



# Zastosowanie sztucznej inteligencji do optymalnej produkcji tektury falistej

The use of artificial intelligence for the optimal production of corrugated board

TOMASZ GARBOWSKI

DOI: 10.15199/54.2023.5.2

*Podczas produkcji tektury falistej zachodzi wiele dynamicznych procesów fizycznych i mechanicznych, takich jak formowanie warstwy pofalowanej, sklejanie linerów z flutingiem przy udziale wysokiej temperatury i ciśnienia. Dynamika tych procesów bezpośrednio wpływa na jakość produktu, a także na ilość i rodzaj ewentualnych wad. Właściwości użytkowe i wytrzymałościowe tektury falistej zależą też od typu i gramatury papierów wykorzystanych na poszczególne warstwy oraz od ilości i składu/stężenia mieszanki klejowej. Kluczową rolę odgrywa również wilgotność materiału wsadowego oraz temperatura w procesie nagrzewania i suszenia. Tektura falista po przerobieniu nie jest tożsama z tekturą bezpośrednio po wyprodukowaniu, a suma cech papierów składowych wykorzystanych do jej produkcji nie wystarczy, aby ją poprawnie opisać.*

*W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytania – jak poprawnie wykorzystać informacje o materiale wsadowym używanym do produkcji tektury falistej i jak zintegrować parametry produkcyjne oraz inne dane pomiarowe zbierane podczas magazynowania, transportu i przerobu ze sztuczną inteligencją, w celu zoptymalizowania procesu produkcji i samego produktu.*

**Słowa kluczowe:** tektura falista, sztuczna inteligencja, przetwarzanie, parametry mechaniczne, wilgotność, temperatura

*During the production of corrugated board, many dynamic physical and mechanical processes take place, such as the formation of a corrugated layer, gluing of liners with fluting using high temperature and pressure. The dynamic of these processes directly affects the quality of the product, as well as the number and type of possible defects. The usable and strength properties of corrugated board also depend on the type and grammage of papers used for individual layers and on the amount and composition/concentration of the adhesive mixture. The moisture content of the input material, as well as the temperature in the heating and drying process, also play a key role. There is no doubt that corrugated board after converting is not identical to cardboard immediately after production, and the sum of the characteristics of the constituent papers used for its production is not enough to describe it correctly. This article attempts to answer the question of how to correctly use information about the input material used for the production of corrugated board, as well as how to integrate production parameters and other measurement data collected during storage, transport / processing with artificial intelligence in order to optimize the production process and the product itself.*

**Keywords:** corrugated board, artificial intelligence, converting, mechanical parameters, humidity, temperature

## Tektura falista na tle innych materiałów konstrukcyjnych

Tektura falista jest materiałem konstrukcyjnym, jednak znacznie różniącym się od pozostałych materiałów wykorzystywanych do konstruowania lub produkcji elementów konstrukcyjnych. W przemyśle budowlanym najczęściej stosuje się takie materiały, jak beton,

## Corrugated board compared to other construction materials

Corrugated board is a construction material but still quite different than other materials used for the construction or production of structural elements. For example, in the construction industry,

Dr hab. inż. **T. Garbowski**, prof. UPP, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), ORCID: 0000-0002-9588-2514  
Associate Professor **T. Garbowski** (tomasz.garbowski@up.poznan.pl), Poznan University of Life Sciences, Faculty of Environmental and Mechanical Engineering



stal czy drewno, natomiast w samochodowym czy lotniczym – stopy metali lekkich, aluminium, kompozyty oraz różnego rodzaju tworzywa sztuczne. Można oczywiście znaleźć wiele podobieństw między teksturą falistą a innymi materiałami konstrukcyjnymi, np. kompozyty i drewno są – podobnie jak papier – materiałami ortotropowymi, tzn. charakteryzują się różną sztywnością i wytrzymałością w różnych kierunkach (drewno ma dużo wyższą wytrzymałość wzdłuż włókien niż w poprzek). Innym przykładem podobieństwa może być kształt elementów strukturalnych stosowanych jako elementy poszycia statków i samolotów, które często mają – podobnie jak tekstura falista – warstwową strukturę z pofalowanym rdzeniem, z tą różnicą, że wszystkie warstwy wykonane są z cienkich blach stalowych lub częściowo z tworzyw sztucznych.

Tym, co odróżnia inne materiały konstrukcyjne od tekstury falistej jest sposób, w jaki wilgotność i temperatura wpływają na ich parametry wytrzymałościowe. Właściwości mechaniczne niektórych, nawet typowych materiałów konstrukcyjnych mogą oczywiście zależeć od wilgotności. Na przykład popularny w budownictwie beton składa się z wody, cementu i kruszywa, a więc woda odgrywa kluczową rolę w procesie hydratacji, podczas którego woda reaguje z cementem, tworząc trwałe wiązania chemiczne. Tak więc wilgotność i temperatura wpływają na strukturę tego materiału, zmieniając jego właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ściskanie, zginanie, rozciąganie i odporność na pękanie. Jednakże zależność betonu od wilgotności kończy się w chwili, gdy materiał zakończy proces utwardzania.

Innym ciekawym przykładem jest drewno, którego właściwości mechaniczne zależą od wilgotności i temperatury. Drewno, podobnie jak papier i tekstura falista, jest materiałem higroskopijnym, co oznacza, że absorbuje wodę z otoczenia i oddaje ją, gdy otoczenie jest suche. Teoretycznie wilgotność i temperatura mogą więc wpłynąć na wiele właściwości drewna, takich jak wytrzymałość, sztywność, twardość, giętkość i odporność na pękanie. W skrajnych przypadkach, gdy drewno jest zbyt mokre, może ulec deformacjom, a nawet zgniciu i zniszczeniu. Z drugiej strony, suche drewno może stać się kruche i łatwo ulegać pęknięciom. Można je jednak zabezpieczyć środkami impregnującymi (najczęściej substancjami chemicznymi), które mają na celu zwiększenie odporności tego materiału na czynniki zewnętrzne (wilgoć, grzyby, owady, ogień). Niestety, tekstury falistej, stosowanej do produkcji opakowań, nie impregnuje się, z uwagi na utratę możliwości ekologicznego odzyskania włókien w procesie recyklingu.

Porównując teksturę falistą do, na przykład, kompozytów polimerowych, które składają się zazwyczaj z matrycy polimerowej wzmocnionej włóknami węglowymi, szklanymi lub aramidowymi, czy też do kompozytów ceramicznych, laminarnych lub hybrydowych, szybko przekonamy się, że podobieństwo kończy się na wspomnianej już ortotropii. Jak wiadomo, tekstura falista jest wykonana z papieru z dodatkiem kleju, dlatego jest lekka, elastyczna i ma doskonałe właściwości wytrzymałościowe na zginanie [15-18] i rozciąganie/

materials such as concrete, steel and wood are most often used. On the other hand, in the automotive or aviation industry, light metal alloys, aluminum, composites or various types of plastics are often used. Of course, there are many similarities between corrugated board and other construction materials. For example, composites and wood are, like paper, orthotropic materials - i.e. they have different stiffness and strength in different directions (wood has much higher strength along the fibers than across). Another example of similarity may be the shape of structural elements itself – e.g. ship and aircraft skin elements often have, like corrugated board, a layered structure with a corrugated core, with the difference that all layers are made of thin steel sheets or partly of plastics.

What distinguishes other construction materials from corrugated board is the way in which humidity and temperature affect their strength parameters. The mechanical properties of some, even common, construction materials may of course depend on humidity. For example, concrete, popular in construction, is made up of water, cement and aggregate, so water plays a key role in the hydration process, where it reacts with cement to form permanent chemical bonds. Thus, humidity and temperature affect the structure of this material, changing its mechanical properties such as compressive strength, flexural strength, tensile strength and fracture toughness. However, the moisture dependence of concrete ends once the material has completed the curing process.

Another interesting example is wood, which mechanical properties also depend on humidity and temperature. Wood, like paper and corrugated board, is a hygroscopic material, which means that it absorbs water from the environment and releases it when the environment is dry. Theoretically, humidity and temperature can therefore affect many properties of timber, such as strength, stiffness, hardness, flexibility and resistance to cracking. In extreme cases, when the wood is too wet, it can be deformed, and even rotten and destroyed. On the other hand, dry wood can become brittle and crack easily. However, they can be protected with impregnating agents (usually with chemicals), which are intended to increase the resistance of this material to external factors, such as moisture, fungi, insects or fire. Unfortunately, corrugated board used for packaging applications is not impregnated due to the loss of the possibility of ecological recovery of fibers in the recycling process.

Comparing corrugated board to, for example, polymer composites, which usually consist of a polymer matrix reinforced with carbon, glass or aramid fibers, or to ceramic, laminar or hybrid composites, it can be seen that the similarity ends with the already mentioned orthotropy. As it is known, corrugated board is made of paper with glue, therefore it is light, flexible and has excellent bending strength [15-18] and tensile /compressive [3, 4, 5, 13] properties in relation to its weight, which makes it a popular material for packaging and transport [12, 14]. Unfortunately,



ściskanie [3, 4, 5, 13] w stosunku do swojej wagi, co czyni ją popularnym materiałem do pakowania i transportu [12, 14]. Niestety, tektura falista, w odróżnieniu od kompozytów, jest też bardzo podatna na uszkodzenia spowodowane wilgocią i temperaturą, a jej właściwości mechaniczne ulegają pogorszeniu w warunkach mokrych. Tektura falista jest materiałem, który może wchłaniać wilgoć i przez to tracić wytrzymałość, ale jednocześnie umiarkowane wilgotne powietrze może poprawić jej elastyczność, ułatwiając proces produkcji. Dlatego też producenci tektury falistej czynią nieustanne starania, aby brać pod uwagę wpływ wilgotności na materiał i dobierać odpowiednie rozwiązania, w zależności od konkretnych potrzeb.

### Parametry w procesie produkcji tektury falistej

Kluczowy argument przemawiający za wyższością tektury falistej nad innymi materiałami to ekologia. Tektura falista jest materiałem biodegradowalnym i pochodzi z odnawialnych źródeł, co czyni ją bardziej przyjazną dla środowiska niż materiały sztuczne, takie jak tworzywa sztuczne czy aluminium. Dodatkowo, jest łatwiejsza do recyklingu niż wiele innych materiałów. Tektura falista jest też materiałem tańszym niż plastik czy metal, co czyni ją atrakcyjną opcją dla firm, które chcą obniżyć koszty transportu produkowanych produktów. Ponadto, tektura falista to materiał łatwy do przetwarzania, co umożliwia produkcję opakowań w różnych kształtach i rozmiarach [17-18]. Jak już wspomniano tektura falista jest materiałem bardzo podatnym na wilgoć, która bezpośrednio wpływa na jej wytrzymałość i właściwości mechaniczne (mięknie i traci swoją pierwotną wytrzymałość). Może również ulegać deformacjom i zmianom kształtu, co w znacznym stopniu obniża walory wizualne opakowania i cechy ochronne transportowanego produktu.

Zadanie polegające na optymalizacji procesu produkcji tektury falistej, tak aby spełniała założoną a priori rolę w opakowaniu, nie jest łatwe. Mamy świadomość, że zanim z tektury zostanie wyprodukowane opakowanie, na jej cechy wpływa też proces magazynowania i sezonowania w różnych (często zmiennych) warunkach panujących w magazynach. Wiadomo, że arkusze tektury falistej składowane tuż po wyprodukowaniu w wysokich stosach absorbują lub oddają wilgoć, zmienia się ich temperatura (często nierównomiernie), a arkusze ze spodu stosu są dociskane przez partię materiału tuż nad nimi. Tektura jest też transportowana, często na duże odległości, w różnych warunkach wilgotnościowo-termicznych. Dodatkowo, tuż przed przekształceniem tektury falistej w funkcjonalne opakowanie, jest ona często zadrukowywana jednym lub wieloma kolorami, następnie bigowana i wycinana, czasami też automatycznie sklejana i składana. Wszystkie procesy przetwórcze pozostawiają swój ślad na tekturze, np. farba zmienia wilgotność zadrukowanych linerów [6], wały drukujące oraz gumy bigujące przegniatają przekrój tektury [9-11], czasami proces bigowania prowadzi do jej uszkodzenia (szczególnie gdy tektura jest mocno przesuszona).

corrugated board, unlike composites, is also very susceptible to damage caused by moisture and temperature, and its mechanical properties deteriorate in wet conditions. Even though corrugated board is a material that can absorb moisture and lose strength, at the same time, moderately humid air can improve its flexibility, facilitating the production process. Therefore, corrugated board manufacturers make continuous efforts to take into account the influence of humidity on the material and select appropriate solutions depending on specific needs.

### Parameters in the corrugated board production process

An important aspect is ecology, which is a key argument in favor of the superiority of corrugated board over other materials. Cardboard is a biodegradable material and comes from renewable sources, which makes it more environmentally friendly than synthetic materials such as plastic or aluminum. In addition, corrugated cardboard is easier to recycle than many other materials. Corrugated board is also a less expensive material than plastic or metal, making it an attractive option for companies looking to reduce transportation costs. In addition, cardboard is an easy to process material, which enables the production of packaging in various shapes and sizes [17, 18]. As already mentioned, corrugated board is a material that is very susceptible to moisture, which directly affects its strength and mechanical properties of cardboard (it softens and loses its original strength). It can also undergo deformations and shape changes, which significantly reduces the visual qualities of the packaging and reduces the protective properties of the transported product.

Therefore, the task of optimizing the production process of corrugated board so that it fulfills the role assumed a priori in the packaging is not an easy one. We are aware that before the packaging is made of cardboard, its characteristics are also influenced by the process of its storage and seasoning in various (often changing) conditions in warehouses. It is known that corrugated board sheets stored in high piles immediately after production absorb or release moisture, their temperature also changes (often unevenly), sheets from the bottom of the stack are pressed down by a batch of material just above them. Cardboard is also transported in various humidity and thermal conditions, often over long distances. In addition, just before the corrugated board is transformed into functional packaging, it is often printed with one or more colors, then creased and cut, sometimes also automatically glued and folded. All converting processes leave their mark on the cardboard, e.g. paint changes the humidity of printed liners [6], printing rollers and creasing rubbers crease the cardboard cross-section [9-11], sometimes the creasing process leads to its damage (especially when the cardboard is very dry).

All the parameters mentioned above have a significant impact on the corrugated board packaging, but they cannot be directly



Wszystkie wymienione parametry mają istotny wpływ na opakowanie z tektury falistej, jednak nie mogą być bezpośrednio uwzględnione w optymalizacji produkcji samej tektury. Niemniej należy o nich pamiętać, gdyż optymalizacja tektury falistej w odebraniu od jej przyszłej roli w opakowaniu jest podejściem błędnym, co było tematem wcześniejszej publikacji [2]. Niniejszy artykuł jest próbą odpowiedzi na pytanie – czy proces produkcji tektury, który charakteryzuje się dużą dynamiką, można zdigitalizować [1, 7, 8, 12, 14-16], a co a za tym idzie również kontrolować i optymalizować. Dodatkowym problemem podjętym w tej pracy jest kwestia – czy proces produkcji może być wspomagany sztuczną inteligencją. Zanim jednak przejdziemy do rozważań na temat możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do optymalizacji procesu produkcji tektury falistej, sprawdźmy w jakich procesach produkcyjnych można już dzisiaj znaleźć sztuczną inteligencję.

### Optymalizacja za pomocą sztucznej inteligencji w pigułce

Sztuczna inteligencja (AI) jest obecnie wykorzystywana w wielu różnych dziedzinach przemysłu, takich jak: inżynieria, biznes, ekonomia, nauki społeczne, np. do monitorowania, optymalizacji czy też predykcji procesów produkcji. Oto kilka przykładów:

- **Monitorowanie procesu produkcyjnego** – AI jest obecnie wykorzystywana do monitorowania procesu produkcyjnego w czasie rzeczywistym. Za pomocą czujników i algorytmów uczenia maszynowego może analizować dane dotyczące prędkości produkcji, zużycia energii, zużycia surowców i jakości produkowanego produktu. Na podstawie tych danych AI może identyfikować obszary, w których można wprowadzić ulepszenia, aby poprawić wydajność i jakość produkcji.
- **Optymalizacja procesów produkcyjnych** – AI jest wykorzystywana do optymalizacji procesów produkcyjnych. Za pomocą algorytmów optymalizacji, AI może np. wyznaczać najlepsze ustawienia maszyn i parametrów produkcji w celu maksymalizacji wydajności i minimalizacji kosztów. Według hipotezy postawionej w tej pracy, AI może też zostać wykorzystana do optymalizacji samego produktu.
- **Predykcyjne utrzymanie maszyn** – AI jest wykorzystywana do predykcyjnego utrzymania maszyn w fabryce. Za pomocą algorytmów uczenia maszynowego, AI może analizować dane dotyczące zużycia części maszyn, zużycia energii i innych czynników, które wpływają na wydajność maszyn. Na podstawie tych danych AI może przewidywać, kiedy części wymagają wymiany lub jakie inne działania należy podjąć, aby utrzymać maszyny w jak najlepszej kondycji.
- **Optymalizacja planowania produkcji** – AI jest wykorzystywana do optymalizacji planowania produkcji. Za pomocą algorytmów planowania, AI może wyznaczać najlepsze harmonogramy produkcji w celu maksymalizacji wydajności i minimalizacji kosztów.

taken into account in the optimization of the production of the cardboard itself. Nevertheless, they should be remembered, because the optimization of corrugated board in isolation from its future role in the packaging is a wrong approach, which was already discussed in the article [2]. This article is an attempt to answer the question whether the cardboard production process, which is characterized by high dynamics, can be digitized [1, 7, 8, 12, 14-16] and thus also controlled and optimized. An additional problem for discussion is related to the question whether the production process can be supported by artificial intelligence. However, before we consider the possibility of using artificial intelligence to optimize the corrugated board production process, let's check in which production processes artificial intelligence can already be found today.

### Optimization with artificial intelligence in a nutshell

Artificial intelligence (AI) is currently used in many different fields of industry, such as engineering, business, economics or social sciences for monitoring, optimizing or predicting production processes. Here are some examples:

- **Production process monitoring** – AI is now being used to monitor the production process in real time. Using sensors and machine learning algorithms, AI can analyze data on production speed, energy consumption, raw material consumption and product quality. Based on this data, AI can identify areas where improvements can be made to improve production efficiency and quality.
- **Optimization of production processes** – AI is used to optimize production processes. Using optimization algorithms, AI can, for example, determine the best machine settings and production parameters to maximize efficiency and minimize costs. According to the hypothesis put forward in this work, AI can also be used to optimize the product itself.
- **Predictive machine maintenance** – AI is used to predictively maintain machines in the factory. Using machine learning algorithms, AI can analyze data on machine parts wear, energy consumption, and other factors that affect machine performance. Based on this data, the AI can predict when parts need to be replaced or what other actions need to be taken to keep machines in top condition.
- **Optimization of production planning** – AI is used to optimize production planning. Using scheduling algorithms, AI can determine the best production schedules to maximize efficiency and minimize costs.

All of the AI applications listed above can help improve production efficiency and quality, thereby increasing producer profits and customer satisfaction. However, in order to solve the problem of optimizing the production of e.g. corrugated board, it is necessary to find the best settings of selected production parameters and





Wszystkie wymienione wyżej zastosowania sztucznej inteligencji mogą się przyczynić do poprawy wydajności i jakości produkcji, a tym samym zwiększyć zyski producentów i zadowolenie klientów. Jednak, aby rozwiązać problem optymalizacji produkcji, np. tektury falistej, należy znaleźć najlepsze nastawy wybranych parametrów produkcyjnych oraz odpowiedni dobór cech materiałów wsadowych, z uwzględnieniem wielu ograniczeń i czasami wzajemnie się wykluczających celów. Jest to zatem zagadnienie trudne, którego poprawne rozwiązanie wymaga bardzo specjalistycznej wiedzy.

### Optymalizacja metodami tradycyjnymi vs metodami za pomocą sztucznej inteligencji

Obecnie stosowane metody optymalizacji oparte na sztucznej inteligencji, takie jak: algorytmy genetyczne, sieci neuronowe, algorytmy roju cząstek czy uczenie maszynowe, coraz częściej znajdują zastosowanie w inżynierii produkcji i optymalizacji procesów. W kontraście do metod opartych na AI można też znaleźć wiele przykładów zastosowania metod tradycyjnych, od dawna stosowanych i dobrze znanych w wielu branżach przemysłu, jak: programowanie liniowe, programowanie nieliniowe, programowanie całkowite, heurystyczne metody optymalizacji itp. Są one stosowane do rozwiązywania prostych problemów optymalizacyjnych, często opartych na matematycznych modelach, które wykorzystują funkcje celu do określenia najlepszego rozwiązania. Metody oparte na sztucznej inteligencji są stosunkowo nowe w dziedzinie inżynierii i optymalizacji procesów, jednakże coraz bardziej popularne, ze względu na zdolność do rozwiązywania skomplikowanych problemów optymalizacyjnych.

Jak już wspomniano, metody tradycyjne stosuje się do rozwiązywania prostych problemów optymalizacyjnych, podczas gdy metody oparte na sztucznej inteligencji są skuteczne w rozwiązywaniu skomplikowanych problemów optymalizacyjnych, w których tradycyjne metody nie są w stanie zapewnić zadowalających wyników. Wynika to z potrzeby zbudowania matematycznego modelu, co może być czasochłonne i skomplikowane, a często wręcz niemożliwe, z uwagi na stopień skomplikowania analizowanego procesu. Metody oparte na sztucznej inteligencji nie wymagają takiego modelu, a wyniki są uzyskiwane na podstawie uczenia maszynowego lub heurystyki, co sprawia że można je zastosować do próby rozwiązania bardziej skomplikowanych zagadnień (takich jak np. optymalizacja procesów produkcyjnych). Jednakże, metody oparte na sztucznej inteligencji wymagają większej ilości danych, a ich wyniki mogą być trudne do interpretacji. Zestaw zalet i wad obu metod zestawiono w tabeli 1.

Wybór między metodami tradycyjnymi i opartymi na sztucznej inteligencji zależy od problemu, który należy rozwiązać oraz od dostępnych zasobów, takich jak czas i dane. Główne różnice między wspomnianymi metodami, które mogą pomóc w wyborze, to m.in.:

- Dostępność danych – Metody oparte na sztucznej inteligencji wymagają dużej ilości danych, aby poprawnie funkcjonować.

the appropriate selection of input material characteristics, taking into account many limitations and sometimes mutually exclusive goals, which makes this issue difficult and its correct solution requires very specialized knowledge.

### Optimization with traditional methods vs methods using artificial intelligence

Currently used optimization methods based on artificial intelligence, such as genetic algorithms, neural networks, particle swarm algorithms or machine learning, are increasingly used in production engineering and process optimization. In contrast to AI-based methods, one can also find many examples using traditional methods, such as linear programming, non-linear programming, integral programming, heuristic optimization methods, etc., which have been used for a long time and are well known in many industries. They are used to solve simple optimization problems, often based on mathematical models that use objective functions to determine the best solution. Artificial intelligence-based methods are relatively new to the field of process engineering and optimization. However, they are becoming more and more popular due to their ability to solve complex optimization problems.

As already mentioned, traditional methods are used to solve simple optimization problems, while AI-based methods are effective in solving complex optimization problems where traditional methods cannot provide satisfactory results. This is due to the need to build a mathematical model, which can be time-consuming and complicated, and often even impossible due to the complexity of the analyzed process. Methods based on artificial intelligence do not require such a model, and the results are obtained on the basis of machine learning or heuristics, which means that they can be used to try to solve more complex issues (such as optimization of production processes). However, methods based on artificial intelligence require larger amounts of data, and their results may be difficult to interpret. A set of advantages and disadvantages of both methods is summarized in Table 1.

The choice between traditional and AI-based methods depends on the problem we want to solve and the available resources, such as time and data. The main differences between these methods that can help to make a choice include:

- Data Availability – AI-based methods require large amounts of data to function properly. In the absence of enough data, artificial intelligence algorithms will not be able to generate accurate results. On the other hand, traditional optimization methods require less data, and even in the absence of data, they can still be used, assuming that the model used is complete and correct.
- Accuracy – AI-based methods tend to outperform traditional optimization methods because AI algorithms are able to consider more variables and detect more complex relationships between them.



Tabela 1. Porównanie metod tradycyjnych z metodami opartymi na sztucznej inteligencji

	Metody tradycyjne	Metody oparte na sztucznej inteligencji
Wady	Metody tradycyjne mają tendencję do zbiegania się do lokalnych ekstremów, co oznacza, że mogą pomijać globalne optimum.	Metody oparte na sztucznej inteligencji są często mniej dokładne i mniej przewidywalne niż metody tradycyjne.
	Niektóre problemy optymalizacji mogą być zbyt złożone, aby je rozwiązać przy użyciu tradycyjnych metod.	Mogą być bardziej złożone i wymagać większej ilości czasu obliczeniowego niż metody tradycyjne.
Zalety	Optymalizacja tradycyjna jest powszechnie stosowana i ma dobrze opracowane teorie matematyczne i narzędzia do rozwiązywania problemów optymalizacji.	Metody oparte na sztucznej inteligencji mają zdolność do unikania lokalnych ekstremów i zbiegania się do globalnego optimum.
	Metody te są dokładne i deterministyczne, co oznacza, że wyniki są przewidywalne i powtarzalne.	Mogą być stosowane do złożonych problemów optymalizacji, które są trudne do rozwiązania za pomocą tradycyjnych metod.

Table 1. Comparison of traditional methods with methods based on artificial intelligence

	Traditional methods	Methods based on artificial intelligence
Disadvantages	Traditional methods tend to converge to local extremes, which means they may miss the global optimum.	AI-based methods are often less accurate and less predictable than traditional methods.
	Some optimization problems may be too complex to solve using traditional methods.	They can be more complex and require more computational time than traditional methods.
Advantages	Traditional optimization is widely used and has well-developed mathematical theories and tools for solving optimization problems.	AI-based methods have the ability to avoid local extremes and converge to a global optimum.
	These methods are accurate and deterministic, which means that the results are predictable and repeatable.	They can be applied to complex optimization problems that are difficult to solve by traditional methods.

W przypadku braku wystarczającej ilości danych, algorytmy sztucznej inteligencji nie będą w stanie wygenerować dokładnych wyników. Z drugiej strony, tradycyjne metody optymalizacji wymagają mniejszej ilości danych, a nawet w przypadku braku danych, nadal mogą być stosowane, przy założeniu, że zastosowany model jest kompletny i poprawny.

- **Dokładność** – Metody oparte na sztucznej inteligencji mają tendencję do osiągania lepszych wyników niż tradycyjne metody optymalizacji, ponieważ algorytmy sztucznej inteligencji są w stanie uwzględnić więcej zmiennych i wykryć bardziej złożone zależności między nimi.
- **Złożoność** – Metody oparte na sztucznej inteligencji są bardziej skomplikowane i wymagają większej liczby etapów niż tradycyjne metody optymalizacji. Wymagają one również specjalistycznej wiedzy i doświadczenia w dziedzinie sztucznej inteligencji, co może skutkować wyższymi kosztami.
- **Przydatność** – Metody oparte na sztucznej inteligencji są szczególnie przydatne w dziedzinach, w których trudno jest opracować matematyczne modele i funkcje celu. Na przykład, w przypadku problemów optymalizacyjnych związanych z procesami przemysłowymi, które są bardzo złożone i dynamiczne, metody oparte na sztucznej inteligencji mogą zapewnić bardziej precyzyjne i szybsze wyniki.
- **Koszty** – Metody oparte na sztucznej inteligencji są zwykle droższe niż tradycyjne metody optymalizacji, ze względu na konieczność zastosowania specjalistycznych narzędzi i algorytmów. Ponadto, szkolenie algorytmów sztucznej inteligencji wymaga czasu i zasobów, co może zwiększyć koszty.

- **Complexity** – AI-based methods are more complex and require more steps than traditional optimization methods. They also require specialized knowledge and experience in the field of artificial intelligence, which can result in higher costs.
- **Applicability** – AI-based methods are particularly useful in areas where it is difficult to develop mathematical models and objective functions. For example, for optimization problems related to industrial processes that are very complex and dynamic, AI-based methods can provide more precise and faster results.
- **Costs** – AI-based methods are usually more expensive than traditional optimization methods due to the need for specialized tools and algorithms. In addition, training AI algorithms takes time and resources, which can increase costs.

Thus, methods based on artificial intelligence offer many advantages in the field of optimization, especially for problems of high complexity. However, their use requires specialized knowledge and experience. In conclusion, traditional methods and methods based on artificial intelligence have their strengths and weaknesses in optimization. The choice of the appropriate method depends on the specifics of the problem, as well as the resources and time that are available to solve the problem. Optimizing production processes is undoubtedly a complex problem, so the use of AI-based methods seems well motivated. In addition, the use of traditional methods for this issue would be very difficult, because creating a comprehensive and correct mathematical model seems impossible in this case.



Metody oparte na sztucznej inteligencji oferują zatem wiele zalet w dziedzinie optymalizacji, szczególnie w przypadku problemów o wysokiej złożoności. Jednak ich stosowanie wymaga wyspecjalizowanej wiedzy i doświadczenia. Podsumowując, metody tradycyjne i metody oparte na sztucznej inteligencji mają swoje mocne i słabe strony w optymalizacji. Wybór odpowiedniej metody zależy od specyfiki problemu, a także od zasobów i czasu, które są dostępne do rozwiązania problemu. Optymalizacja procesów produkcyjnych jest bez wątpienia problemem złożonym, więc zastosowanie metod opartych na AI wydaje się dobrze zmotywowane. Dodatkowo, wykorzystanie metod tradycyjnych do tego zagadnienia byłoby bardzo trudne, ponieważ stworzenie kompleksowego i poprawnego modelu matematycznego wydaje się w tym przypadku niemożliwe.

### Przykład zastosowania tradycyjnych metod optymalizacji, opartych na algorytmach genetycznych do poszukiwania kształtu warstwy pofalowanej jednościennej tektury falistej

W celu zobrazowania typowej sytuacji, w której można zastosować tradycyjne metody optymalizacji, przedstawiono przykład zastosowania algorytmów genetycznych w poszukiwaniu kształtu warstwy pofalowanej tektury falistej. W dużym uproszczeniu, algorytmy genetyczne (GA) są jednym z najbardziej popularnych rodzajów algorytmów metaheurystycznych, które wykorzystują zasadę selekcji naturalnej, jaką można obserwować w przyrodzie. W tym przykładzie GA użyto do określenia kształtu flutingu na obrazach, poprzez wykorzystanie odpowiednio zdefiniowanej funkcji celu, która określa jak dobrze dany kształt na obrazie dopasowany jest do modelu matematycznego. W tym przypadku założono, że fluting przyjmuje kształt przybliżony do funkcji sinus, którą możemy zapisać:

$$f(h, P, b) = \frac{h}{2} \sin\left(2\pi \frac{x+b}{P}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- $h$  – wysokość fali,
- $P$  – okres fali,
- $b$  – przesunięcie fazowe fali

Problem dopasowania funkcji sinus do kształtu flutingu tektury falistej został rozwiązany w pracy autorstwa M. Rogalki i współautorów [19]. Algorytmy genetyczne zostały tam wykorzystane w celu znalezienia zestawu 3 parametrów modelu, tak aby zminimalizować różnicę między rzeczywistym kształtem flutingu na obrazie a funkcją opisującą matematycznie ten kształt. Rysunek 1 przedstawia zarówno obraz flutingu wykonany za pomocą urządzenia zaprojektowanego na potrzeby tego badania w firmie FEMAT [20] (a) oraz dopasowany przez GA kształt funkcji (b).

### An example of using traditional optimization methods based on genetic algorithms to search for the shape of the corrugated layer of single-walled corrugated board

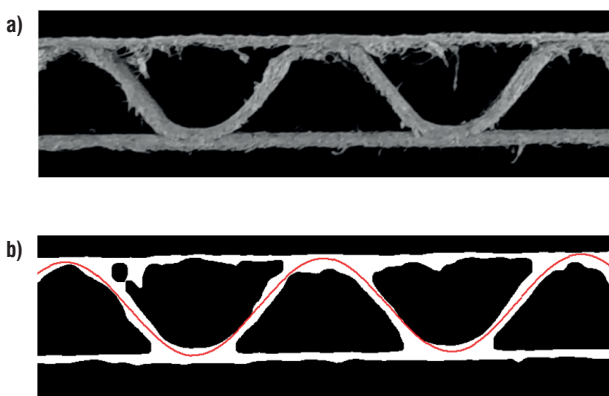
In order to illustrate a typical situation in which traditional optimization methods can be used, an example of the use of genetic algorithms in searching for the shape of a corrugated cardboard layer is presented below. Simply put, genetic algorithms are one of the most popular types of metaheuristic algorithms that use the principle of natural selection that can be observed in nature. In this example, they were used to determine the shape of fluting in images by using a properly defined objective function, which determines how well a given shape in the image fits the mathematical model. In this case, it was assumed that fluting always approximates the sine function, which we can save:

$$f(h, P, b) = \frac{h}{2} \sin\left(2\pi \frac{x+b}{P}\right)$$

where:

- $h$  – wave height,
- $P$  – wave period,
- $b$  – wave phase shift

The problem of matching the sine function to the fluting shape of corrugated board was solved in the paper by M. Rogalka and co-authors [19]. Genetic algorithms (GA) were used there to find a set of 3 model parameters in order to minimize the difference between the actual shape of the fluting in the image and the function describing this shape mathematically. Figure 1 shows both the fluting image made with the device designed for this study at FEMAT [20] (a) and the function shape adjusted by GA (b).



Rys. 1. Przykład zastosowania GA w procesie dopasowania kształtu na obrazie: (a) rzeczywiste zdjęcie tektury falistej; (b) zdigitalizowane zdjęcie tektury falistej wraz z dopasowaną krzywą

Fig. 1. An example of using GA in the shape matching process in an image: (a) a real photo of a corrugated board; (b) a digitized photo of the corrugated board with the fitted curve



## Wykorzystanie AI w optymalizacji procesu produkcji tektury falistej

W powyższym przykładzie pokazano typowy problem, który można rozwiązać metodami tradycyjnymi. Niestety przeprowadzenie optymalizacji procesu produkcji tektury falistej nie jest możliwe metodą tradycyjną, ponieważ model wirtualny (tzw. cyfrowy bliźniak) jest bardzo skomplikowany i nawet gdyby komuś udało się zebrać kompletny zestaw wszystkich parametrów procesu i dane dotyczące materiałów wsadowych, to znalezienie wzoru matematycznego opisującego ich wzajemne relacje jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Modelowanie procesu wytwarzania tektury falistej powinno zacząć się od przeanalizowania procesu produkcji papieru, który stanowi podstawowy surowiec do produkcji tektury. Wykorzystywana w procesie produkcji papieru masa celulozowa jest rozdrabniana i poddana procesom chemicznym, a następnie formowana na sitach przez prasowanie i suszenie. Powoduje to, że materiał ten jest silnie heterogeniczny, być może o różnej gęstości i wilgotności na szerokości wstęgi. W procesie produkcji tektury falistej, który w dużym skrócie polega na klejeniu dwóch lub więcej warstw papieru (linerów) z warstwą falistą papieru pomiędzy nimi, falista warstwa jest wytwarzana przez przepuszczanie papieru między rolkami z różnymi falami. Tak więc na potrzeby modelowania procesu wytwarzania tektury mamy do dyspozycji: zestaw parametrów mechanicznych każdej warstwy papieru, parametry kleju oraz parametry geometryczne warstwy pofalowanej.

Niestety nie jest to jeszcze pełna lista niezbędnych parametrów. W celu dokładnego modelowania procesu produkcji tektury falistej, poza już wymienionymi parametrami papieru, kleju i geometrii flutingu, należy również uwzględnić parametry technologiczne samego procesu, takie jak prędkość przepływu papieru, wilgotność, temperaturę, ciśnienie i wiele innych. Do modelowania procesu produkcji można wykorzystać różne narzędzia, takie jak symulacje numeryczne, modele matematyczne, a także metody sztucznej inteligencji. Zaprezentowane wcześniej równanie (1), opisujące kształt warstwy pofalowanej, jest przykładem modelu matematycznego z zaledwie trzema stopniami swobody (parametrami) i obrazuje, że próba budowy modelu z 20 czy 30 parametrami wraz z określeniem ich skomplikowanych (nie znanych a priori) wzajemnych relacji jest nie lada wyzwaniem. Dlatego w tym przypadku próba hybrydowego modelowania numerycznego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji wydaje się najlepszym rozwiązaniem.

Zatem zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji pozwala nie tylko ustalić nieznaną relację między parametrami, ale też może pomóc uzupełnić brakujące dane na podstawie wyuczonych relacji. Jednakże uczenie sieci neuronowych to proces bardzo pracochłonny i wymagający ogromnej ilości danych uczących. Ponadto optymalizacja procesu produkcji tektury ma prowadzić m.in. do

## The use of AI in the optimization of the corrugated board production process

The example above shows a typical problem that can be solved by traditional methods. Unfortunately, it is not possible to optimize the corrugated board production process using the traditional method, because the virtual model (the so-called digital twin) is very complicated and even if someone managed to collect a complete set of all process parameters and data on input materials, finding a mathematical formula describing their mutual relationship is very difficult or even impossible.

Modeling of the corrugated board production process should start with analyzing the paper production process, which is the basic raw material for the production of cardboard. In the paper production process, cellulose is used, which is crushed and subjected to chemical processes. Then, the pulp is formed on screens by pressing and drying. This makes the material highly heterogeneous, possibly with different densities and moisture content across the width of the web. In the production of corrugated board, which in a nutshell consists in gluing two or more layers of paper (liners) with a layer of corrugated paper in between, where the corrugated paper layer is produced by passing the paper between rollers with different waves. Thus, for the purposes of modeling the cardboard manufacturing process, we have at our disposal: a set of mechanical parameters of each layer of paper, parameters of the adhesive and geometric parameters of the corrugated layer.

Unfortunately, this is not yet a complete list of necessary parameters. In order to accurately model the corrugated board production process, in addition to the already mentioned parameters of paper, glue and fluting geometry, it is also necessary to take into account the technological parameters of the process itself, such as paper flow speed, humidity, temperature, pressure and many others. As already briefly discussed in the previous section, various tools can be used to model the production process, such as numerical simulations, mathematical models, as well as artificial intelligence methods. The equation describing the shape of the corrugated layer presented in the previous section, which is an example of a mathematical model with only three degrees of freedom (parameters), shows that an attempt to build a model with 20 or 30 parameters along with defining their complicated (not known a priori) mutual relationships is quite a challenge. Therefore, in this case, an attempt at hybrid numerical modeling with the use of artificial intelligence seems to be the best solution.

Thus, the use of artificial intelligence algorithms will not only help to determine unknown relationships between parameters, but will also help to fill in the missing data based on learned relationships. However, training neural networks is a very laborious process and requires a huge amount of training data. In addition,





minimalizacji zużycia energii i minimalizacji powstawania wad produkcyjnych, ale też do maksymalizacji cech wytrzymałościowych i użytkowych tektury falistej. Optymalizacja właściwości mechanicznych tektury falistej nie może być przeprowadzona w oderwaniu od informacji o jej docelowym zastosowaniu w produkcji opakowań. Wynika to z faktu, że tektura do opakowań niskich, bez otworów i perforacji powinna charakteryzować się zupełnie innymi cechami niż tektura do opakowań wysokich i wiotkich, z otworami czy perforacjami. Dodatkowo tektura poddana różnym procesom przetwórczym będzie ulegała pewnym charakterystycznym zmianom. Najważniejsze z punktu widzenia modelowania procesów jest zatem dążenie do sytuacji, w której zaproponowany model nie tylko zawiera wszystkie parametry, ale jeszcze charakteryzuje się możliwie wysoką wrażliwością na ich zmiany. Jeżeli celem będzie maksymalizacja nośności opakowania o pewnej geometrii, to w pierwszej kolejności należy określić, które technologie przetwórcze wpływają (i w jakim stopniu) na parametry tektury. Tak więc model numeryczny opakowania powinien charakteryzować się wysoką wrażliwością na wybrane cechy/parametry wytrzymałościowe tektury. To z kolei buduje konieczność uwzględnienia w modelu cyfrowym tektury wpływu procesów przetwórczych na wybrane cechy tektury. Zatem model tektury opisany pewnymi, mierzalnymi cechami powinien być wrażliwy nie tylko na: procesy produkcyjne obserwowane na tekturnicy, parametry papierów i parametry geometrii warstw pofalowanych, ale też na procesy przetwórcze, przez które będzie przechodzić tektura w trakcie produkcji opakowania.

### Podsumowanie

Wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI) w optymalizacji procesu produkcji tektury falistej może przynieść wiele korzyści: zwiększenie wydajności produkcji, poprawę jakości produktu oraz obniżenie kosztów. Sztuczną inteligencję można wykorzystywać do analizy danych z różnych źródeł, takich jak czujniki urządzeń produkcyjnych oraz poziomy poszczególnych ustawień parametrów produkcyjnych w celu identyfikacji wzorców i optymalizacji samego procesu produkcyjnego.

Jednym z przykładów wykorzystania sztucznej inteligencji w produkcji tektury falistej mogą być algorytmy uczenia maszynowego, które analizują dane z czujników na sprzęcie produkcyjnym, aby przewidzieć awarie sprzętu, zanim one wystąpią. Analizując zużycie podzespołów na podstawie monitorowania jego charakterystyki pracy, można zaplanować konserwację w celu zminimalizowania przestojów i zmniejszenia strat produkcyjnych.

Innym przykładem jest wykorzystanie sztucznej inteligencji do optymalizacji ilości kleju, prędkości czy też temperatury poszczególnych segmentów stosowanych w produkcji tektury falistej. Sztuczną inteligencję można wykorzystać np. do analizy

optymalizacji procesu produkcji tektury falistej, aby osiągnąć, między innymi, minimalizację zużycia energii, minimalizację powstania wad produkcyjnych, ale także maksymalizację siły i cech funkcjonalnych tektury falistej. Optymalizacja właściwości mechanicznych tektury falistej nie może być przeprowadzona w oderwaniu od informacji o jej docelowym zastosowaniu w produkcji opakowań. Wynika to z faktu, że tektura do opakowań niskich, bez otworów i perforacji powinna charakteryzować się zupełnie innymi cechami niż tektura do opakowań wysokich i wiotkich, z otworami czy perforacjami. Dodatkowo tektura poddana różnym procesom przetwórczym będzie ulegała pewnym charakterystycznym zmianom. Najważniejsze z punktu widzenia modelowania procesów jest zatem dążenie do sytuacji, w której zaproponowany model nie tylko zawiera wszystkie parametry, ale jeszcze charakteryzuje się możliwie wysoką wrażliwością na ich zmiany. Jeżeli celem będzie maksymalizacja nośności opakowania o pewnej geometrii, to w pierwszej kolejności należy określić, które technologie przetwórcze wpływają (i w jakim stopniu) na parametry tektury. Tak więc model numeryczny opakowania powinien charakteryzować się wysoką wrażliwością na wybrane cechy/parametry wytrzymałościowe tektury. To z kolei buduje konieczność uwzględnienia w modelu cyfrowym tektury wpływu procesów przetwórczych na wybrane cechy tektury. Zatem model tektury opisany pewnymi, mierzalnymi cechami powinien być wrażliwy nie tylko na: procesy produkcyjne obserwowane na tekturnicy, parametry papierów i parametry geometrii warstw pofalowanych, ale też na procesy przetwórcze, przez które będzie przechodzić tektura w trakcie produkcji opakowania.

### Conclusions

The use of artificial intelligence (AI) in the optimization of the corrugated board production process can therefore bring a number of benefits, such as increasing production efficiency, improving product quality and reducing costs. Artificial intelligence can be used to analyze data from various sources, such as sensors of production equipment and levels of individual production parameter settings to identify patterns and optimize the production process itself.

One example of the use of artificial intelligence in the production of corrugated board could also be machine learning algorithms that analyze data from sensors on production equipment to predict equipment failures before they occur. By analyzing component wear based on monitoring its operating characteristics, maintenance can be scheduled to minimize downtime and reduce production losses.

Another example is the use of artificial intelligence to optimize, for example, the amount of glue, speed or temperature of



właściwości kleju i jego reakcji na materiał z tektury falistej w celu określenia optymalnej receptury kleju i jednocześnie minimalizacji powstawania wad produktu. Może to w oczywisty sposób prowadzić do poprawy jakości produktu i zmniejszenia ilości reklamacji.

Zasadniczo, wykorzystanie sztucznej inteligencji w optymalizacji produkcji tektury falistej może prowadzić do znacznej poprawy wydajności, jakości i redukcji kosztów.

Artykuł recenzowany

individual segments used in the production of corrugated board. Artificial intelligence can be used, for example, to analyze the properties of the adhesive and its reaction to the corrugated board material in order to determine the optimal adhesive recipe and at the same time minimize the formation of product defects. This can obviously lead to improved product quality and fewer complaints. Overall, the use of AI to optimize corrugated board production can lead to significant improvements in efficiency, quality and cost reductions.

## LITERATURA/LITERATURE

- [1] Garbowski T. 2022. "Digitization of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (12) : 683-686. DOI: 10.15199/54.2022.12.2.
- [2] Garbowski T. 2022. "Optimal corrugated board – what does it mean?". *Przegląd Papierniczy* 78 (9) : 517-524. DOI: 10.15199/54.2022.9.1.
- [3] Garbowski T. 2022. "Influence of initial imperfections on edge crush resistance of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (6) : 337-341. DOI: 10.15199/54.2022.6.1.
- [4] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "From paper to corrugated board – modeling the edge crush test". *Przegląd Papierniczy* 78 (5) : 271-277. DOI: 10.15199/54.2022.5.1.
- [5] Garbowski T., Andrzejak K. 2022. "Relationship between SCT of paper and ECT of single-wall corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 78 (4) : 210-216. DOI: 10.15199/54.2022.4.1.
- [6] Andrzejak K., Garbowski T. 2021. "The influence of analog and digital printing on the strength parameters of corrugated board". *Przegląd Papierniczy* 77 (11) : 593-599. DOI: 10.15199/54.2021.11.1.
- [7] Garbowski T., Gajewski T. 2020. "Transverse shear modulus in corrugated materials". *Przegląd Papierniczy* 76 (2) : 103-108. DOI: 10.15199/54.2020.2.1.
- [8] Garbowski T., Niziałek-Łukawska M., Kuca M. 2019. „Analytical verification of popular McKee's formula". *Przegląd Papierniczy* 75 (12) : 767-773. DOI: 10.15199/54.2019.12.2.
- [9] 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". *Przegląd Papierniczy* 74 (9) : 577-585. DOI: 10.15199/54.2018.9.2.
- [10] 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". *Przegląd Papierniczy* 74 (8) : 435-440. DOI: 10.15199/54.2018.7.1.
- [11] 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". *Przegląd Papierniczy* 74 (6) : 381-388. DOI: 10.15199/54.2018.6.1.
- [12] Garbowski T., Przybyszewski G. 2015. "Sensitivity Analysis of Critical Force in Box Compression Test". *Przegląd Papierniczy* 71 (5) : 275-280. DOI: 10.15199/54.2015.5.1.
- [13] Garbowski T., Imbierowicz R. 2014. "Sensitivity Analysis of Edge Crush Test". *Przegląd Papierniczy* 70 (9) : 559-564.
- [14] Garbowski T., Borysiewicz A. 2014. "Stability of Corrugated Board Packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (8) : 452-458.
- [15] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 2. Numerical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (7) : 390-394.
- [16] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Homogenization of Corrugated Paperboard. Part 1. Analytical homogenization". *Przegląd Papierniczy* 70 (6) : 345-349.
- [17] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 2. Experimental tests and numerical analysis of paperboard packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (5) : 277-281.
- [18] Garbowski T., Jarmuszcak M. 2014. "Numerical Strength Estimate of Corrugated Board Packages. Part 1. Theoretical Assumptions in Numerical Modeling of Paperboard Packages". *Przegląd Papierniczy* 70 (4) : 219-222.
- [19] Rogalka M., Grabski J.K., Garbowski T. 2023. „ Identification of Geometric Features of the Corrugated Board Using Images and Genetic Algorithm". Preprints.org 2023, 2023051301. <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1301.v1>
- [20] [www.fematsystems.pl](http://www.fematsystems.pl)