

ANALIZA WPLYWU PARAMETRÓW PROCESU WIERCENIA NA JAKOŚĆ UZYSKIWANYCH OTWORÓW I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE KOMPOZYTÓW WĘGLOWYCH

ROBERT JAŚKIEWICZ

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa
robert.jaskiewicz@ilot.edu.pl

Streszczenie

Artykuł ma na celu przeanalizowanie wpływu parametrów procesu wiercenia na jakość wykonywanych otworów, a także na ich wytrzymałość na naciski. Wykonano przegląd literaturowy na temat wiercenia w kompozytach węglowych z użyciem różnych narzędzi i parametrów procesu. Podczas badań wykonano próbę wiercenia w materiale MTM44-1, z użyciem wiertła CORODRILL 452.1-0635-044A0-C H10F o średnicy 6,35 mm, z dwiema różnymi prędkościami obrotowymi wrzeciona: 500 obr/min i 3000 obr/min. Po wierceniu mierzono temperaturę wiertła z użyciem termopary. Jakość uzyskanych otworów oceniano podczas obserwacji mikroskopowych, a następnie próbki poddano próbie odporności na naciski w teście zgodnym z normą ASTM 5961. Podczas testu zarejestrowano maksymalną siłę nośną próbki, a podczas obróbki wyników obliczono maksymalną nośność złącza. W artykule przedstawiono zestawienie uzyskanych rezultatów i przeanalizowano je pod kątem wpływu parametrów wiercenia na właściwości mechaniczne próby.

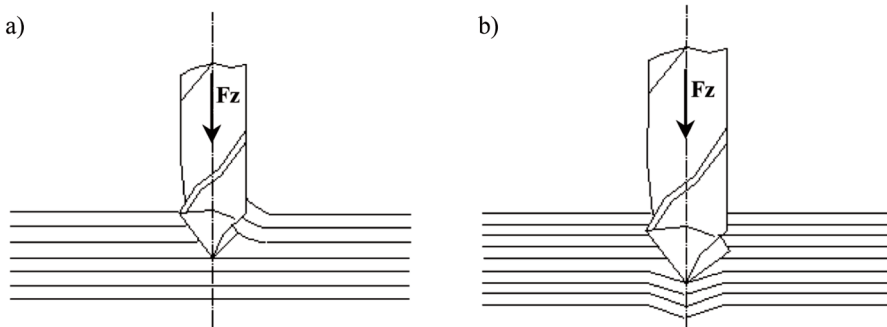
Słowa kluczowe: wiercenie w kompozytach, parametry wiercenia, kompozyty węglowe, obróbka kompozytów węglowych.

1. WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe znajdują w przemyśle i nauce coraz więcej zastosowań, a to rodzi za sobą konieczność rozwoju metod ich obróbki mechanicznej. Ze względu na swoje właściwości wytrzymałościowe i bardzo dobry ich stosunek do masy, coraz częściej używane są w lotnictwie, astronautyce i przemyśle samochodowym. Kompozyty należą do materiałów trudnoobrabialnych, ale również ta branża poczyniła w ostatnich latach duży postęp [1]. Istotnym problemem podczas obróbki kompozytów jest ich warstwowa struktura, drugim natomiast zbyt krótka żywotność narzędzi. Producenci próbują dostosować do tych warunków kształt narzędzi, materiały z których je wykonują oraz ich pokrycia. Obsługującym maszyny pozostaje ustalić odpowiednie parametry obróbki. Najważniejszym są prędkość skrawania i posuw roboczy.

Większość otworów wykonywanych w panelach kompozytowych w przemyśle to otwory montażowe [2] np. na poszyciu samolotu. Występowanie otworu zmienia rozkład naprężeń w obszarze jego występowania, dlatego też podczas kwalifikacji materiałów osobno przeprowadzane

są testy dla próbek z otworem, a osobno dla próbek nieprzewiercanych. Średnice otworów określają odpowiednie normy, ale również ich jakość powinna być właściwa, a proces wiercenia nie powinien zmienić samego kompozytu, np. w wyniku przegrzania. Najczęściej występującymi wadami jest powstająca podczas obróbki delaminacja, czyli rozwarstwienie kompozytu, oraz postrzępione krawędzie wyjścia i wejścia narzędzia. Delaminacja jest bardzo niebezpiecznym zjawiskiem, ponieważ może mieć wpływ na właściwości nośne panelu [3], a ponadto jeśli występuje pomiędzy wewnętrznymi warstwami to jest niewidoczna gołym okiem. Schemat procesu jej powstawania przedstawiono na rysunku 1. Wady tego typu są możliwe do wykrycia dodatkowymi badaniami, ale intencją producentów jest minimalizowanie liczby błędów, zarówno w procesie produkcji płyt, jak i w późniejszych etapach ich obróbki.



Rys. 1. Schemat procesu powstawania delaminacji: a) na wejściu, b) na wyjściu [4]

Parametry wiercenia dobierane są indywidualnie do posiadanych narzędzi. Coraz większa liczba producentów posiada w swoich asortymentach wiertła przeznaczone do obróbki kompozytów, ponieważ już na etapie projektowania narzędzi należy szukać rozwiązań dla występujących podczas obróbki delaminacji. Dobór narzędzi wymaga od użytkownika określenia, m.in. sposobu prowadzenia wiertła (posuw ręczny lub automatyczny), wymaganej dokładności wymiarowej i czasu przeznaczanego na wykonanie jednego otworu. Należy również zebrać informacje o obrabianym materiale: jego twardość, struktura i przewiercana grubość.

Temat oceny jakości otworów wierconych w kompozytach węglowych podjęli autorzy artykułu [4]. Ich testy były skupione na jakości otrzymywanych otworów ocenianej na podstawie współczynnika delaminacji. Wartość współczynnika delaminacji określa się na podstawie wzoru (1).

$$F_D = \frac{D_{\max}}{D} \quad (1)$$

gdzie: F_D – współczynnik delaminacji, D_{\max} – maksymalna średnica występowania delaminacji, D – średnica otworu.

W artykule [4] wykazano wyraźną zależność pomiędzy rodzajem stosowanego wiertła, prędkością obrotową wrzeczona i uzyskiwanym współczynnikiem delaminacji. Mniejsze współczynniki delaminacji uzyskiwano podczas wiercenia z użyciem wiertła do drewna niż klasycznym o kącie wierzchołkowym 118° . Dodatkowo wykazano wzrost wielkości wad wraz ze wzrostem prędkości skrawania.

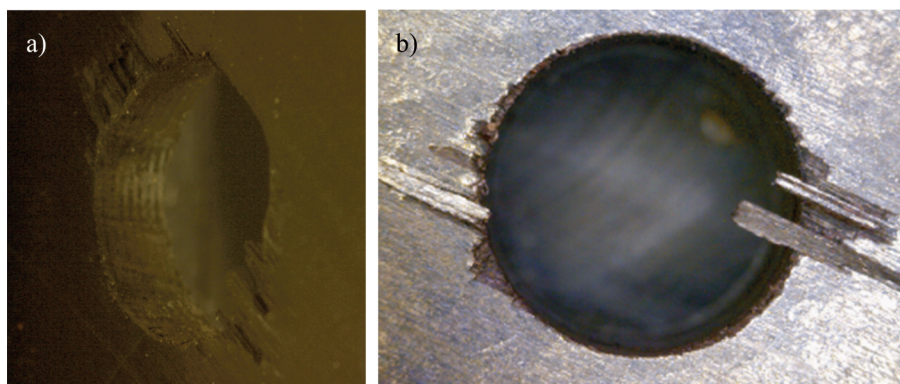
Autorzy artykułu [3] przeprowadzili badania wiercenia w próbkach kompozytowych z użyciem klasycznego wiertła z kątem wierzchołkowym 120° . W ich opracowaniu wyraźnie zaznaczony został wpływ posuwu na jakość uzyskiwanych otworów. Skanując próbki udowodniono, że dla materiału

T300/LTM45-EL zwiększenie posuwu wpływało negatywnie na rozmiar występującej delaminacji. Dodatkowo zauważono, że wielkość wady była większa od strony wyjścia wiertła z materiału.

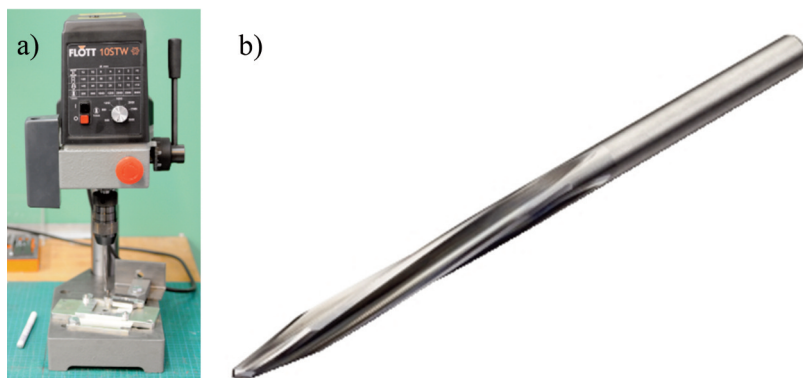
Obróbka materiałów kompozytowych wzmacnianych włóknem węglowym odbywa się na ogół bez udziału chłodziwa [6]. Jego dostarczenie mogłoby spowodować reakcje chemiczne z obrabianym materiałem. Podczas ustalania parametrów wiercenia powinno się jednak sprawdzić temperaturę procesu. Niedopuszczalnym jest jej przekroczenie temperatury zeszklenia kompozytu nawet w niewielkim obszarze, ponieważ skutkuje to zmianą struktury materiału w wyniku przemian fazowych polimeru, co powoduje diametralne zmiany własności wytrzymałościowych [7].

2. WIERCENIE PRÓBEK DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

W ramach badań próby doboru parametrów przeprowadzano na próbkach z preimpregnatu tkaninowego MTM44-1/EHTA40(6k)-2x2T-284-40%RW. Partie próbek przygotowywane na potrzeby badań wytrzymałościowych na ogół obejmują 6 ÷ 10 sztuk, więc w ich obróbce czas odgrywa mniejszą rolę od jakości i powtarzalności procesu. Do określenia zakresu badań wykonano próby wiercenia z prędkościami 500 obr/min i 3000 obr/min, nie uzyskując zadowalającej jakości. Na brzegach otworów występowały delaminacje, nieakceptowalne dla planowanych badań wytrzymałościowych. Przykład błędnie wykonanych otworów przedstawiono na rysunku 2.



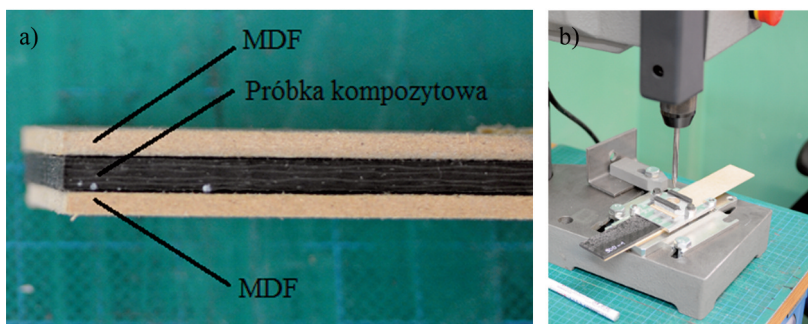
Rys. 2. Otwory z delaminacjami: a) z wyrwanymi włóknami [materiały własne], b) z niedociętymi włóknami [7]



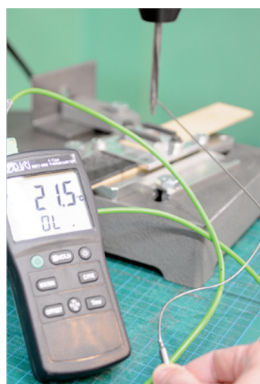
Rys. 3. Osprzęt użyty do wiercenia: a) wiertarka Flott TB10STW [materiały własne] b) wiertło CORODRILL 452.1-0635-044A0-C [9]

Do testów użyto wiertarki Flott TB10STW Electronic (rys. 3a) o zakresie obrotów wrzeciona: 500 ÷ 3000 obr/min, z ręcznym posuwem, wyposażonej w wiertło CORODRILL 452.1-0635-044A0-C H10F o średnicy 6,35 mm (rys. 3b).

Ostatecznie próbki przewiercono stosując przekładki – dodatkowe warstwy z MDF (*medium-density fibreboard*). Jedną zabezpieczającą wejście materiału nakładaną od góry, drugą chroniącą krawędź wyjścia z próbki od dołu. To wyeliminowało różnice jakościowe wykonywanych otworów, które mogłyby zaburzyć dalsze badania wytrzymałościowe. Układ przewierczanych warstw i próbkę zamocowaną w przyrządzie na wiertarce używanej do testów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4.4. Testy wiercenia w materiale MTM44-1: a) przewiercane warstwy, b) próbka z przekładkami zamontowana w przyrządzie wiertarskim [materiały własne]



Rys. 5. Pomiar temperatury ostrza wiertła po wierceniu [materiały własne]

Do przewiercenia przygotowano 6 próbek z materiału MTM44-1/EHTA40(6k)-2x2T-284-40%RW o układzie warstw [0/45/90/-45/0/45]_S. Pierwsze 3 próbki przewiercono z prędkością obrotową wrzeciona 500 obr/min i nominalnym czasem wiercenia 90s. Próbki zostały oznaczone 500-1, 500-2 i 500-3. Kolejne 3 sztuki oznaczono 3000-1, 3000-2 i 3000-3. Zostały one przewiercone z prędkością obrotową wrzeciona 3000 obr/min w czasie ok. 5s. Po wywierceniu każdego z otworów za pomocą zewnętrznej termopary zmierzono temperaturę ostrza wiertła, a przed wykonaniem kolejnego otworu odczekano, aż wiertło osiągnie z powrotem temperaturę otoczenia. Pomiar temperatury wiertła po wierceniu przedstawiono na rysunku 5.

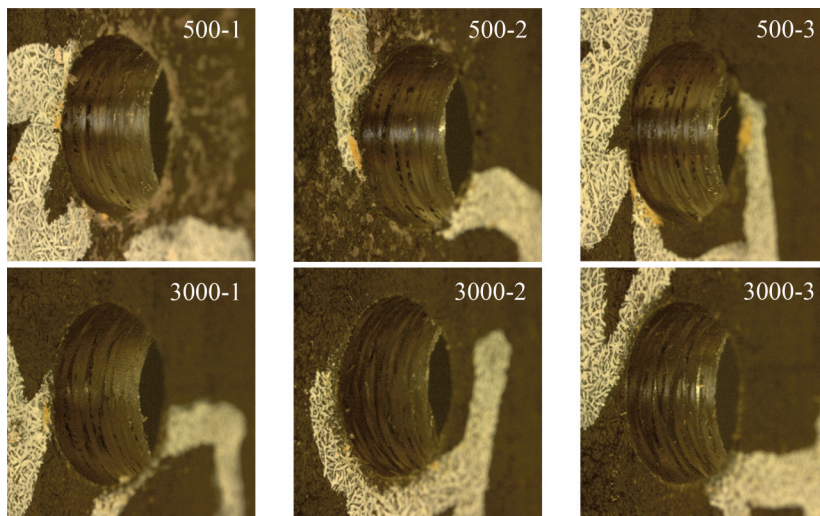
Położenie wykonywanych otworów na próbce określa norma ASTM 5961. Zestawienie danych z prób wiercenia przedstawiono w tabeli 1. Średnia temperatura wiertła po wykonaniu otworów z prędkością 500 obr/min wyniosła 35,5°C, a po wierceniu z prędkością 3000 obr/min – 51,7°C. Po wywierceniu wszystkich otworów próbki poddano pomiarom na potrzeby późniejszych obliczeń wytrzymałościowych.

Tabela 1. Zestawienie danych z wiercenie próbek [materiały własne]

Nazwa próbki	Obroty wrzeciona, obr/min / prędkość skrawania V_c , m/min	Czas wiercenia, s	Temperatura wiertła po wierceniu, °C
500-1	500/9,91	90	31,9
500-2	500/9,91	80	36,0
500-3	500/9,91	85	38,5
3000-1	3000/59,48	5	58,0
3000-2	3000/59,48	5	45,5
3000-3	3000/59,48	4	51,5

3. TEST WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZENIA NA NACISKI PRÓBEK Z OTWORAMI

Przed przystąpieniem do badań zmierzono szerokość, długość i grubość próbek, a także położenie i średnicę otworu, a następnie otwory poddano obserwacjom mikroskopowym. Otwory w powiększeniu przedstawiono na rysunku 6.

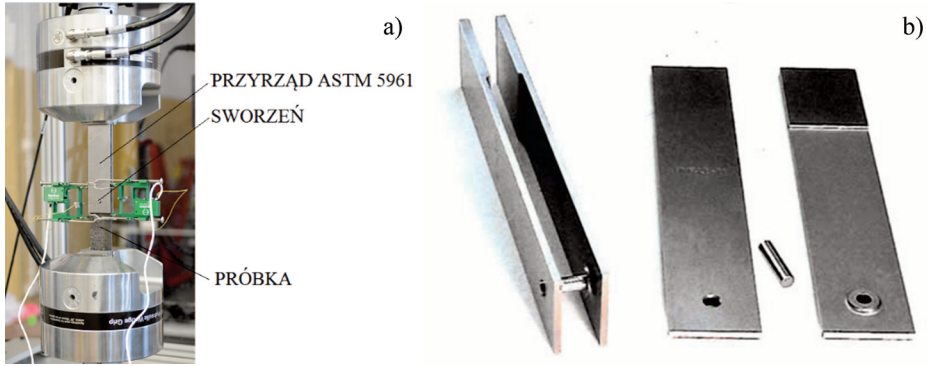


Rys. 6. Otwory na próbkach w powiększeniu mikroskopowym [materiały własne]

Podczas oględzin nie zauważono żadnych przejawów występowania delaminacji. Krawędzie wszystkich otworów były niepostrzępione. Wewnętrzne ściany otworów były dość gładkie z widocznymi pojedynczymi wyrwaniami, występującymi we wszystkich przypadkach, niezależnie od użytej prędkości skrawania i posuwu.

Tak przygotowane próbki poddano testom wytrzymałości na naciski zgodnie z normą ASTM 5961. Badanie miało na celu sprawdzenie czy różne prędkości obróbki i różne występujące podczas wiercenia temperatury wpłyną na zachowanie powierzchni nośnej próbki. Powierzchnia nośna równa jest średnicy otworu, przez który przechodzi sworzень pomnożonej przez grubość próbki [10]. Podczas testu jeden z końców próbki mocowany jest w szczękach maszyny wytrzymałościowej, drugi (z otworem) jest montowany z użyciem sworznia w przyrządzie, umieszczonym w przeciwległych szczękach maszyny. Podczas testu na próbkach montowano ekstensometry w celu dodatkowego pomiaru odkształceń. Próbkę zamontowaną w przyrządzie na maszynie wytrzymałościowej MTS Landmark przedstawiono na rysunku 7.

Testy wytrzymałościowe próbek wykonano w Laboratorium Badań Kompozytów Instytutu Lotnictwa. Prędkość rozciągania próbki wynosiła 2 mm/min. Zakończenie rozciągania zgodnie z normą może nastąpić w przypadku spadku siły od wartości maksymalnej o 30%, lub gdy przemieszczenie osiągnie wartość, co najmniej połowy średnicy sworznia. Podczas badań wykonanych, wszystkie próby zostały zakończone po spełnieniu drugiego warunku. W trakcie testów rejestrowano siły i przemieszczenia, a ich zestawienia w postaci wykresów przedstawiono na rysunku 8. Spośród próbek wierconych z prędkością 500 obr/min największą siłę zarejestrowano podczas badania próbki 500-3 – 13,35 kN. Wśród próbek wierconych z prędkością 3000 obr/min najbardziej wytrzymała okazała się próbka 3000-3. Podczas jej rozciągania zarejestrowano siłę 14,30 kN. Wykres siły względem przemieszczenia dla próbki 3000-2 różni się od pozostałych. Inne próbki osiągały siłę maksymalną na końcu nachylonego odcinka liniowego tej zależności z początkiem dla „0” układu współrzędnych, natomiast próbka 3000-2 największą siłę przenosiła na etapie rozciągania otworu.



Rys. 7. Próby rozciągania zgodne z normą ASTM 5961: a) próbka zamontowana w przyrządzie do testu zgodnego z normą ASTM 5961 w szczękach maszyny wytrzymałościowej MTS Landmark [materiały własne] b) przyrząd do rozciągania zgodnie z normą ASTM 5961 [11]

Zgodnie z norma ASTM 5961 po wykonaniu testu należy obliczyć maksymalną nośności próbki, lub nośność osiągniętą przed zerwaniem. Wszystkie próby zakończono przed zerwaniem, dlatego obliczono maksymalną nośność próbki, korzystając ze wzoru (2).

$$\sigma_i^{br} = \frac{P_i}{K \times D \times h} \quad (2)$$

gdzie: σ_i^{br} – maksymalna zarejestrowana siła, K – ilość otworów przenoszących obciążenie, D – średnica otworu, h – grubość próbki [12].

Wyniki obliczeń wraz z odpowiadającymi próbie siłami zestawiono w tabeli 2.

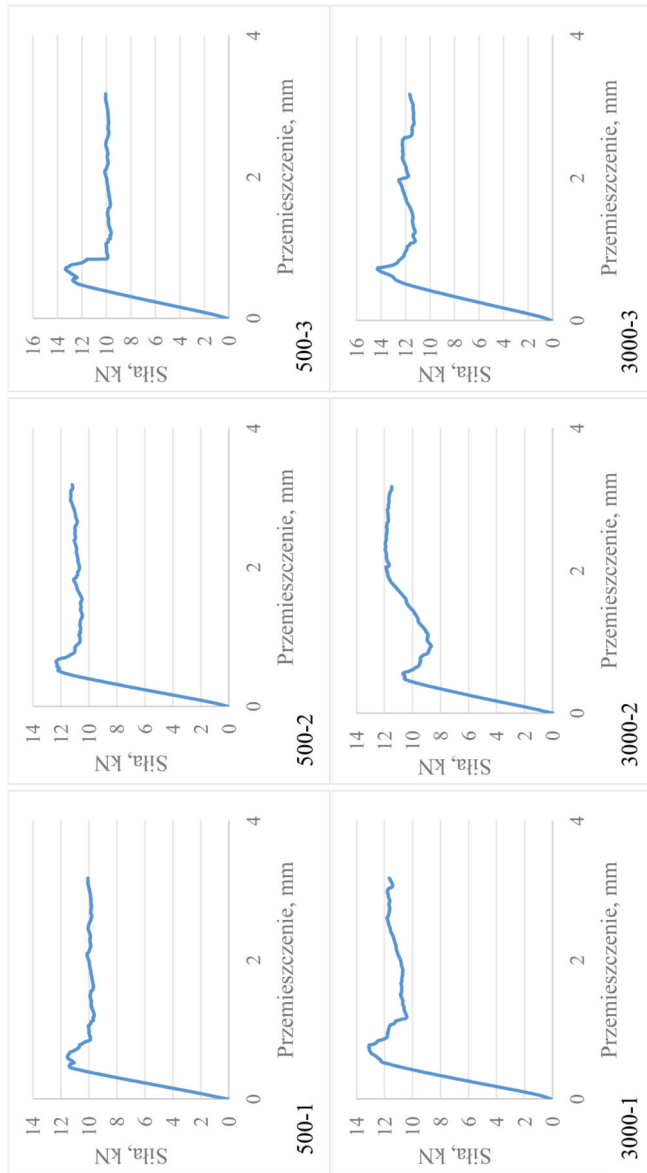
Tabela 2. Maksymalne siły i obliczone na ich podstawie maksymalne nośności badanych próbek [materiały własne]

Oznaczenie próbki	500-1	500-2	500-3	3000-1	3000-2	3000-3
Maksymalna siła, kN	11,54	12,34	13,35	13,14	11,98	13,84
Maksymalna nośność, MPa	492	526	564	547	493	595
Średnia siła, kN	12,41			13,14		
Średnia nośność, MPa	527			545		



Wszystkie próbki zostały zniszczone w ten sam sposób. Typ zniszczenia został określony przez normę jako *laminare bearing*, polegający na rozciągnięciu otworu bez pęknięcia próbki. Przykład tego typu zniszczenia przedstawiono na rysunku 9.

Rys. 9. Zniszczenie typu *laminare bearing* próbki 500-1 po badaniu wg ASTM 5961 [materiały własne]



Rys. 8. Zestawienie wykresów siły od przemieszczenia dla badanych próbek [materiały własne]

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego oraz wykonanych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Dobór odpowiednich parametrów wiercenia w materiałach kompozytowych jest zadaniem trudnym i wymaga indywidualnego podejścia do każdego przypadku. Jest on wynikiem zestawienia rodzaju i grubości obrabianego materiału, a także typu stosowanego wiertła z prędkością obrotową i prędkością posuwu.
2. W przeprowadzonych testach nie stwierdzono wpływu różnych prędkości skrawania: 9,91 m/min i 59,48 m/min i czasu wiercenia 5 s i 90 s na wytrzymałość użytego do testu materiału MTM44-1.

Różnice sił maksymalnych zarejestrowanych w czasie testów i obliczonych na ich podstawie maksymalnych nośności (564 MPa i 594 MPa) pomiędzy seriami, są rzędu rozrzutu pomiędzy poszczególnymi wynikami, co nie pozwala jednoznacznie ocenić czy dla zastosowanych parametrów taki wpływ występuje.

3. Zastosowanie przekładek z MDF podczas wiercenia, znacznie poprawiło jakość krawędzi otworów zarówno od strony wejścia jak i od strony wyjścia wiertła. Dąży się do uzyskania dobrej jakości otworów bez stosowania przekładek utrudniających proces wiercenia, ale dla małych partii materiałów pomaga ona znacznie usprawnić proces wiercenia.
4. Średnia temperatura wiertła podczas wiercenia z prędkością 3000 obr/min była większa od średniej temperatury wiercenia z prędkością 500 obr/min o 16,2°C. Nie zauważono jednak, aby ta różnica wpłynęła na jakość lub wytrzymałość badanych próbek.
5. Test odporności na naciski sworzni na powierzchnię wewnętrzną otworów podczas rozciągania jest optymalny dla szukania ewentualnego wpływu parametrów obróbki na materiał i jego właściwości, ponieważ za pomocą sworzni oddziałujemy bezpośrednio w obszarze występowania możliwych zmian w objętości próbki np. na skutek zbyt wysokiej temperatury podczas obróbki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wiśniowski W., 2014, „Specjalizacje Instytutu Lotnictwa – przegląd i wnioski”, Prace Instytutu Lotnictwa, Vol. 235(2), pp. 7-16.
- [2] Durão L.M.P., Tavares J.M.R.S., de Albuquerque V. H. C., Marques J. F. S. and Andrade O.N.G., 2014, “Drilling damage in composite materials”, *Materials* 7, pp. 3802-3819.
- [2] Phadnis V. A., Makhadmeh F., Roy A. and Silberschmidt V.V., 2013, “Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 47, pp. 41-51.
- [3] Davim J. P. and Reis P., 2003, “Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study”, *Materials and Design* 24, pp. 315-324.
- [4] Chen W.C., 1996, “Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates”, *Mach. Tools Manufact.* 37(8), pp. 1097-1108.
- [5] Weinert K. and Kempmann Ch., 2004, “Cutting temperatures and their effects on the machining behavior in drilling reinforced plastic composites”, *Advanced Engineering Materials*, 6, (8), pp. 684-689.
- [6] Sitek P. and Katunin A., 2015, “Analysis of drilling process of composite structures – part I: evaluation of thermal condition”, *Modelowanie inżynierskie*, nr 55, s. 88-94.
- [7] Gardiner G., “Hole ambitions! Optimize? Customize?”, 2012, <http://www.compositesworld.com/articles/hole-ambitions-optimize-customize>.
- [8] Sandvik Coromant commercial materials, 2016, <http://www.sandvik.coromant.com>.
- [9] Karny M. “Metoda badania nośności kompozytów polimerowych połączonych połączeniem sworzniowym – astm d5961/d5961m-13, 2015, Procedura Badawcza Laboratorium Badań Kompozytów Instytutu Lotnictwa, JPB 20-LK.
- [10] Wyoming Test Fixtures commercial materials, 2016, <http://www.wyomingtestfixtures.com>.
- [11] ASTM International, 2013, “Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates”, D9561/D9561M-13.

INFLUENCE OF THE DRILLING PROCESS PARAMETERS ON THE QUALITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF DRILLING HOLES IN CARBON COMPOSITES

Abstract

This article analyses the impact of drilling process parameters on the quality of drilling holes and their bearing strength. Review of the literature was made to get information about composites drilling using various tools and process parameters. Research has been done with MTM44-1 material using CORODRILL 452.1-0635-044A0-C H10 drill (6.35 mm diameter) with two different speeds of the spindle: 500 rpm and 3000 rpm. After drilling the temperature of the drill was measured using thermocouple. Quality of the holes was checked in a microscopic observation. Specimens was tested for resistance to pressure according to ASTM 5961 standard. During the test maximum force was recorded and bearing strength of the specimen was calculated. The article presents a summary of the results and analyzed them in term of impact of drilling parameters on the machanical properties of the specimens.

Keywords: composites drilling, drilling parameters, carbon fiber reinforced composites machining, carbon fiber reinforced composites