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Garbowski T. 2022. "Digitization of corrugated board | Digitalizacja tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 78 (12) : 683-686. DOI: 10.15199/54.2022.12.2.
- [18] 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.
- [19] Garbowski T. 2022. "Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board | Wpływ wstępnych imperfekcji na odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 78 (6) : 337-341. DOI: 10.15199/54.2022.6.1.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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: 10.15199/54.2018.8.1.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity Analysis of Edge Crush Test | Analiza wrażliwości w teście krawędziowego zgniatania". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [29] Garbowski T., Borysiewicz A. 2014. "The Stability of Corrugated Board Packages | Stateczność opakowań z tektury falistej". *Przegląd Papierniczy* 70 (8) : 452-458.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Hoon M.L., Park J.M. 2004. "Flexural stiffness of selected corrugated structures". *Packaging Technology and Science* 17 (5) : 275-286.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Kmita-Fudalej G., Szewczyk W., Kotakowski Z. 2020. "Calculation of honeycomb paperboard resistance to EDGE crush test". *Materials* 13 (7) : 1706.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Schrapfer 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.
- [44] Szewczyk W. 2008. "Edge crush test of corrugated board | Odporność tektury falistej na zgniatanie krawędziowe". *Przegląd Papierniczy* 64 (2) : 93-96.
- [45] Tutak D., Özkahun 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.