

Wpływ parametrów technologicznych i rodzaju wiertła na dokładność obróbki otworów w węglowych kompozytach włóknistych

Influence of technological parameters and type of drill bit on the accuracy of holes machining in carbon fibrous composites

PAWEŁ PIEŚKO
MAGDALENA ZAWADA-MICHAŁOWSKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.190>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Rosnące zainteresowanie materiałami kompozytowymi determinuje prowadzenie badań nad niwelowaniem negatywnych efektów procesu obróbki mechanicznej. Przedstawiono analizę wpływu parametrów technologicznych i rodzaju wiertła na jakość otworów wierconych w węglowych kompozytach włóknistych.

SŁOWA KLUCZOWE: kompozyty włókniste, wiercenie, delaminacja

The increasing interest in composite materials determines to conduct the research allowing to neutralize the negative effects of the machining process. The paper presents an analysis of the influence of technological parameters and the type of drill bits on the quality of drilled holes in carbon fibrous composites.

KEYWORDS: fibrous composite, drilling, delamination

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój technologii wytwarzania i kształtowania kompozytów. Materiały te charakteryzują się m.in. dobrymi właściwościami mechanicznymi przy stosunkowo małej masie, co ma bardzo duże znaczenie we współczesnym przemyśle, zwłaszcza lotniczym oraz motoryzacyjnym, i skutkuje rosnącym zainteresowaniem tymi materiałami [2, 3].

Do najczęściej stosowanych należą tzw. kompozyty włókniste, wyróżniające się wysoką wytrzymałością. W lotnictwie i kosmonautyce szerokie zastosowanie znajdują materiały wzmocnione włóknem węglowym o dobrej adhezji do osnowy i z możliwością pracy pod dużymi obciążeniami. Na właściwości kompozytów polimerowych wpływa wiele czynników, wśród których warto wymienić: rodzaj osnowy, kierunek ułożenia wzmocnienia w stosunku do kierunku obciążenia oraz temperaturę pracy [2, 6].

Duże problemy sprawia obróbka mechaniczna kompozytów. Jedną z typowych operacji obróbkowych w przypadku tych materiałów jest wiercenie otworów. Ponieważ otwory pełnią zazwyczaj rolę montażową, stawia się im wysokie wymagania związane z dokładnością wykonania. Bardzo często w trakcie wiercenia występuje niekorzystne zjawisko rozwarstwienia kompozytu, nazywane delaminacją, oraz pojawiają się ostre, nierównomierne krawędzie na wejściu i wyjściu narzędzia (w przypadku wiercenia przelotowego). Aby poprawić dokładność wykonania, do obróbki tych materiałów wykorzystuje się narzędzia o specjalnej geometrii i dobiera się odpowiednie zakresy parametrów technologicznych [1, 4, 5, 7, 8].

Autorzy prac [5, 7] wskazują, że jakość otworów można określić na podstawie współczynnika delaminacji, który wyznacza się z zależności:

$$W_D = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}}$$

gdzie: W_D – współczynnik delaminacji, D_{\max} – maksymalna średnica występowania delaminacji, D_{nom} – nominalna średnica otworu (oznaczenia zgodnie z rys. 4).

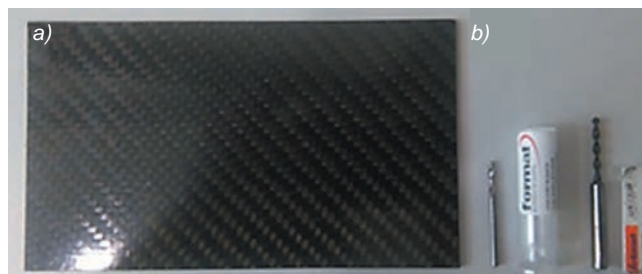
Metodyka

Celem pracy było określenie wpływu parametrów technologicznych i rodzaju wiertła na dokładność obróbki otworów oraz wielkość delaminacji powstających w wybranym materiale kompozytowym.

Wiercenie otworów przeprowadzono na trójosiowym centrum obróbkowym AVIA VMC 800HS. W eksperymencie wykorzystano próbkę (rys. 1a) wykonaną z kompozytu polimerowego na osnowie z żywicy epoksydowej wzmocnianej włóknem węglowym (CFRP) o wymiarach gabarytowych: 190 mm (długość) × 110 mm (szerokość) × 3 mm (grubość). Do jej przygotowania zastosowano technologię prepregów.

Użyto dwóch typów wiertła (rys. 1b) o średnicy 3 mm, tj.:

- wiertła węglowego (VHM) ogólnego przeznaczenia firmy Format (11830300),
- wiertła węglowego (VHM) firmy Garant pokrytego diamentem krystalicznym (122512), do obróbki kompozytów włóknistych.



Rys. 1. Zastosowany materiał i narzędzia: a) próbka wykonana z kompozytu polimerowego na osnowie z żywicy epoksydowej wzmocnianej włóknem węglowym, b) wiertło ogólnego przeznaczenia oraz dedykowane do obróbki materiałów kompozytowych

W tabl. I zestawiono wartości parametrów technologicznych stosowane w trakcie prób. Punktem odniesienia do ich doboru były wytyczne z katalogu narzędziowego firmy Garant, gdzie producent zaleca następujące wartości: prędkość skrawania $v_c = 100$ m/min oraz posuw na obrót

* Dr inż. Paweł Pieśko (p.piesko@pollub.pl), mgr inż. Magdalena Zawada-Michałowska (m.michalowska@pollub.pl) – Politechnika Lubelska

TABLICA I. Wartości parametrów technologicznych wykorzystanych w badaniach

Głębokość skrawania a_p , mm	1,5				
Prędkość skrawania v_c , m/min	40	60	80	100	120
Prędkość obrotowa n , obr/min	4244	6366	8488	10 610	12 732
Posuw f , mm/obr	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10

$f = 0,06$ mm/obr. Dla każdej z analizowanych konfiguracji parametrów technologicznych wykonano po trzy powtórzenia.

W ramach badań wywiercono i zmierzono łącznie 150 otworów. Każdym z wiertel wykonano po 75 otworów.

Po obróbce otworów przeprowadzono analizę dokładności ich wykonania na podstawie pomiarów, do których zastosowano:

- skaner optyczny ATOS Capsule firmy GOM,
- cyfrowy mikroskop pomiarowy firmy Keyence VHX5000.

Oba urządzenia pomiarowe charakteryzują się dużą precyzją oraz znajdują zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu maszynowego.

Wyniki badań

W pierwszym etapie analizowano dokładność wymiarową otworów po obróbce dwoma badanymi typami wiertel.

W tabl. II i III zestawiono wyniki pomiaru średnic otworów, wykonanego skanerem optycznym ATOS firmy GOM.

TABLICA II. Wartości średnic otworów wykonanych wiertłem ogólnego przeznaczenia

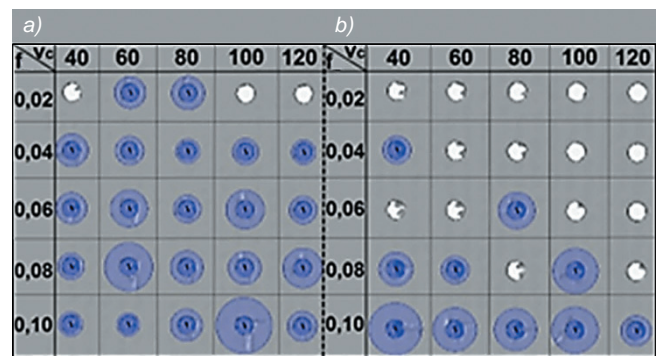
Prędkość skrawania v_c , m/min	Prędkość skrawania v_c , m/min				
	40	60	80	100	120
Posuw f , mm/obr					
0,02	2,92	2,92	2,92	2,91	2,92
0,04	2,92	2,91	2,92	2,92	2,92
0,06	2,92	2,92	2,92	2,91	2,92
0,08	2,91	2,92	2,92	2,92	2,92
0,10	2,91	2,92	2,91	2,91	2,92

TABLICA III. Wartości średnic otworów wykonanych wiertłem dedykowanym do obróbki kompozytów

Prędkość skrawania v_c , m/min	Prędkość skrawania v_c , m/min				
	40	60	80	100	120
Posuw f , mm/obr					
0,02	2,94	2,93	2,93	2,93	2,93
0,04	2,94	2,93	2,94	2,93	2,93
0,06	2,93	2,93	2,94	2,93	2,94
0,08	2,94	2,93	2,94	2,93	2,94
0,10	2,94	2,93	2,94	2,95	2,95

Zmierzone wartości średnic, uzyskanych po obróbce zarówno wiertłem węglkowym ogólnego przeznaczenia, jak i wiertłem dedykowanym do obróbki kompozytów, są mniejsze od wartości nominalnej równej 3 mm. Dodatkowo nieznacznie mniejsze odchyłki wymiaru uzyskano w przypadku narzędzia dedykowanego. Różnica jest jednak niewielka i mieści się w zakresie dokładności urządzenia pomiarowego.

Na rys. 2 przedstawiono wyniki pomiaru delaminacji kompozytu uzyskane za pomocą skanera ATOS (od stro-



Rys. 2. Wyniki pomiaru delaminacji skanerem optycznym ATOS firmy GOM z oznaczeniem otworów, w których nastąpiło wyrwanie materiału: a) otwory wiercone wiertłem ogólnego przeznaczenia, b) otwory wiercone wiertłem dedykowanym do obróbki kompozytów

ny wejścia narzędzia), z oznaczeniem otworów, w których wystąpiło wyrwanie materiału (kolor fioletowy). Dzięki możliwościom oprogramowania GOM Inspect zmierzono również maksymalną średnicę delaminacji.

Zauważono, że znacznie lepszej jakości otwory uzyskano wiertłem węglkowym pokrytym diamentem krystalicznym, które jest dedykowane do obróbki kompozytów włóknistych. Można przyjąć, że w przypadku obróbki tym wiertłem do $f = 0,06$ mm/obr oraz wszystkich rozpatrywanych prędkości skrawania delaminacja praktycznie nie występuje lub jest niewielka.

W przypadku wiertła ogólnego przeznaczenia delaminacja widoczna jest prawie przy wszystkich wartościach posuwu. Wyjątkiem jest $f = 0,02$ mm/obr, dla którego przy $v_c = 40, 100$ i 120 m/min nie zauważono rozwarstwienia materiału.

W tabl. IV i V zestawiono wartości współczynnika delaminacji materiału po stronie wejścia wiertła w kompozyt włóknisty.

TABLICA IV. Wartości współczynnika delaminacji dla wiertła ogólnego przeznaczenia

Prędkość skrawania v_c , m/min	Prędkość skrawania v_c , m/min				
	40	60	80	100	120
Posuw f , mm/obr					
0,02	0,00	1,82	1,90	0,00	0,00
0,04	1,87	1,65	1,39	1,51	1,40
0,06	1,79	2,12	1,57	2,21	1,60
0,08	1,54	2,75	1,88	1,89	2,27
0,10	1,41	1,32	1,84	3,21	1,73

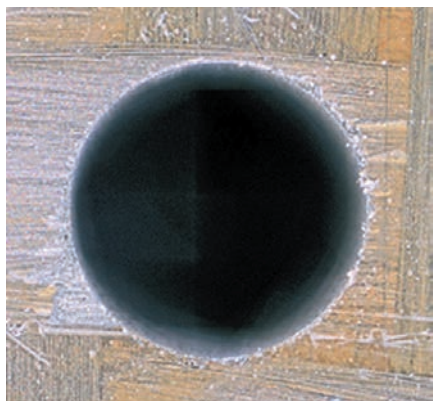
TABLICA V. Wartości współczynnika delaminacji dla wiertła dedykowanego do obróbki kompozytów

Prędkość skrawania v_c , m/min	Prędkość skrawania v_c , m/min				
	40	60	80	100	120
Posuw f , mm/obr					
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	2,03	0,00	0,00
0,08	1,87	1,55	0,00	2,49	0,00
0,10	2,91	2,42	2,33	2,57	1,69

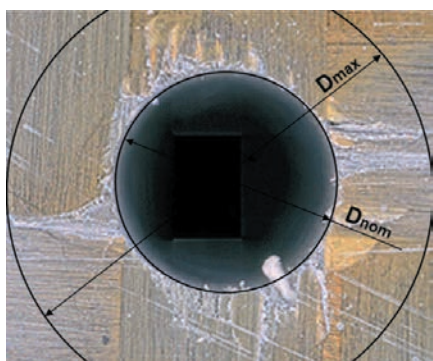
Analizując wyznaczone wartości współczynnika delaminacji oraz wyniki uzyskane z pomiaru skanerem optycznym ATOS, stwierdzono, że wiercenie z parametrami technologicznymi zalecanymi przez producenta, tj. $v_c = 100$ m/min oraz $f = 0,06$ mm/obr, pozwoliło uzyskać otwory charakteryzujące się wysoką jakością.

Zauważono również wyraźny wpływ posuwu na dokładność wykonania otworów. Możliwe jest wiercenie narzędziem dedykowanym do kompozytów z większą prędkością – w analizowanym przypadku: $v_c = 120$ m/min – przy zastosowaniu mniejszych wartości posuwu. Dla $f = 0,1$ mm/obr niezależnie od prędkości skrawania wystąpiło zjawisko rozwarstwienia kompozytu.

Dodatkowo wykonano badania uzupełniające, polegające na obserwacji otworów z użyciem mikroskopu pomiarowego Keyence VHX5000. Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe obrazy uzyskane dla narzędzia dedykowanego, przy czym na rys. 3 widać otwór charakteryzujący się wysoką dokładnością wykonania, a na rys. 4 – otwór z delaminacją.



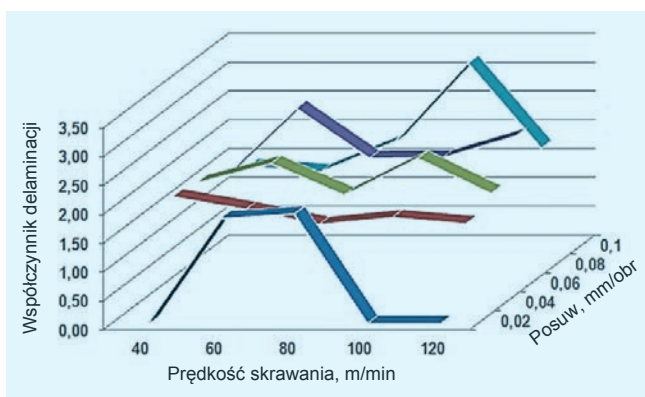
Rys. 3. Otwór wiercony narzędziem dedykowanym; $v_c = 120$ m/min i $f = 0,02$ mm/obr



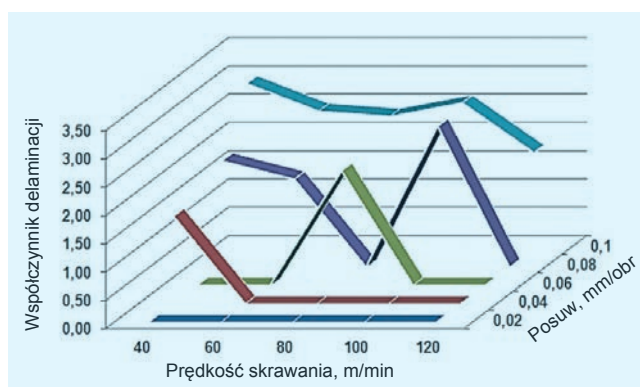
Rys. 4. Otwór wiercony narzędziem dedykowanym; $v_c = 100$ m/min i $f = 0,1$ mm/obr

Analizując obrazy z mikroskopu pomiarowego, można stwierdzić, że potwierdziły się wyniki uzyskane skanerem optycznym ATOS.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono przestrzenne wykresy ilustrujące zależność między współczynnikiem delaminacji a parametrami technologicznymi, takimi jak prędkość skrawania i posuw. Odnoszą się one odpowiednio do na-



Rys. 5. Zależność między współczynnikiem delaminacji a parametrami technologicznymi (prędkością skrawania i posuwem) dla wiertła ogólnego przeznaczenia



Rys. 6. Zależność między współczynnikiem delaminacji a parametrami technologicznymi (prędkością skrawania i posuwem) dla wiertła dedykowanego do obróbki kompozytów

zędzia ogólnego przeznaczenia (rys. 5) i narzędzia dedykowanego do obróbki materiałów kompozytowych (rys. 6).

W przypadku narzędzia ogólnego przeznaczenia wyniki pomiarów są trudne do interpretacji. Dla obydwu wiertel można zauważyć wyraźny wzrost wartości współczynnika delaminacji wraz ze wzrostem posuwu.

Podsumowanie

Prace studyjne oraz badania eksperymentalne pozwoliły na sformułowanie następujących, ważniejszych wniosków:

- Znacznie lepsze efekty obróbki uzyskano w przypadku narzędzia dedykowanego do kompozytów niż w przypadku wiertła ogólnego przeznaczenia.
- Istotne znaczenie dla wartości delaminacji ma dobór właściwych parametrów skrawania.
- Zalecane przez producenta wartości posuwu i prędkości skrawania dla wiertła dedykowanego pozwalają na minimalizację ryzyka wystąpienia delaminacji.
- Zwiększenie posuwu przekłada się na wyraźny wzrost delaminacji.
- Otwory wykonane obydwoma wiertłami mają zbliżone, ujemne wartości odchyłek wymiaru.
- Błędy wymiaru wynikają z jakości wykonania (szlifowania) wiertel.

LITERATURA

1. Banaszek M., Ivan K., Józwiak J., Tofil A. „Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów włóknistych i oceny chropowatości powierzchni”. *Postępy Nauki i Techniki*. 15 (2011): s. 205–220.
2. Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S. „Kompozyty”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
3. Boczkowska A., Krzesiński G. „Kompozyty i techniki ich wytwarzania”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
4. Cantero J.L., Diaz-Alvarez J., Fernandez-Perez J., Miguelez M.H. “Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling”. *Composite Structures*. 178 (2017): s. 157–161.
5. Jaśkiewicz R. „Analiza wpływu parametrów procesu wiercenia na jakość uzyskiwanych otworów i właściwości mechaniczne kompozytów węglowych”. *Prace Instytutu Lotnictwa*. 244, 3 (2016): s. 65–73.
6. Królikowski W. „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
7. Leppert T., Paczkowski T., Polasik R., Serwacki D. „Delaminacja materiału kompozytowego włóknistego podczas wykonywania otworów”. *Mechanik*. 10 (2016): s. 1422–1423.
8. Makhadm F., Phadnis V.A., Roy A., Silberschmidt V.V. “Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation”. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 47 (2013): s. 41–51.