

Zastosowanie fotografii elektronooptycznej do analizy jakości krawędzi cięcia kompozytu węglowo-epoksydowego

Grzegorz Szala¹, Piotr Szewczykowski², Paweł Bukowski^{3*}

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: gszala@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: piotr.szewczykowski@utp.edu.pl

³ Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 w Bydgoszczy, ul. Szubińska 107, 85-915 Bydgoszcz, Polska; e-mail: paw_buk@wp.pl

* Autor korespondencyjny: paw_buk@wp.pl

Streszczenie: Opisane w pracy badania przeprowadzono w celu określenia wpływu metod cięcia na jakość uzyskanych krawędzi dla kompozytu złożonego z tkaniny węglowej przesączonej żywicą epoksydową – materiału stosowanego w projektowaniu i budowie elementów oraz maszyn oraz wskazanie odpowiednich metod cięcia tegoż materiału kompozytowego wykorzystywanego na poszycia bezzałogowych obiektów latających, jednostek pływających, krocących oraz podwodnych itp. Kompozyty węglowe znajdują zastosowanie we wcześniej wspomnianych maszynach przede wszystkim ze względu na większą wytrzymałość w porównaniu z metalami oraz mniejszą masę. Jakość krawędzi ma duże znaczenie w połączeniach elementów poszycia ww. obiektów, szczególnie w połączeniach czołowych. Wysoka jakość i dokładność krawędzi cięcia mają wpływ na jakość połączenia poszczególnych sekcji poszycia maszyn i urządzeń, co powoduje płynny i bez zaburzeń przepływ powietrza lub wody w zależności od warunków eksploatacji.

Słowa kluczowe: metody cięcia, kompozyt, CFRP, uszkodzenie krawędzi

Use of electronooptic photography for the analysis of the cutting edge of a carbon-epoxy composite

Grzegorz Szala¹, Piotr Szewczykowski², Paweł Bukowski^{3*}

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: gszala@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: piotr.szewczykowski@utp.edu.pl

³ Military Aviation Company no. 2 in Bydgoszcz, ul. Szubińska 107, 85-915 Bydgoszcz, Poland; e-mail: paw_buk@wp.pl

* Correspondent author: e-mail: paw_buk@wp.pl

Summary: The purpose of the study is to determine the impact of cutting methods on the quality of edges obtained for a composite composed of carbon fabric filtered

with epoxy resin – a material used in the design and construction of components and machines, and to indicate the appropriate cutting methods for the same composite material used for the sheathing of unmanned flying objects, vessels, rolling and underwater objects, etc.. Carbon composites are used in the aforementioned machines primarily because of their higher strength compared to metals and their lower weight. Edge quality is of paramount importance in the joints of the elements of the sheathing of the above-called objects, especially in front connections. The high quality and accuracy of the cutting edges affects the connection quality of the individual sections of the machine and equipment sheathing, resulting in smooth and smooth air or water flow depending on operating conditions.

Key words: cutting methods, composite, CFRP, edge damage

1. Wstęp

Kompozyty węglowe wykorzystuje się coraz częściej. Ich zastosowanie jest często związane z zaawansowaną technologią. Kompozyty te używane są w różnych sektorach gospodarki, w tym: wojskowych, w lotnictwie (balistyce, samolotach pasażerskich i wojskowych, rakietach, dronach), w sporcie, w sprzęcie rekreacyjnym (rowerach, rakietach tenisowych, łodziach rybackich i luksusowych jachtach), w elementach nadwozi samochodów [13].

Kompozyty to grupa materiałów składających się z co najmniej dwóch elementów o różnych właściwościach, z których jeden jest klejem odpowiedzialnym za spójność i elastyczność, podczas gdy drugi materiał jest tak zwanym elementem strukturalnym zapewniającym właściwości wytrzymałościowe [9].

Kompozyty można podzielić na następujące grupy: laminaty, kompozyty strukturalne, mikrokompozyty i nanokompozyty. Indywidualne właściwości każdej z tych grup określają wydajność ich obróbki [1, 17].

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV), jednostki pływające, kroczące oraz podwodne, często określane jako drony, dynamicznie rozwijają się jako część przemysłu lotniczego czy zbrojeniowego. Obiekty latające są coraz częściej wykorzystywane do celów wojskowych, w medycynie, monitorowaniu i w innych dziedzinach. Niezależnie od obszaru zastosowania z im lżejszych i sztywniejszych materiałów są one wykonane, tym większe obciążenia mogą przenosić, co oznacza, że mogą transportować więcej broni, towarów, czujników lub urządzeń pomiarowych. Dlatego w konstrukcji UAV – oprócz elementów drukowanych 3D – najczęściej stosuje się materiały kompozytowe, których bazę stanowią żywe polimerowe. Precyzja cięcia poszczególnych elementów i krawędzi ma bezpośredni wpływ na wytrzymałość połączeń, a następnie na strukturę platformy. Frezowanie, cięcie wiązką laserową i strumieniem wody ze ścierniwem to technologie stosowane do cięcia tego typu materiałów [1, 10, 17, 24].

W zależności od przyjętej technologii i rodzaju materiału można zaobserwować różne poziomy rozwarstwienia lub uszkodzenia powierzchni.

W pracy wskazano najlepsze metody cięcia, mające wpływ na jakość krawędzi elementów konstrukcyjnych, która znacząco oddziałuje na niezawodność eksploatacyjną i bezpieczeństwo użytkowe konstrukcji UAV. Testy te mają kluczowe znaczenie dla wytrzymałości konstrukcji, która zależy w znacznym stopniu od jakości spajanych krawędzi. W pracy przedstawiono porównanie trzech rodzajów cięcia maszynowego dla kompozytu węglowego stosowanego w budowie bezzałogowych statków powietrznych. Odnośnie do krawędzi materiałów użytych do budowy całych powłok obiektów latających muszą być spełnione liczne kryteria, takie jak właściwe dopasowanie, które wpływa na aerodynamikę [11].

Oprócz kryteriów konstrukcyjnych i wytrzymałościowych obowiązują także określone warunki obróbki materiałów powlekających, umożliwiające klejenie bez zmian siły i aerodynamiki. Dokładność i jakość krawędzi, niezależnie od materiału, muszą być zgodne z przyjętymi normami. Jednocześnie krawędzie muszą gwarantować wytrzymałość i sztywność konstrukcji przy zachowaniu optymalnej aerodynamiki [21].

Biorąc pod uwagę właściwości różnych kompozytów, które określają wybór technologii cięcia, trzeba zapoznać się z ogólnymi problemami związanymi z daną procedurą cięcia. Najczęściej stosowane technologie cięcia obejmują:

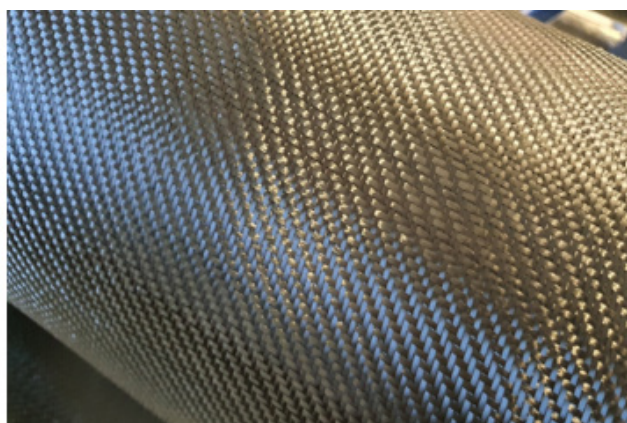
- cięcie mechaniczne,
- ściernie cięcie strumieniem wody,
- cięcie wiązką laserową.

Wybór odpowiednich technologii obróbki zależy nie tylko od grubości kompozytów i oczekiwanej szybkości obróbki, lecz także od struktury i właściwości fizycznych przetwarzanego materiału. Rozwarstwienie laminatu i zmniejszenie odporności na ob. ciążenie zmęczeniowe w obrobionych węzłach to typowe konsekwencje niewłaściwie wykonywanego cięcia. Wysoka jakość produktu końcowego ma szczególne znaczenie w takich branżach, jak lotnictwo i medycyna, w których jakość i precyzja krawędzi mogą mieć kluczowe znaczenie dla zdrowia, a nawet życia człowieka. Jakość krawędzi odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu produktowi końcowemu odpowiedniej wytrzymałości i niezawodności, które decydują o bezpieczeństwie całej konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie dla materiałów kompozytowych stosowanych w komponentach statku lub statku powietrznego, takich jak: kadłuby, skrzydła, ogony i ramy [3].

Poniżej znajduje się krótki opis technologii obróbek stosowanych w celu zapewnienia kompozytom odpowiednich cech geometrycznych [4, 22].

2. Kompozyty testowe i instrumentarium badawcze

Materiałem użytym do testów była kompozycja wykonana z tkaniny z włókna węglowego (CFRP) (rys. 1) nasyczonego żywicą epoksydową MGS L285/H285 $g = 2,0$ mm grubości.



SGL SIGRATEX
CW80-PL1/1

gramature: 80 g/m²
wrap: 67 tex
weft: 67 tex
weave: straight 1/1

Rys. 1. Tkanina wykonana z włókna węglowego (CFRP) [opracowanie własne]

Fig. 1. Fabric made of carbon fiber (CFRP) [own study]

Narzędzia stosowane do obróbki kompozytów powinny mieć specjalną konstrukcję pod względem geometrii i rodzaju materiału i powłoki ostrza. Frezy do obróbki kompozytów mają przeciwstawne ostrza i są przeznaczone do obróbki włóknistych elementów kompozytowych.

Cięcie badanych kompozytów przeprowadzono za pomocą frezu EMUGE-FRANKEN 2748F.001, średnica frezu $\varnothing 1$ mm, głębokość frezowania wynosiła 1 mm, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min, prędkość posuwu $v_F = 0,96$ m/min. W przypadku cięcia strumieniowo-ściernego zadano ciśnienie wody 3800 bar i prędkość posuwu $v_F = 0,64$ m/min. Z kolei do cięcia wiązką laserową przyjęto moc 60 W. Operacja cięcia laserowego została przerwana, gdy pojawiły się przypalenia.

3. Wyniki badań i analiza

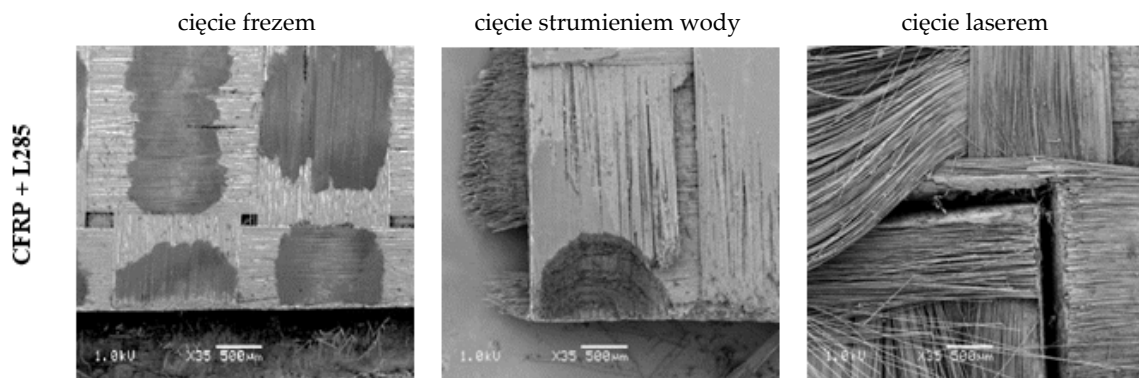
Obrazy krawędzi po obróbce frezem, cięciu strumieniem wody i cięciu laserowym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Matryca wyników badań do cięcia płyt kompozytowych za pomocą następujących metod obróbki: frezowania, ściernego cięcia strumieniem wody, cięcia wiązką laserową; w skali makro [opracowanie własne]

Fig. 2. Test results matrix for cutting composite panels by processing methods: milling, abrasive water jet cutting, laser beam cutting; on a macro scale [own study]

Porównanie obrazów mikrofraktograficznych krawędzi cięcia kompozytu węglowego wykonanych z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego (SEM) zaprezentowano na rysunku 3.

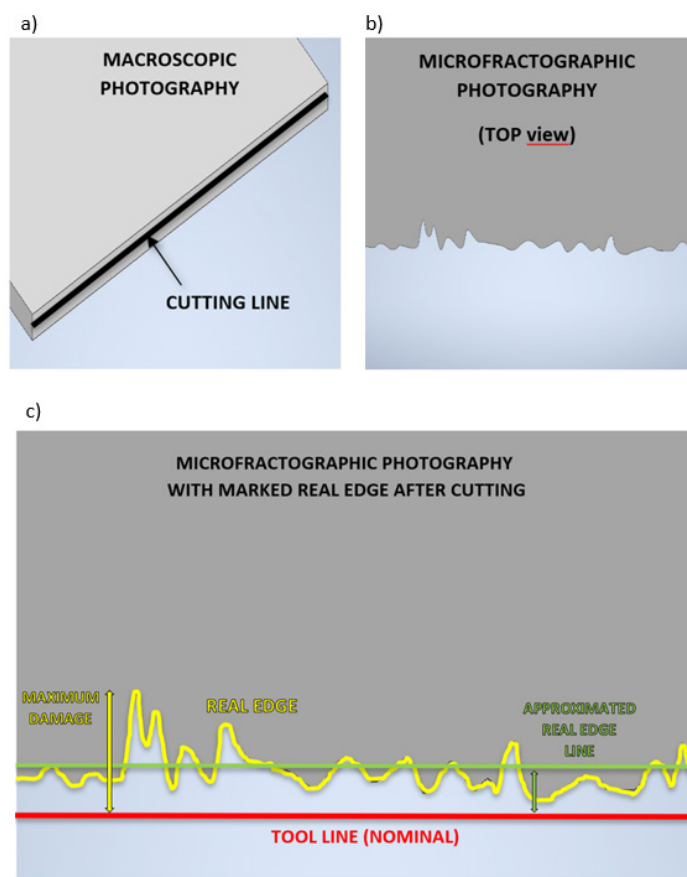


Rys. 3. Porównanie obrazów elektrooptycznych z testu cięcia płyt węglowych za pomocą następujących metod obróbki: frezowania, cięcia strumieniowo-ściernego, cięcia wiązką laserową; powiększenie 35 razy [opracowanie własne]

Fig. 3. Comparison of electrooptical images from the test of cutting carbon plates by processing method: milling, abrasive blasting, laser beam cutting; magnification 35 times [own study]

3.1. Analiza obrazów mikrofraktograficznych

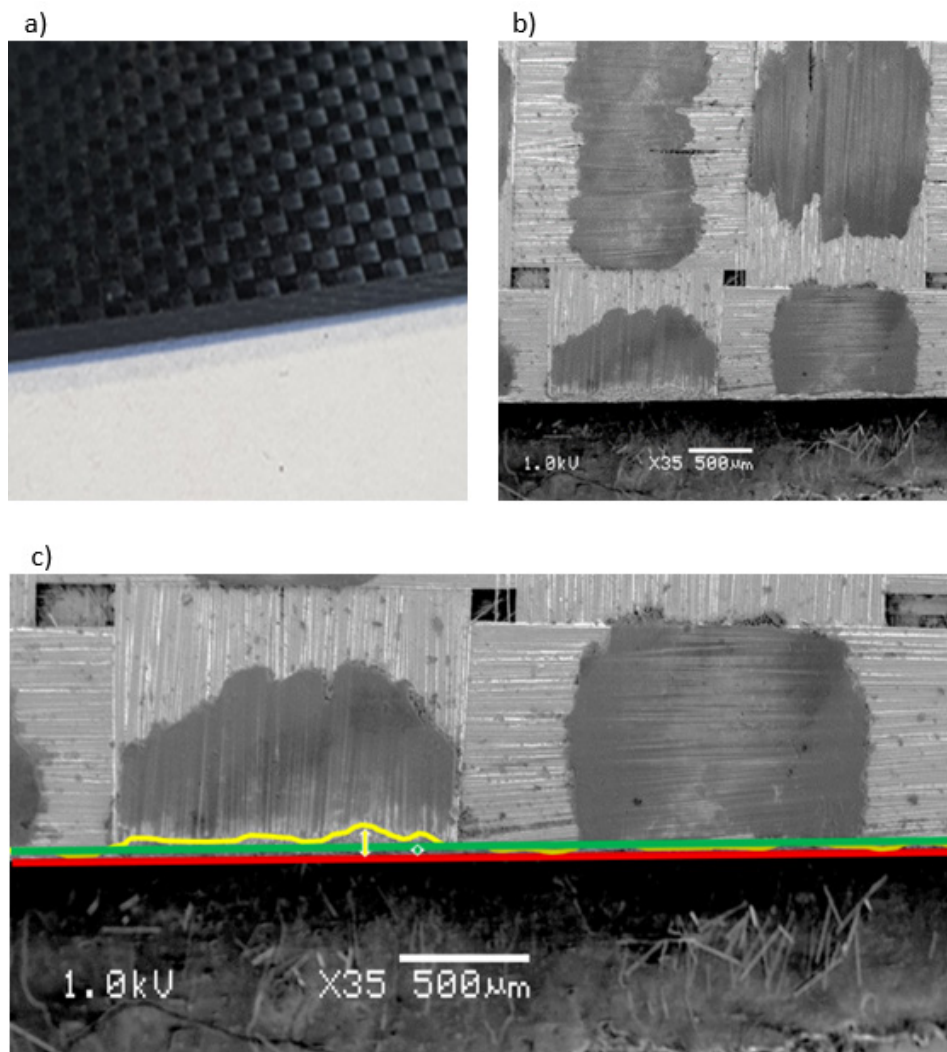
Na rysunku 4 przedstawiono graficzny schemat przyjętej metodologii badań: pozycja a) – obraz makroskopowy wykonany klasycznym aparatem cyfrowym, pozycja b) – 35-krotnie powiększony obraz wykonany za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL 5600, pozycja c) – obraz taki sam jak w b) – powiększony, aby umożliwić rysowanie charakterystycznych linii i pomiary. Na rysunkach 5–7 zaprezentowano – odpowiednio do rysunku 4 – obrazy cięcia z przeprowadzonych eksperymentów. Czerwone linie reprezentują linie nominalne – ustawienie narzędzia skrawającego. Żółte linie reprezentują rzeczywiste krawędzie po cięciu; wykazują uszkodzenie krawędzi w wyniku oderwania, łuszczenie się itp. Zielone linie reprezentują przybliżenie żółtych linii, zredukowane do linii prostej (średnia linia dla rzeczywistego konturu). Długości pomiarowe – w związku z ograniczonym polem pomiarowym mikroskopu – są równe dla wszystkich przypadków. Po wstępnej analizie obrazów ustalono ten wymiar na 2000 μm .



Rys. 4. Schemat metodologii badań: a) makroskopowa fotografia próbki;
 b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi: * czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego; * żółta – rzeczywista krawędź po cięciu;
 * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

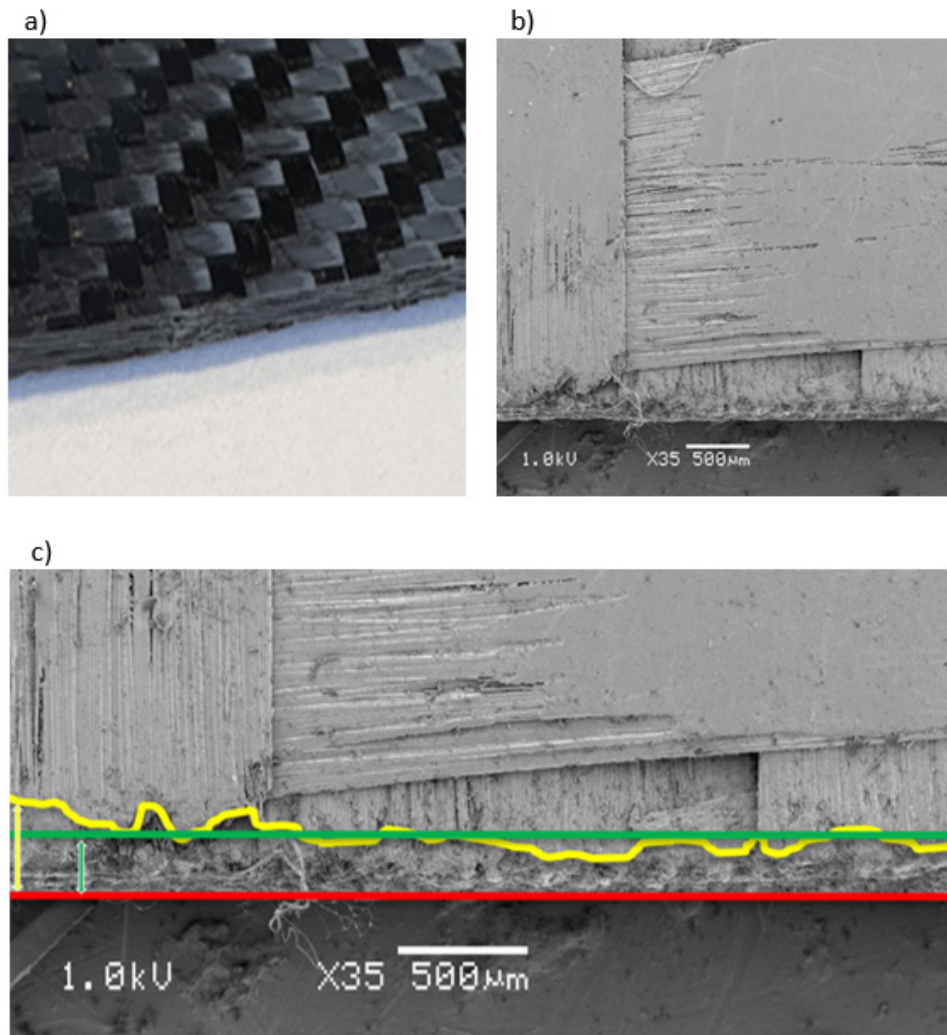
Fig. 4. Diagram of the research methodology: a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked: * red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]

Zastosowanie fotografii elektrooptycznej do analizy jakości krawędzi cięcia kompozytu węglowo-epoksydowego



Rys. 5. Fotografia i pomiary dla cięcia kompozytu CFRP + L285 z zastosowaniem metody frezowania: a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
* czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
* żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

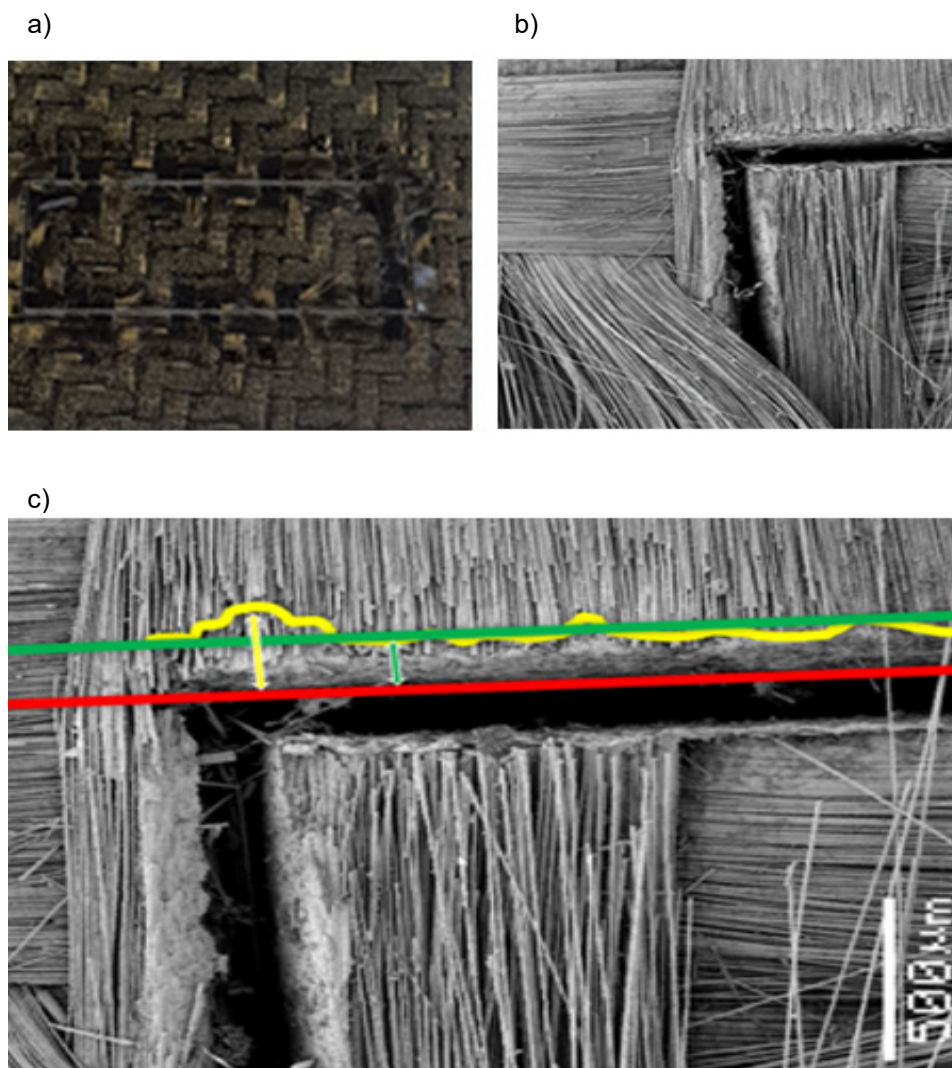
Fig. 5. Photographs and measurements for cutting the CFRP + L285 composite using the milling method: a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
* red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]



Rys. 6. Fotografia i pomiary dla cięcia kompozytów CFRP + L285 ciętych strumieniem wody ze ścierniwem: a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna; c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
* czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
* żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

Fig. 6. Photography and measurements for cutting CFRP + L285 composites cut with abrasive water jet: a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography; c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
* red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]

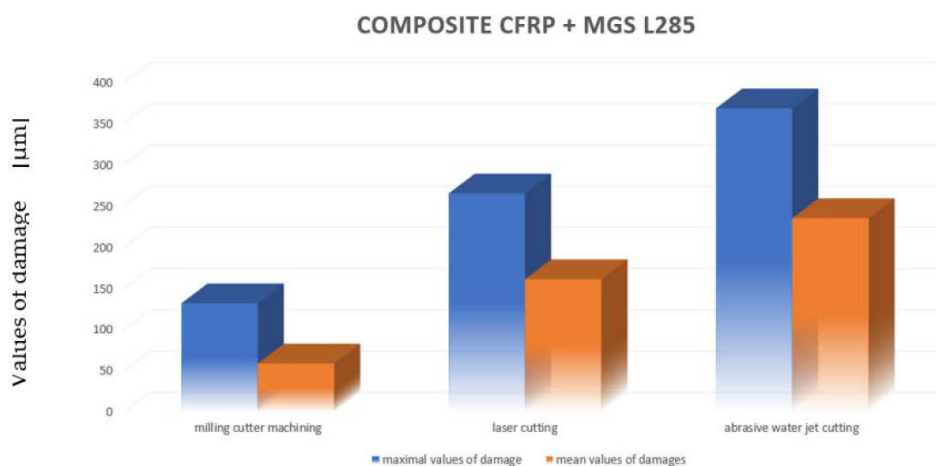
Zastosowanie fotografii elektroooptycznej do analizy jakości krawędzi cięcia kompozytu węglowo-epoksydowego



Rys. 7. Fotografia i pomiary kompozytowe CFRP + L285 kompozytowe cięte wiązką laserową:
a) makroskopowa fotografia próbki; b) fotografia mikrofraktograficzna;
c) powiększona fotografia mikrofraktograficzna z charakterystycznymi liniami oznaczonymi:
* czerwona – linia nominalna reprezentująca ustawienie narzędzia skrawającego;
* żółta – rzeczywista krawędź po cięciu; * zielona – linia średnia nierówności po zredukowaniu do linii prostej [opracowanie własne]

Fig. 7. Composite photography and measurements CFRP + L285 composite laser beam cut:
a) macroscopic photography of the sample; b) microfractive photography;
c) enlarged microfractographic photograph with characteristic lines marked:
* red – nominal line representing the setting of the cutting tool; * yellow – the actual edge after cutting; * green – mean line of inequality reduced to a straight line [own study]

Na rysunku 8 przedstawiono wyznaczone w eksperymentach wartości uszkodzeń w postaci wykresu słupkowego (kolor niebieski) oraz średnie wartości uszkodzeń (pomarańczowy) dla kompozytu węglowego i metod jego cięcia.



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów dla maksymalnych uszkodzeń i średniej wartości uszkodzeń na odcinku pomiarowym dla kompozytu CFRP+L285 w zależności od metody cięcia [opracowanie własne]

Fig. 8. Comparison of the measurement results for the maximum damage and the average damage value on the measuring section for the CFRP + L285 composite depending on the cutting method [own study]

Na powyższym wykresie zestawiono wyniki pomiarów dla konkretnej metody cięcia stosowanej do frezowania kompozytów węglowych. Najniższą wartość maksymalnych uszkodzeń stwierdzono w przypadku obróbki frezem (132 µm), najwyższą – dla obróbki strumieniem wodno-ściernym (368 µm), podczas gdy pomiary średniej wartości uszkodzeń były również najniższe dla obróbki frezem (59 µm), prawie 3 razy bardziej korzystne niż w przypadku obróbki strumieniem wodno-ściernym (161 µm). Najwyższą średnią uszkodzeń odnotowano dla cięcia strumieniem wodno-ściernym (235 µm), była to zatem najmniej korzystna metoda cięcia.

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły ocenić wpływ danej metody cięcia na powierzchnię kompozytu po obróbce, która nie jest bez znaczenia dla produktu końcowego zarówno pod względem wyglądu, jak i wytrzymałości.

Na podstawie wyników badań i analizy wyżej omawianych przypadków można stwierdzić, że nie ma uniwersalnej metody do cięcia kompozytu. Wybór metody zależy od wielu zmiennych, takich jak typ kompozytu, jego zastosowanie, parametry obróbki itp. Frezowanie okazało się najlepszą z analizowanych metodą obróbki. Przy założeniu odpowiedniej jakości laminatu (wystarczające nasycenie żywicy – ręczne laminowanie i czynnik ludzki mają znaczący wpływ na jakość kompozytu), miało ono najmniejszy wpływ zarówno na krawędź skrawającą, jak i rozwarstwienie kompozytowe. Jednak strumień wody pod ciśnieniem spowodował lokalne rozwarstwienie kompozytu CFRP, zwłaszcza w miejscach przebicia.

Testy cięcia wiązką laserową zakończyły się zostały niepowodzeniem. Było to najprawdopodobniej spowodowane zbyt niską mocą lasera. Materiału nie udało się wyciąć, a powierzchnia preparatu została uszkodzona.

Bibliografia

- [1] Ashby, M.F., Jones, P.R., „Materiały inżynierskie. T. 2”, WNT, Warszawa 1996.
- [2] Azmi, I., Lin, R.J.T., Bhattacharyya, D., „Badanie obrabialności kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem szklanym podczas frezowania końcowego”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 64(2013), 247–261, doi: 10.1007/s00170-012-4006-6.
- [3] Bayraktar, S., Turgut, Y., „Badanie sił cięcia i chropowatości powierzchni w frezowaniu polimerowego materiału kompozytowego wzmocnionego włóknem węglowym”, *Materiali in tehnologije/Materiały i technologie* 50(4),(2016), 591–600.
- [4] Burek, J., Lisowicz, J., Rydzak, T., Szajna, A., „Problemy kształtowania ubytkowego materiału kompozytowych”, *RUTMech XXXIV* 89(4/17),(2017), 435–447.
- [5] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK 17-1F. Tom 1: Polimer Matrix Kompozyty. Wytyczne do charakterystyki materiałów konstrukcyjnych”, 2002.
- [6] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK 2F. Tom 2: Polimer Matrix Kompozyty. Właściwości materiałowe”, 2002.
- [7] „Departament Obrony Podręcznik. Kompozytowe Materiały Podręcznik, MIL-HDBK-3F. Tom 3: Polimer Matrix Kompozyty. Wykorzystanie materiału, Projektowanie i analiza”, 2002.
- [8] Geier, N., „Wpływ orientacji włókien na siłę cięcia w frezowaniu w górę i w dół kompozytów UD-CFRP”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 111(2020), 881–893, doi: 10.1007/s00170-020-06163-3.
- [9] German, J., „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2001.
- [10] Hyla, I., „Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978.
- [11] Irving, P.E., Soutis, C. (red.), „Kompozyty polimerowe w przemyśle lotniczym” (“Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering”), Elsevier, 2020.
- [12] Józwik, J., Tofil, A., Banaszek, M., Kuric, I., „Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów i oceny chropowatości powierzchni”, *Postępy Nauki i Techniki* 15(2012), 205–220.
- [13] Królikowski, W., „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [14] Lasri, L., Nouari, M., Mansori, M.E., „Odporność na zużycie i indukowane uszkodzenia skrawania elementów aeronautycznych FRP uzyskane w wyniku obróbki”, *Wear* 271(2011), 2542–2548.
- [15] Liu, X., Mu, C., Wang, J., Yuan, K., „Metoda monitorowania stanu obrabiarki obrabiać maszyny do cięcia maszynowego. Mechanika stosowana i materiały”, *Appl. Mech. Mater.* 411–414(2013), 1610–1615, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.411-414.1610.
- [16] Oczóś, K., „Obróbka strumieniem wodno-ściernym materiałów metalowych i niemetalowych. Cz. I i II”, *Mechanik* 11(1992), 349–396.
- [17] Oczóś, K., „Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa”, *Mechanik* 81(7),(2008), 579–592.
- [18] Ozkan, D., Gok, M.S., Oge, M., Karaoglanli, A.C., „Analiza zachowania frezowania kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP)”, *Materials Today: Proceedings* 11(2019), 526–533.
- [19] „Podręcznik materiałów kompozytowych” 17(2017), www.cmh17.org.
- [20] Priyanka, P., Dixit, A., Mali, H.S., „Hybrydowe kompozyty tekstylne o wysokiej wytrzymałości z włóknami węglowymi, kevlarowymi i e-szklanymi dla konstrukcji odpornych na uderzenia”, *Mech. Compos. Mater.* 53(2017), 685–704, doi: 10.1007/s11029-017-9696-2.
- [21] Sullivan, R.W., Hwang, Y., Rais-Rohani, M., Lacy, T., „Analiza strukturalna i testowanie ultralekkiego skrzydła bezzałogowo-powietrzno-powietrznego Carbon-Composite”, *J. Aircr.* 46(3),(2009), 814–820.

- [22] Trzepieciński, T., „Wybór metody materiałów kompozytowych”, *STAL Metale & Nowe Technologie* 11–12(2018), 10–14.
- [23] Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., „Obróbka kompozytów wzmocnionych węglem i włóknem szklanym”, *Procedia CIRP* 46(2016), 63–66.
- [24] <https://www.eckert.com.pl/pl/kompendium/815,ciecie-materialow-kompozytowych-za-pomoca-maszyn-do-ciecia-cnc.html> (dostęp: 19.09.2020).
- [25] www.magazynprzemyslowy.pl, „Laserowa obróbka materiałów kompozytowych” (dostęp: 19.09.2020).