

# Wpływ zmiany parametrów cięcia wodno-ściernego na jakość przecinania kompozytowych struktur przekładkowych

## The influence of changing the parameters of water-abrasive cutting on the quality of cutting composite cross-section structures

ELŻBIETA DOLUK  
JÓZEF KUCZMASZEWSKI  
PAWEŁ PIEŚKO\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.59>

Prezentowane są wyniki badań dotyczące wartości kąta ukosowania powstającego podczas cięcia abrazywnego przekładkowych struktur kompozytowych (stopu aluminium EN AW-2024 i kompozytu węglowego). Zbadano wpływ prędkości cięcia, ciśnienia strugi wodno-ściernej, wydatku medium tnącego oraz materiału wejścia strugi i liczby warstw materiału kompozytowego na jakość przecinanych powierzchni.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kompozyt przekładkowy, cięcie strugą wodno-ścierną, kąt ukosowania, jakość powierzchni

*Presented are results of the surface quality sandwich composites (aluminum alloy EN AW-2024 and CFRP) by using an abrasive water-jet. The experiments were conducted with different speed of cutting, pressure of the abrasive water, mass flow rates, entry side of the stream and quantity of composite layers. The analysis has been studied based on received bevel angle values.*

**KEYWORDS:** spacer composite, abrasive water jet, bevel angle, surface quality

Kompozyty stanowią grupę materiałów inżynierskich, które od XIX w. odgrywają coraz większą rolę w wielu dziedzinach współczesnej techniki. Wynika to z ich właściwości fizykochemicznych [14]. Ciągłe dążenie do redukcji kosztów produkcji przyczyniło się natomiast do upowszechnienia stosowania kompozytów warstwowych typu *sandwich*.

Materiały te są zbudowane z dwóch lub większej liczby warstw, w których okładki zewnętrzne są rozdzielone warstwą dystansową w postaci lekkiego rdzenia. Dzięki temu kompozyty warstwowe cechuje lekka, sztywna, a zarazem wytrzymała konstrukcja.

Materiały te znalazły zastosowanie głównie w przemyśle lotniczym, m.in. do budowy kadłubów samolotów. Obróbka materiałów kompozytowych wiąże się z koniecznością pokonywania wielu trudności, obejmujących m.in. dobór odpowiednich narzędzi oraz ich intensywne zużywanie się, występowanie zjawiska delaminacji czy odprowadzanie szkodliwych pyłów powstających podczas obróbki [8].

Specyficzna budowa kompozytowych konstrukcji przekładkowych narzuca dobór odpowiedniej techniki ich obrabiania. Brak przemyślanej strategii może w tym przypadku powodować pogorszenie lub utratę właściwości użytkowych materiału [7]. Przecinienie struktur kompozytowych typu *sandwich* wymaga również starannego doboru parametrów procesu. Materiały te charakteryzują się bowiem znaczną niejednorodnością, co prowadzi do szybkiego zużywania się narzędzi tnących [1, 3].

Alternatywną techniką obróbki kompozytów warstwowych jest przecinienie wysokociśnieniową strugą wodno-

-ścierną. Cięcie hydroabrazywne ma szereg zalet w porównaniu z pozostałymi metodami przecinania. Są to m.in.: brak tworzenia się strefy wpływu ciepła, brak topnienia materiału, brak potrzeby ostrzenia narzędzia tnącego, możliwość regulacji wartości ciśnienia, minimalne odkształcanie materiału przecinanego, tolerancje na poziomie 0,1÷0,3 mm, możliwość cięcia szerokiego spektrum materiałów [12].

Głównymi wadami tej metody przecinania są: powstawanie śladów poobróbkowych w miejscach oddziaływania strugi wodno-ściernej oraz ukosowanie przecinanych powierzchni.

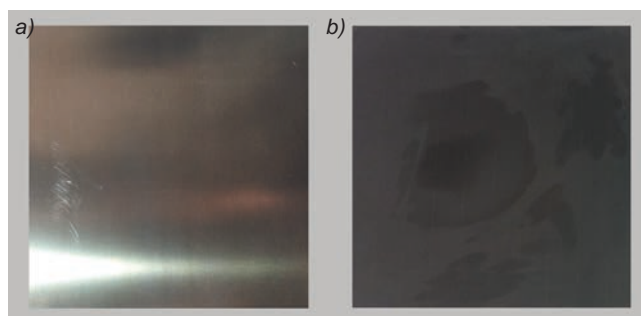
Podstawowe parametry cięcia hydroabrazywnego to: prędkość przecinania, ciśnienie strugi wodno-ściernej oraz wydatek medium tnącego [2, 4–6, 9, 10, 13]. Zbadanie wpływu tych parametrów procesu na jakość przecinanych krawędzi kompozytowych konstrukcji przekładkowych umożliwi dobranie ich wartości w taki sposób, by uzyskać pożądaną jakość przy maksymalnej wydajności procesu.

### Metodyka badań

Celem eksperymentu było zbadanie wpływu prędkości cięcia, ciśnienia strugi, wydatku ścierniwa oraz typu struktury kompozytu (dwu- lub trzywarstwowa) i materiału wejścia strugi wodno-ściernej (wejście narzędzia od strony płyty węglowej lub płyty ze stopu aluminium) na jakość przecinanych krawędzi kompozytu typu *sandwich*.

Zakres badania obejmował sklejanie, pocięcie oraz zbadanie wartości kąta ukosowania powierzchni próbek za pomocą mikroskopu laboratoryjnego.

Wykorzystano płytę o wymiarach 500 × 500 mm oraz grubości 6 mm, wykonaną ze stopu aluminium EN AW-2024 (rys. 1a), oraz płytę węglową o wymiarach 500 × 500 mm i grubości 6 mm, wykonaną metodą autoklawową, na osnowie z żywicy epoksydowej z preimpregnatem z tkaniny węglowej o naprzemiennym ułożeniu włókien (rys. 1b).



Rys. 1. Materiały wykorzystane w badaniu: a) płyta ze stopu aluminium EN AW-2024, b) płyta węglowa

\* Mgr inż. Elżbieta Doluk (elzbieta.doluk@interia.pl), prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (j.kuczmaszewski@pollub.pl), dr inż. Paweł Pieśko (p.piesko@pollub.pl) – Politechnika Lubelska

Na powierzchni obu płyt została naniesiona tkanina delaminazowa, zabezpieczająca płytę przed wpływem otoczenia oraz kształtująca rozwiniętą topografię powierzchni na potrzeby klejenia.

Przygotowanie materiałów do klejenia obejmowało: wstępne odtłuszczenie płyt acetonem, ręczne szlifowanie włókniną ścierną Scotch-Brite 07447+, ponowne odtłuszczenie acetonem, wykonanie analizy Water Break Test, naniesienie na powierzchnie płyt preparatu 3M AC 130. Płyty sklejono dwuskładnikowym klejem strukturalnym 3M Scotch – Weld Structural Epoxy Adhesive EC-9323 B/A, zmieszonym w stosunku wagowym 100:27 (zgodnie z instrukcją), nakładanym obustronnie.

W trakcie łączenia płyty zostały umieszczone w worku próżniowym pod ciśnieniem 0,1 bar na 24 godziny, a następnie były sezonowane przez siedem dni w warunkach otoczenia.

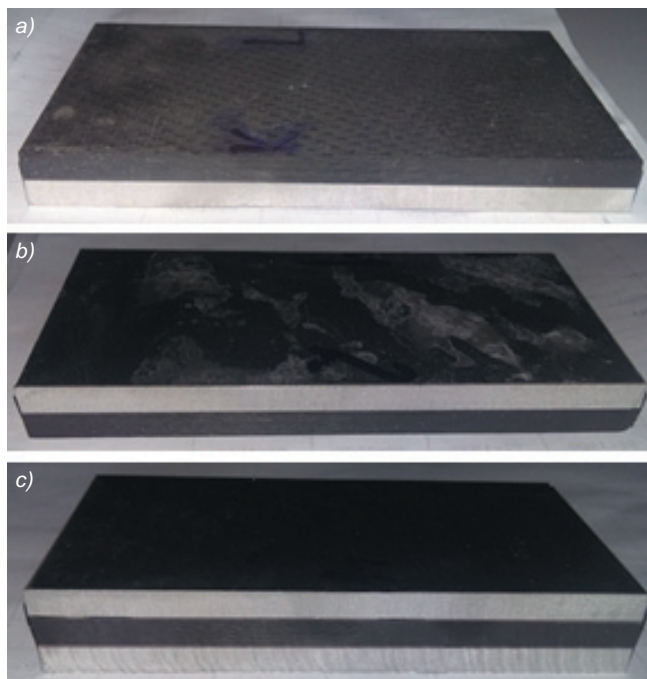
Płyty sklejono w następujących kombinacjach:

- kompozyt węglowy + stop aluminium EN AW-2024 (struktura dwuwarstwowa),
- stop aluminium EN AW-2024 + kompozyt węglowy + stop aluminium EN AW-2024 (struktura trzywarstwowa).

Proces cięcia próbek przeprowadzono z wykorzystaniem przecinarki portalowej COMBO firmy Eckert AS. Wysokość cięcia wynosiła 3 mm. Kąt ukosowania poszczególnych krawędzi zmierzono za pomocą mikroskopu laboratoryjnego Keyence VHX-500.

W tabl. I zestawiono normatywny skład chemiczny badanego materiału. Użyty w badaniu stop aluminium ma dobre własności wytrzymałościowe, cechuje się niską odpornością na utlenianie i korozję oraz słabą spawalnością. Materiał ten jest stosowany najczęściej do budowy konstrukcji lotniczych.

Sklejoną, dwuwarstwową strukturę kompozytową pocięto na 26 próbek o wymiarach 60 × 120 mm. 13 próbek wycięto od strony kompozytu węglowego (rys. 2a) i 13 próbek – od strony stopu aluminium (rys. 2b). Strukturę trzywarstwową pocięto na 13 próbek o wymiarach 60 × 120 mm (rys. 2c).



Rys. 2. Próbkę po procesie cięcia: a) struktura dwuwarstwowa kompozyt węglowy + stop aluminium EN AW-2024, b) struktura dwuwarstwowa stop aluminium EN AW-2024 + kompozyt węglowy, c) struktura trzywarstwowa

TABLICA I. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-2024 [11]

Pierwiastek	Zawartość, %
Si	0,5
Fe	0,5
Cu	3,8÷4,9
Mn	0,3÷0,9
Mg	1,2÷1,8
Cr	0,01
Zn	0,25
Ti	0,15
Zr	<0,10

W tabl. II zamieszczono plan badania. Zakresy parametrów procesu dobrano w oparciu o zalecenia producenta (dokumentację techniczno-ruchową), analizę literatury oraz doświadczenie.

TABLICA II. Plan eksperymentu

Numer eksperymentu	Wartość kodowa parametru			Wartość rzeczywista parametru		
	Vc	P	Q	Vc mm/min	P bar	Q kg/min
1	V <sub>1</sub>	P <sub>5</sub>	Q <sub>1</sub>	50	3500	0,5
2	V <sub>1</sub>	P <sub>4</sub>	Q <sub>1</sub>	50	3000	0,5
3	V <sub>1</sub>	P <sub>3</sub>	Q <sub>1</sub>	50	2500	0,5
4	V <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub>	50	2000	0,5
5	V <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	50	1500	0,5
6	V <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	75	1500	0,5
7	V <sub>3</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	100	1500	0,5
8	V <sub>4</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	200	1500	0,5
9	V <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	400	1500	0,5
10	V <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	50	1500	0,4
11	V <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	50	1500	0,5
12	V <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>4</sub>	50	1500	0,2
13	V <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>5</sub>	50	1500	0,1

Objaśnienia symboli: Vc – prędkość przecinania, P – ciśnienie strugi wodno-ścierniwej, Q – wydatek ścierniwa

## Wyniki badań

Po procesie cięcia oraz pomiarach kąta ukosowania próbek przeanalizowano otrzymane wyniki w funkcji przyjętych parametrów cięcia.

Wyniki eksperymentu zostały podzielone na trzy części w zależności od konfiguracji cięcia:

- cięcie struktury dwuwarstwowej od strony kompozytu węglowego,
- cięcie struktury dwuwarstwowej od strony stopu aluminium,
- cięcie struktury trzywarstwowej.

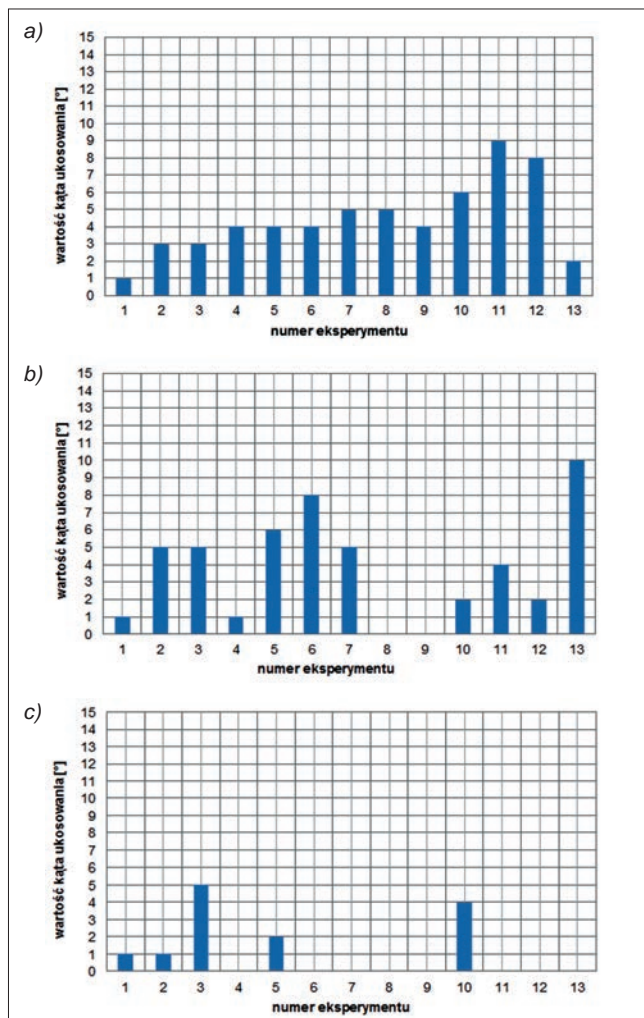
Po zakończonym procesie cięcia próbki zostały poddane wstępnym oględzinom, których celem było określenie: czy dana próbka została przecięta, czy wystąpił proces delaminacji, czy pojawiły się wykruszenia pomiędzy łączonymi warstwami oraz jakie ślady struktury powstały na powierzchniach przecinanych próbek.

Na rys. 3 przedstawiono zmianę wartości kąta ukosowania w zależności od przyjętych parametrów cięcia.

Na podstawie analizy wykresu (rys. 3a) można zauważyć, że najmniejszą wartość kąta ukosowania dla cięcia dwuwarstwowej struktury z wejściem strugi od strony kompozytu otrzymano dla próbki nr 1, a największą – dla próbki nr 11. W rozpatrywanym przypadku przyjęte parametry były wystarczające do przecięcia wszystkich próbek.

Podczas cięcia struktury dwuwarstwowej od strony stopu aluminium (rys. 3b) kąt ukosowania osiągnął najniższą wartość dla próbek nr 1 i nr 4, a najwyższą – dla próbki nr 13. Przyjęte w badaniu parametry nie wystarczyły, aby przeciąć próbki nr 8 i 9.

Cięcie struktury trzywarstwowej (rys. 3c) z założonymi parametrami okazało się mało efektywne – osiem z 13 próbek nie zostało przeciętych (puste pola na wykresie). Dla tej konfiguracji cięcia najniższą wartość kąta ukosowania otrzymano dla próbek nr 1 i 2, a najwyższą – dla próbki nr 3.



Rys. 3. Wartość kąta ukosowania powierzchni podczas cięcia: a) struktury dwuwarstwowej kompozyt węglowy + stop aluminium EN AW-2024, b) struktury dwuwarstwowej stop aluminium EN AW-2024 + kompozyt węglowy, c) struktury trzywarstwowej

## Podsumowanie

Analiza wyników badań oraz wizualna ocena powierzchni przecięcia pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- podczas przecinania próbek w żadnym wariancie nie wystąpiło zjawisko delaminacji; nie odnotowano również przypadków uszkodzenia połączenia klejowego;
- cięcie od strony płyty węglowej jest korzystniejsze dla jakości przecinanych powierzchni, tj. występuje mniejszy kąt ukosowania, mniej widoczne są ślady na powierzchniach przecinanych, zostały przecięte wszystkie próbki oraz uzyskano lepszą jakość powierzchni przecięcia w porównaniu z procesem z wejściem strugi wodno-ściernej od strony stopu aluminium (ugięcie strugi w głębi stopu aluminium jest wyższe);

- zaobserwowano występowanie zjawiska „wciągania” strugi przy dojściu do warstwy kompozytu węglowego;
- najlepszym parametrem sterowania jakością przecinanych powierzchni okazało się ciśnienie strugi – wzrost ciśnienia powoduje zmniejszanie wartości kąta ukosowania;
- wyższe ciśnienie strugi pozwoliło zwiększyć grubość przecinanych materiałów (struktura trzywarstwowa) bez znacznego spadku jakości powierzchni przecięcia w porównaniu z materiałami o mniejszej grubości (struktura dwuwarstwowa);
- zwiększenie grubości kompozytu warstwowego bez zmiany założonych parametrów skutkuje powstawaniem dużych falistości w strefie dolnej krawędzi powierzchni przecięcia;
- wzrost wartości wydatku ścierniwa powoduje obniżanie głębokości przecinania struktury przekładkowej – wiąże się to z dławieniem dyszy formującej i obniżeniem zdolności erozyjnej strugi.

Przedstawione wyniki badań potwierdziły słuszność stosowania cięcia wodno-ściernej do przecinania niejednorodnych materiałów, jakimi są kompozytowe struktury typu *sandwich*. Kluczowym parametrem, umożliwiającym najskuteczniejsze sterowanie jakością przecinanych powierzchni, jest ciśnienie strugi wodno-ściernej.

## LITERATURA

1. Boczkowska A., Krzesiński G. „Kompozyty i techniki ich wytwarzania”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
2. Borkowski J., Benkowska M. „Wpływ głównych parametrów obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na jakość powierzchni przecięcia”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*. 2 (2006): s. 11–18.
3. Greń K., Szatkowski P., Chłopek J. „Characteristics of failure mechanisms and shear strength of sandwich composites”. *Composites Theory and Practice*. 4 (2016): s. 255–259.
4. Hlavac L., Hlavacova I., Kalicinsky J., Fabian S., Mestaneck J., Kmec J., Madra V. “Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality”. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009): s. 6190–6195.
5. Klimpel A. „Cięcie strumieniem wody. Technologia i zastosowanie przemysłowe – cz. II”. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 3–4 (2013): s. 18–23.
6. Kłonica M., Kuczmaszewski J. „Analiza wybranych cech struktury geometrycznej powierzchni konstrukcji przekładkowych po cięciu hydroabrazynym”. *Przegląd Mechaniczny*. 11 (2016): s. 44–48.
7. Królikowski W. „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
8. Józwiak J., Tofil A., Banaszek M., Kuric I. „Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów włóknistych i oceny chropowatości powierzchni”. *Postępy Nauki i Techniki*. 15 (2012): s. 205–220.
9. Mazurkiewicz A. „Projektowanie procesu technologicznego oraz jakości cięcia strumieniem wody wodno-ściernej”. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 5–6 (2017): s. 66–73.
10. Ochal P., Kuczmaszewski J., Kłonica M. „Ocena powierzchni struktur metalowo-kompozytowych po cięciu wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną”. *Mechanik*. 5–6 (2017): s. 436–438.
11. PN-EN 573-1:2006 Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część I: System oznaczeń numerycznych.
12. Skoczylas A., Zaleski K., Kowalczyk H. „Badania porównawcze chropowatości powierzchni stali, stopu aluminium i stopu tytanu po cięciu strumieniem wodno-ściernym”. *Innowacyjne procesy wytwórcze*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2013.
13. Spadło S., Krajczar D., Dudek D. „Wpływ wybranych parametrów procesu przecinania strugą wodno-ścierną na dokładność geometryczną i jakość powierzchni otworów cylindrycznych”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 308–312.
14. Uścimowicz R. „Procesy odkształcania metalowych kompozytów warstwowych”. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2015.