

Identyfikacja uszkodzeń w procesie wiercenia CFRP/sklejki na podstawie analizy obrazu

Damage identification in CFRP/plywood laminate drilling based on digital image processing

Joanna Zielińska-Szwajka^{a,*}, ORCID: 0000-0002-6212-2666

Krzysztof Szwajka^b, ORCID: 0000-0002-1038-1148

^aPolitechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Zakład Wytwarzania Komponentów i Organizacji Produkcji, ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola, Polska

^bPolitechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Zakład Zintegrowanych Systemów Projektowania i Tribologii, ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola, Polska

*Osoba do korespondencji: j.zielinska@prz.edu.pl

Streszczenie

W ostatnich latach hybrydowe struktury wykonane z tworzyw sztucznych wzmacnianych włóknem węglowym (CFRP) przyciągnęły wiele uwagi w wielu gałęziach przemysłu. W przeciwieństwie do hybrydowych kompozytów metal/włókno węglowe, brakuje badań nad laminatami składającymi się z CFRP i materiałów drewnopochodnych. Zadziory i rozwarstwienia powstające podczas wiercenia są głównymi wadami CFRP i kompozytów drewnopochodnych. Ta ostatnia kombinacja materiałów jest szeroko stosowana w obszarach, które korzystają z uzyskanych właściwości tych materiałów, tj. wytrzymałości i lekkości, w szczególności jako materiał konstrukcyjny do produkcji elementów wykończeniowych kamperów i jachtów. Opracowano metodę wizyjną do rozpoznawania i oceny zadziorów i rozwarstwień powstających podczas wiercenia w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi-Sugeno-Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. W badaniu tym obrazy cyfrowe i wybrane miary sygnału siły osiowej, momentu skrawania w dziedzinie czasu zostały przyjęte jako dane wejściowe do modelu rozmytego. Proponowaną metodę zweryfikowano za pomocą pełnych eksperymentów wiercenia w elementach kompozytowych CFRP/na bazie drewna i porównano z pomiarem ręcznym obsługiwanym przez konwencjonalną metodę przetwarzania obrazu. Wyniki porównania wskazują, że istnieje duża zgodność między proponowaną metodą, a ręczną metodą pomiaru.

Abstract

Hybrid structures made of carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) find many applications due to their favorable properties (high strength with low weight). In contrast to hybrid metal-based CFRP laminates, there is a lack of research on hybrid laminates consisting of CFRP and plywood. Spallings and delamination of holes are the main disadvantages when drilling CFRP and wood-based composites. The CFRP/plywood hybrid laminates are widely used in areas that benefit from the obtained properties of these materials, that is, high strength and low density, in particular as a structural material for the production of finishing components of lightweight structures. In this study, a vision-based method for recognizing and evaluating burrs and delamination generated during drilling was developed based on threshold segmentation methods and using fuzzy Takagi-Sugeno-Kang (TSK) subtractive clustering. Digital images and selected time-domain measures of cutting torque and thrust force and they were adopted as input parameters in the TSK model. The proposed method was verified by full drilling experiments on CFRP/wood-based composite samples and the results were compared based on images of the holes obtained with a stroboscopic microscope. A good agreement was found between the results of manual measurement method and developed TSK-based model.

Słowa kluczowe: wiercenie, wyrwania, vision system, Yolov8n, fuzzy logic

Keywords: drilling, spallings, vision system, Yolov8n, fuzzy logic

Wprowadzenie

Kompozyty drewnopochodne są szeroko stosowane w meblarstwie, przemyśle samochodowym i jachtowym ze względu na ich lepsze właściwości w porównaniu do drewna (Ramage, M. H., et al., 2017; Li., W., et al., 2020; Szwajka, K., et al., 2024). Są one często stosowane w rozwiązaniach konstrukcyjnych jako materiały alternatywne dla litego drewna, ponieważ wykazują lepszą stabilność wymiarową i trwałość (Li., W., et al., 2020; Li., Y., et al., 2019; Xu, J., et al., 2022). Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocnione włóknami węglowymi, zaliczane do grupy CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Plastics) są interesującą grupą materiałów inżynierskich (Zhang, X., et al., 2023; Szwajka, K., et al., 2023). W przypadku wyrobów z CFRP proces wiercenia stanowi niezbędny etap produkcji mechanicznej podczas procesu montażu (Szwajka, K., et al., 2024; Y., et al., 2019). Kompozyty CFRP mają tendencję do generowania pewnych defektów (w tym zadziorów i rozwarstwień) ze względu na naturę włókna węglowego i laminowanej struktury (Xu, J., et al., 2022; Cao, S., et al., 2023). Wiele eksperymentów wykazało, że defekty te znacznie zmniejszają wytrzymałość i odporność na zmęczenie materiałów CFRP, co nie tylko negatywnie wpływa na użyteczność produktów CFRP, ale także wpływa niekorzystnie na proces dalszego montażu (Wang, X., et al., 2023; Weng, J., et al., 2023). Stąd też niniejsze badania kładą nacisk na rozpoznawanie zadziorów i rozwarstwień CFRP powstałych

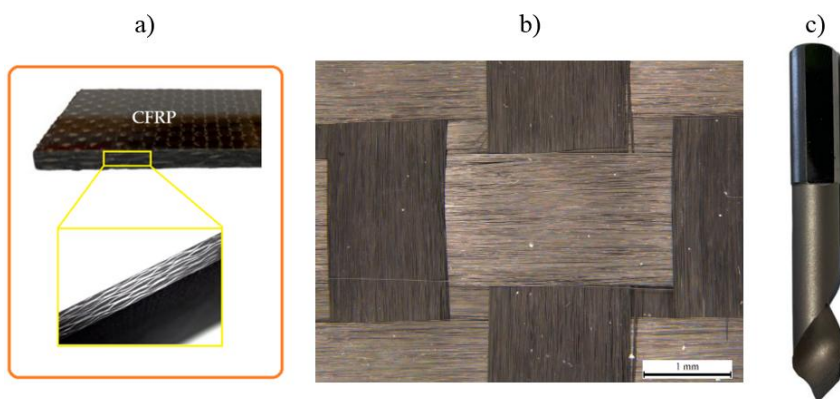
w procesie wiercenia. Chociaż dostępnych jest wiele metod pomiaru defektów wywołanych wierceniem, wciąż trudno je odtworzyć ze względu na małą skuteczność opracowanych do tego celu algorytmów (Zhang, X., et al., 2023).

Cel i zakres pracy

Głównym celem tych badań jest przedstawienie nowej metody rozpoznawania zadziorów i rozwarstwień powstałych w procesie wierceniem w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi-Sugeno-Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. Proponowana metoda została zweryfikowana poprzez eksperymentalne próby wiercenia.

Materiały i metodyka badań

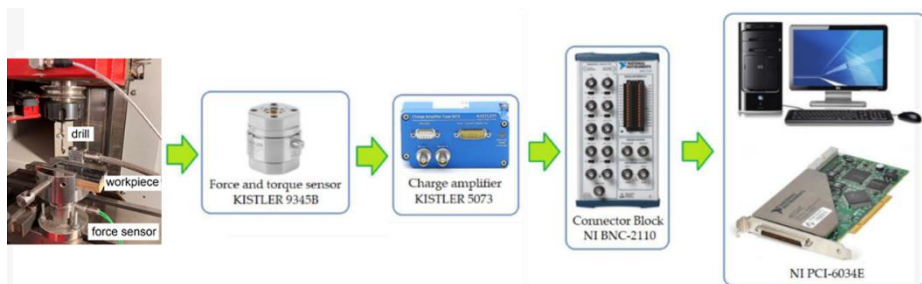
W badaniach zastosowano płytę sklejkową o grubości 9 mm oraz płytę CFRP o grubości 3 mm. Płyta CFRP została przyklejona jednostronnie do zewnętrznej powierzchni sklejki. Do badań w procesie wiercenia użyto próbki o wymiarach 120 mm × 30 mm × 12 mm. Do testów zastosowano typowe narzędzie skrawające, wiertło jednoostrzowe o średnicy 5 mm z ostrzami z polikrystalicznego diamentu (PCD) firmy Leitz Diamaster PRO (Rys. 1).



Rys. 1. a) płyta CFRP, b) włókno węglowe, c) wiertło
Fig. 1. a) CFRP plate, b) plain-weave carbon fabric run and c) single-edge drill

Proces wiercenia przeprowadzono na pionowej frezarce CNC. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego oraz systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rysunku 2. W testach wiercenia rejestrowano wartości siły posuwowej (F_f) i momentu skrawania (M_c) podczas obróbki. Wywiercono trzy otwory (z tym samym zestawem parametrów skrawania) w płycie CFRP/sklejka o wymiarach 130 mm × 30 mm × 18 mm na frezarce CNC. Wartość siły posuwowej i momentu skrawania mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego Kistler 9345B2. Sygnały z czujnika rejestrowano na dysku komputera osobistego (PC) za pomocą 16-bitowej karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E o częstotliwości próbkowania 50 Hz (Rys. 2). W badaniach zdjęcia powierzchni wokół wywierconych otworów wykonywano za pomocą

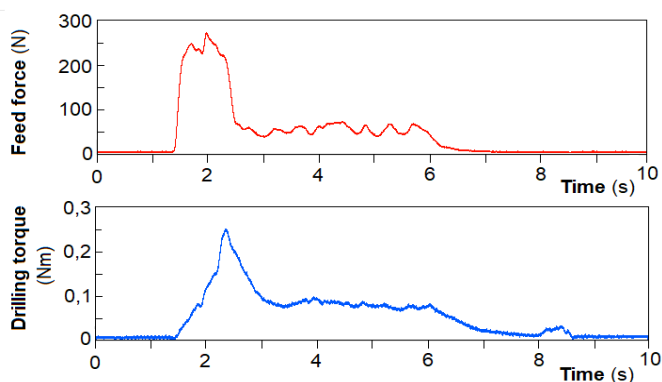
mikroskopu stereoskopowego posiadającego optykę apochromatyczną z układem FusionOptics i TripleBeam.



Rys. 2. Konfiguracja eksperymentalna i schemat systemu akwizycji danych
Fig. 2. Experimental setup and diagram of the data acquisition system

Wyniki badań

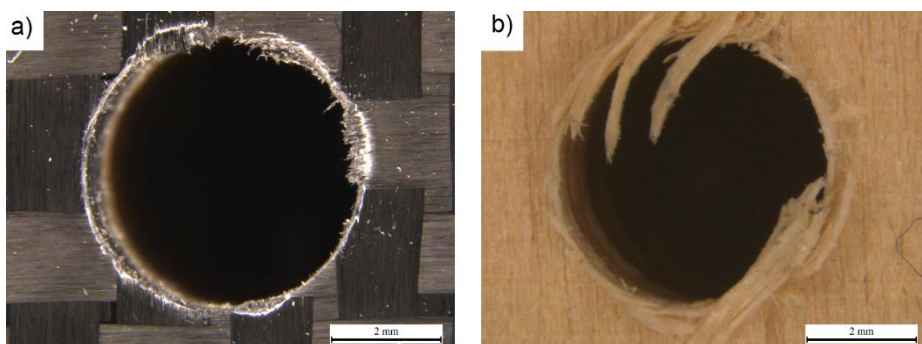
Zauważono, że podczas wiercenia można wyodrębnić charakterystyczne fragmenty sygnału siły posuwowej (F_f) i momentu skrawania (M_c) (Rys. 3). Pierwszy fragment to obszar, w którym wiertło wchodzi w materiał obrabianego przedmiotu; w związku z tym siła posuwowa i moment skrawania wzrasta. Następnie wiertło zaczyna skrawać warstwę materiału o największej gęstości (CFRP). Gdy wiertło opuszcza obszar materiału o zwiększonej gęstości, zarówno siła, jak i moment maleje co do wartości. Następnie występuje fragment sygnału, w którym wiertło penetruje na głębokość warstwy tworzące sklejkę. Powoduje to fluktuację wartości siły posuwowej i momentu skrawania.



Rys. 3. Zmiany siły posuwu i sygnału momentu skrawania
Fig. 3. Variation of feed force and cutting torque signals

Analiza wyrwań w procesie wiercenia CFRP jest kluczowa ze względu na specyfikę tego materiału. CFRP charakteryzuje się anizotropową strukturą, co sprawia, że wiercenie w nim jest bardziej skomplikowane niż w materiałach izotropowych, takich jak metale. Wyrwania, czyli uszkodzenia struktury materiału wokół otworu, mogą znacząco obniżyć jego

wytrzymałość i funkcjonalność. Jedną z głównych przyczyn powstawania wyrwań są nadmierne siły skrawania, co prowadzi do rozwarstwienia materiału. Stosowanie odpowiednich metod analizy i optymalizacja parametrów wiercenia pozwala na minimalizację uszkodzeń i uzyskanie otworów o wysokiej jakości. Wykonywanie i analiza zdjęć otworów w CFRP jest kluczowym elementem zapewnienia wysokiej jakości i integralności strukturalnej elementów kompozytowych. Stosowanie odpowiednich technik i narzędzi pozwala na dokładną ocenę uszkodzeń i optymalizację procesu wiercenia. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe zdjęcia wywierconych otworów, które posłużyły do dalszej analizy.

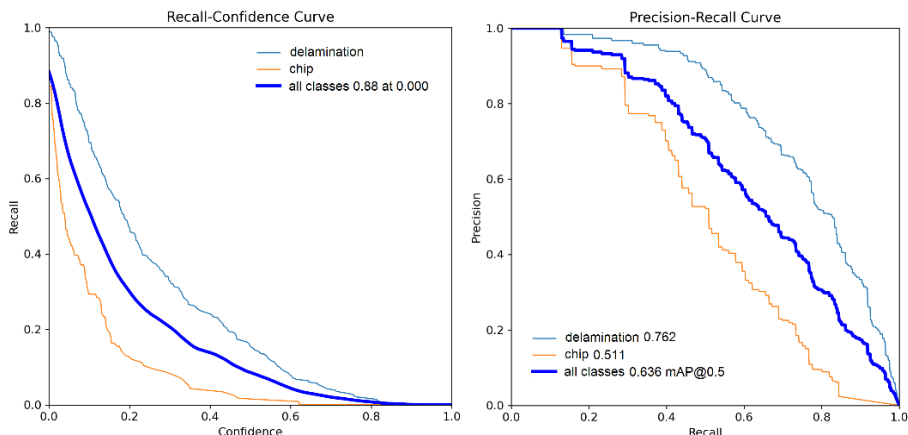


Rys. 4. Zdjęcie otworu: a) CFRP (wejście), b) sklejka (wyjście)

Fig. 4. Images of holes in CFRP/plywood composite plate on the side of a) CFRP plate (entry side) and b) plywood plate (exit side)

W przeprowadzonych badaniach zastosowano dwie nadzorowane metody uczenia maszynowego: YOLOv8n i metodę wnioskowania rozmytego Takagi-Sugeno-Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną, aby ocenić ich skuteczność w wykrywaniu niezgodnej jakości otworów. Zestaw danych składał się z 72 poprawnych i 28 niezgodnych otworów. Z sygnału siły posuwowej i momentu skrawania wyodrębniono cechy pozwalające na wykrywanie aktualnego położenia wiertła w trakcie obróbki, co umożliwiło identyfikację aktualnego położenia wiertła w obszarze płyty sklejki lub CFRP. Ponadto z sygnałów siły posuwowej i momentu skrawania wyznaczono miary w dziedzinie czasu, które posłużyły jako wejścia do logiki rozmytej. Siedemdziesiąt pięć procent danych wykorzystano do treningu, a pozostałe 25% zarezerwowano do testowania. Do pierwszej analizy zastosowano Sieć YOLOv8n, jest to model detekcji obiektów w czasie rzeczywistym, będący najmniejszym i najszybszym wariantem z rodziny YOLOv8. Architektura YOLOv8n składa się z trzech głównych części: Backbone: służy do ekstrakcji cech z obrazu wejściowego; Neck: łączy cechy z różnych warstw "backbone" w celu poprawy dokładności detekcji obiektów o różnych rozmiarach; Head: odpowiada za ostateczną predykcję klasy i lokalizacji obiektów na obrazie. Aby ocenić wydajność modelu YOLOv8n w zakresie wykrywania i rozpoznawania wad otworów zastosowano dwie metryki: Recall i Average Precision (mAP) w celu oceny wydajności modelu (Rys. 5). Recall mierzy, jak dobrze model identyfikuje wszystkie rzeczywiste

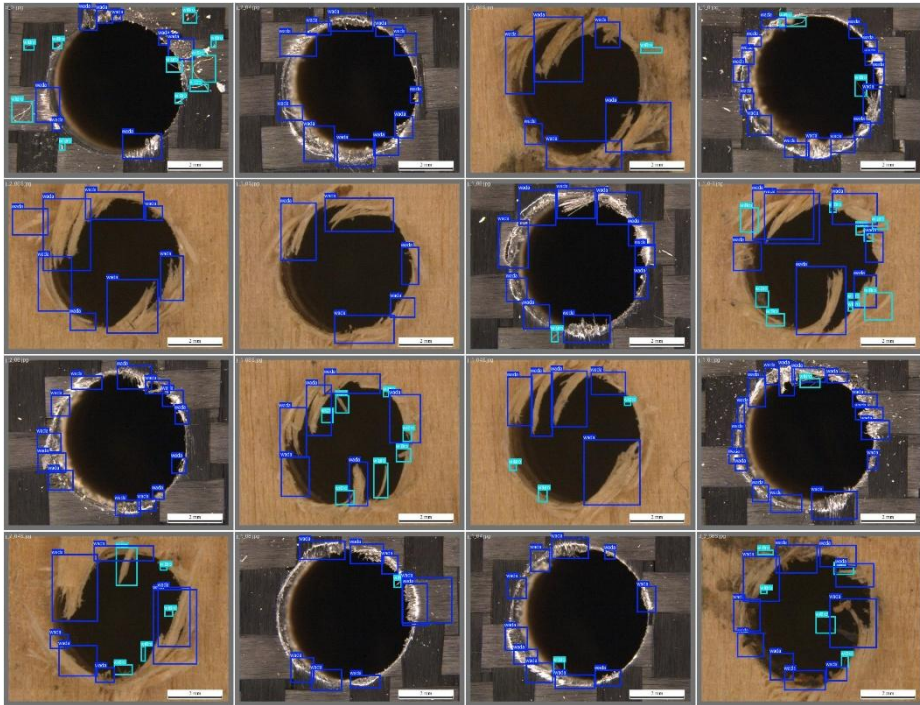
pozytywne przypadki. W analizie uzyskano dokładność 88%. Average Precision (mAP) odzwierciedla dokładność modelu i reprezentuje średnią dokładność wszystkich stanów wykrytych przez model. W analizowanym przypadku wynosi 63.3% przy progu przecięcia 0.5.



Rys. 5. Recall i Average Precision (mAP) dla modelu YOLOv8n

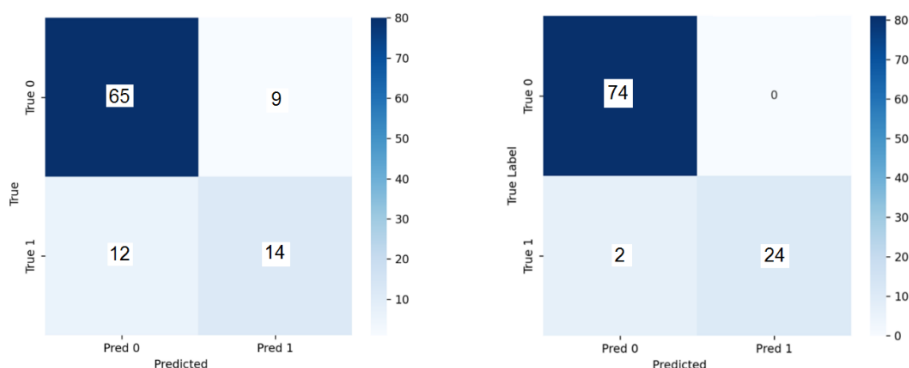
Fig. 5. Recall and mAP curves for YOLOv8n model

Model Takagi-Sugeno-Kang (TSK) to rodzaj systemu wnioskowania rozmytego, który służy do modelowania i sterowania złożonymi, nieliniowymi systemami. Jedną z metod optymalizacji parametrów modelu rozmytego są metody klastrowania. Wykorzystują one fakt, że automatyczne wykrywanie pewnych grup punktów pomiarowych i charakterystycznych wzorców zachowania systemu można przedstawić za pomocą jednej reguły lub ich spójnego zbioru. Metoda potencjału subtraktywnego zastosowana w tym artykule zakłada, że środkiem klastra może być tylko element zbioru punktów pomiarowych. Metoda została szczegółowo opisana w pracy (Szwajka, K., et al., 2023). Centra klastrów wyznaczone metodą potencjału subtraktywnego mogą być wykorzystane do budowy reguł wnioskowania rozmytego dla różnych algorytmów sztucznej inteligencji. W szczególności mogą być wykorzystane do budowy modeli, które przewidują zachowanie różnych typów złożonych systemów w czasie. Identyfikacja systemu przy użyciu klasteryzacji obejmuje tworzenie klastrów w przestrzeni danych i tłumaczenie tych klastrów na reguły TSK tak, aby uzyskany model był podobny do zidentyfikowanego systemu. Rysunek 6 przedstawia wyniki procesu rozpoznawania defektów obserwowane po stronie wejścia i wyjścia otworu. Wyniki te uzyskano przy użyciu modelu YOLOv8n + TSK.



Rys. 6. Lokalizacja defektów wokół otworu
Fig. 6. Location of defects around the hole

Macierz pomyłek to prosta tabela, która pokazuje, jak dobrze działa model klasyfikacji, porównując jego przewidywania z rzeczywistymi wynikami. Dzieli przewidywania na cztery kategorie: prawidłowe przewidywania dla obu klas (prawdziwe pozytywy i prawdziwe negatywy) oraz nieprawidłowe przewidywania (fałszywe pozytywy i fałszywe negatywy). Pomaga to zrozumieć, gdzie model popełnia błędy, dzięki czemu można go ulepszyć. Macierz wyświetla liczbę przewidywań wygenerowanych przez model na danych testowych. Macierz pomyłek (Rys. 7) pomaga zobaczyć, jak dobrze działa model, pokazując prawidłowe i nieprawidłowe przewidywania. Pomaga również obliczyć kluczowe miary, takie jak: dokładność, precyzja i odwołanie.



Rys. 7. Macierz pomyłek dla wyników otrzymanych przy zastosowaniu modelu YOLOv8n (po prawej) oraz modelu YOLOv8n z wnioskowaniem rozmytym Takagi-Sugeno-Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną (po lewej).

Fig. 7. Confusion matrix for the results obtained using the YOLOv8n model (right) and the YOLOv8n + TSK-based fuzzy inference model with subtractive clustering (left)

Metryki wydajności są niezbędne do oceny skuteczności algorytmów wykrywania obiektów. Metryki te dostarczają informacji na temat tego, jak dobrze model wykrywa i lokalizuje obiekty na obrazach. Precyzja (P) opisuje odsetek wykrytych obiektów, które są rzeczywiście pożądaną klasą, podczas gdy odwołanie (R) wskazuje odsetek rzeczywistych obiektów wykrywanych przez model. Idealny model miałby zarówno precyzję, jak i odwołanie zbliżające się do 100%. Kluczowe metryki wyliczone na podstawie macierzy dla obu przypadków przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Metryki oceny

Table 1. Evaluation Metrics

Model	P%	R%
YOLOv8n	61	54
YOLOv8n+TSK	100	92

Wnioski

Zaproponowana nowa metoda rozpoznawania defektów, łącząca segmentację progową, model detekcji YOLOv8n oraz system wnioskowania rozmytego Takagi-Sugeno-Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną, okazała się znacząco skuteczniejsza niż sam model YOLOv8n. Zastosowanie logiki rozmytej TSK pozwoliło na wykorzystanie miar z dziedziny czasu (pochodzących z sygnałów siły posuwowej F_t i momentu skrawania M_c) jako dodatkowych wejść do modelu, co przyczyniło się do wykrywania nieprawidłowości.

Po mikroskopowej analizie zdjęć przypisano etykiety na podstawie obserwacji współczynnika rozwarstwienia. YOLOv8n osiągnęło wyniki gorszy w stosunku do model połączenia YOLOv8n i rozmytego modelu Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Precyzja (P) modelu YOLOv8n wynosi 61%, podczas gdy odwołanie (R) wynosi 54%. Natomiast precyzja modelu YOLOv8n+TSK wynosi 100%, podczas gdy odwołanie (R) wynosi 92%.

Wyniki te dowodzą, że integracja detekcji wizualnej (YOLOv8n) z modelowaniem behawioralnym opartym na rozmytych systemach (TSK) znacząco zwiększa dokładność i niezawodność w wykrywaniu niezgodnej jakości otworów.

Literatura

Ramage, M. H., et al., 2017. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 333-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

Li, W., Zhang, Z., Zhou, G., Leng, W., Mei, C., 2020: Understanding the interaction between bonding strength and strain distribution of plywood. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 98, 102506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102506>

de la Cruz-Carrera, R., Carrillo-Parra, A., Prieto-Ruiz, J.Á., Fuentes-Talavera, F.J., Ruiz-Aquino, F., Goche-Télles, J. R., 2024: Modulus of Elasticity in Plywood Boards: Comparison between a Destructive and a Nondestructive Method. *Forests* 15(9), 1596. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15091596>

Szwajka, K., Zielińska-Szwajka, J., Trzepieciński, T., 2024: Experimental Analysis of Smart Drilling for the Furniture Industry in the Era of Industry 4.0. *Materials* 17(9), 2033. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092033>

Li, Y., Zhang, T., Jiang, B., Zhao, L., Liu, H., Zhang, J., Fan, J., Guo, Z., Huang, Y., 2019: Interfacially reinforced carbon fiber silicone resin via constructing functional nano-structural silver. *Composites Science and Technology* 181, 107689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107689>

Xu, J., Yin, Y., Paulo Davim, J., Li, L., Ji, M., Geier, N., Chen, M., 2022: A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites. *Composite Structures* 294, 115594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115594>

Cao, S., Li, H. N., Tan, G., Wu, C., Huang, W., Zhou, Q., Hu, Z., 2023: Bi-directional drilling of CFRPs: from principle to delamination suppression. *Composites, Part B* 248, 110385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110385>

Wang, X., Wang, F., Jin, X., Fu, R., Shi, Y., 2022: Numerical prediction of the chip formation and damage response in CFRP cutting with a novel strain rate based material model. *Composite Structures* 294, 115746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115746>

Weng, J., Saelzer, J., Berger, S., Zhuang, K., Bagherzadeh, A., Budak, E., Biermann, D., 2023: Analytical and experimental investigations of rake face temperature considering temperature-dependent thermal properties. *Journal of Materials Processing Technology* 314, 117905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117905>

Arhamnamazi, S., Aymerich, F., Buonadonna, P., Mehtedi, M. E., 2021: Assessment of drilling-induced delamination and tool wear in carbon fibre reinforced laminates. *Polymers and Polymer Composites* 29, 729-740. DOI: <https://doi.org/10.1177/09673911211023057>

Zhang, X., Huang, W., Wu, C., Cao, S., 2023: Defect measurement in CFRP drilling based on digital image processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 127, 5405-5419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11838-8>

Szwajka, K., Zielińska-Szwajka, J., Trzepieciński, T., 2023: The Use of a Radial Basis Function Neural Network and Fuzzy Modelling in the Assessment of Surface Roughness in the MDF Milling Process. *Materials* 16, 5292. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155292>

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 12.05.2025

Opublikowany online / Published online: 19.12.2025