

Ocena powierzchni struktur metalowo-kompozytowych po cięciu wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną

Assessment of surface finish quality of metal/composite compound structures as cut by abrasive water-jet

PAULINA OCHAL
JÓZEF KUCZMASZEWSKI
MARIUSZ KLONICA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.5-6.59>

Prezentowano wybrane wyniki badań jakości powierzchni próbek klejonych po cięciu. Badane materiały klejono w układzie klasycznej zakładki oraz w układzie *sandwich* w różnych wariantach. Proces cięcia realizowano z użyciem technologii *waterjet* ze zmiennym parametrem pracy v_f .

SŁOWA KLUCZOWE: cięcie hydroabrazyjne, połączenia klejowe, warstwa wierzchnia

The paper presents selected results of the surface quality measurements on the as cut bonded samples. The test materials were conventional lap bonded samples or sandwich bonded samples in different arrangements. Water jet method was applied under variable speed v_f .

KEYWORDS: abrasive water jet, adhesive joints, surface layer

Przecinanie jest operacją występującą w wielu procesach produkcyjnych. Cięciu poddaje się różnorodne materiały – począwszy od stopów metali czy tworzyw polimerowych, przez surowce mineralne, po materiały naturalne – wykorzystywane w rozmaitych sferach działalności człowieka [1–3]. Ostatnie lata to okres dynamicznego rozwoju technologii cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną [3, 7, 8, 10, 11]. Wynika to m.in. z licznych zalet tej obróbki (w tym możliwości jej zastosowania do szerokiej gamy materiałów i w wielu obszarach techniki – np. w lotnictwie, motoryzacji czy budowie maszyn) oraz z postępu technicznego, który umożliwił znaczące zwiększenie ciśnienia wody.

W literaturze można znaleźć informacje na temat zalet i wykorzystania obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną do cięcia różnych materiałów [9], jednak brakuje danych o jej zastosowaniu do cięcia klejonych struktur przekładkowych.

Obecnie w technice klejone konstrukcje często poddaje się dalszej obróbce, np. frezowaniu lub cięciu. Ze względu na fakt, że te operacje mogą być operacjami końcowymi, ważne jest zachowanie jednorodności spoiny klejowej. Przeprowadzone dotychczas badania dotyczące cięcia klejonych materiałów polimerowych wskazują na możliwość obróbki takich struktur bez wyraźnych większych wad powierzchni oraz rozwarstwień lub innych uszkodzeń w strefie złącza klejowego [4–6, 12].

Metodyka badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy obejmował klejenie próbek z różnych materiałów w dwu- i trzywarstwowe struktury o różnych kombinacjach, tzw. *sandwich*. Na drugim etapie przecinano gotowe próbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną z ustalonymi wcześniej parametrami technologicznymi procesu. W badaniach wykorzystano próbki z następujących materiałów:

- ze stopu aluminium 2017A (wymiary próbki: 100 × 20 × 2 mm),
- z poliamidu PA6 (wymiary próbki: 100 × 25 × 4 mm),
- ze stali 316L (wymiary próbki: 100 × 25 × 1,5 mm),
- z kompozytu węglowego (wymiary próbki: 100 × 20 × 1,5 mm).

Stop aluminium 2017A oraz stal 316L oczyszczono włókniną ścierną. Kompozyt węglowy poddano obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, natomiast poliamid PA6 – narzędziem nasypowym o ziarnistości P100. Każdy z materiałów przemyto trzykrotnie zmywaczem Loctite 7063.

Próbki sklejało w następujących kombinacjach: kompozyt węglowy – poliamid PA6, stop aluminium 2017A – poliamid PA6, stal 316L – kompozyt węglowy, poliamid PA6 – kompozyt węglowy – stal 316L, stal 316L – poliamid PA6 – kompozyt węglowy, poliamid PA6 – kompozyt węglowy – stop aluminium 2017A, stop aluminium 2017A – poliamid PA6 – kompozyt węglowy. Do sklejenia materiałów użyto żywicy epoksydowej Epidian 6 z dodatkiem utwardzacza PAC w stosunku masowym 100:70.

Do cięcia próbek wykorzystano przecinarkę portalową COMBO firmy ECKERT AS. Każdą próbkę przecięto sześciokrotnie (z ustaloną prędkością posuwu $v_f = 200, 500$ i 1000 mm/min) z obu stron konstrukcji przekładkowej. Ciśnienie strugi wynosiło 350 MPa, a odległość dyszy od próbki była równa 3 mm.

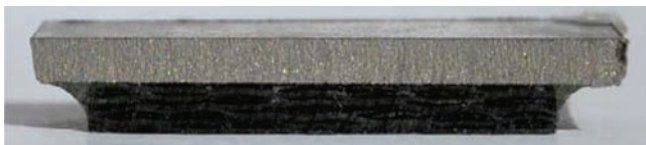
W celu zobrazowania i pomiarów kąta ukosowania powierzchni powstałej po cięciu strugą wodno-ścierną zastosowano mikroskop Keyence VHX-5000.

Wyniki badań

Aby ogólnie ocenić jakość przeciętych powierzchni próbek po cięciu wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, dokonano ich wstępnych oględzin. Podczas tych obserwacji zauważono pierwsze różnice jakości powierzchni w zależności od zastosowanej prędkości posuwu i rodzaju przecinanego materiału. Najmniejsze wady przeciętych

* Mgr inż. Paulina Ochal (pau.oc@wp.pl), prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (j.kuczmaszewski@pollub.pl), dr inż. Mariusz Klonica (m.klonica@pollub.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

powierzchni ujawniły się przy najmniejszej prędkości posuwu: $v_f = 200$ mm/min. Wraz ze zwiększaniem tej prędkości pojawiały się bardziej widoczne ślady obróbkowe, np. ślady odchylenia się strugi, wykruszenia materiału czy zadziory. Przykładowe powierzchnie przecięcia przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Widoczne ślady odchylenia strugi w dwuwarstwowej strukturze stal 316L – kompozyt węglowy w przypadku cięcia z prędkością posuwu $v_f = 1000$ mm/min



Rys. 2. Widoczne ślady odchylenia strugi w trzywarstwowej strukturze stal 316L – kompozyt węglowy – poliamid PA6 w przypadku cięcia z prędkością posuwu $v_f = 1000$ mm/min

Na fotografiach można zauważyć ślady charakterystyczne dla obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Analizując struktury dwu- i trzywarstwowe, nie zauważono, by dla któregoś z przecinanych materiałów wady powierzchni pojawiały się szczególnie często lub z większym nasileniem – ich charakter był przypadkowy.

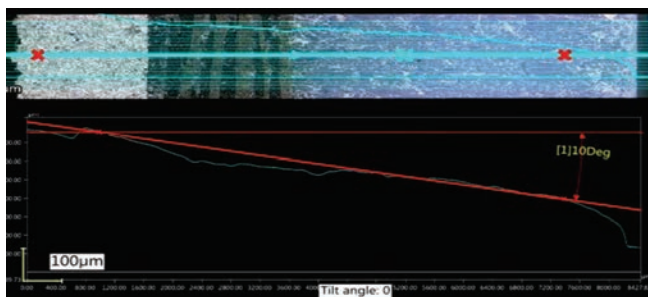
Do obserwacji próbek przy powiększeniu $700\times$ użyto mikroskopu Keyence VHX-5000. Sprawdzano, czy nie wystąpiły nietypowe zmiany na granicy faz pomiędzy materiałami klejonymi oraz inne, charakterystyczne zjawiska związane z dynamiką procesu cięcia.

Na rys. 3 przedstawiono fotografię powierzchni przecięcia jednej z analizowanych próbek. Można zauważyć różnice w topografii powierzchni pomiędzy strefami wejścia i wyjścia strugi wodno-ściernej.

Podczas obserwacji mikroskopowej każdej ze struktur zauważono, że w większości analizowanych przypadków istnieje tendencja do zawężania się strugi w kierunku wyjścia (rys. 4).



Rys. 3. Widok powierzchni przecięcia struktury: stop aluminium 2017A (strefa wejścia) – kompozyt węglowy – poliamid PA6 (strefa wyjścia)

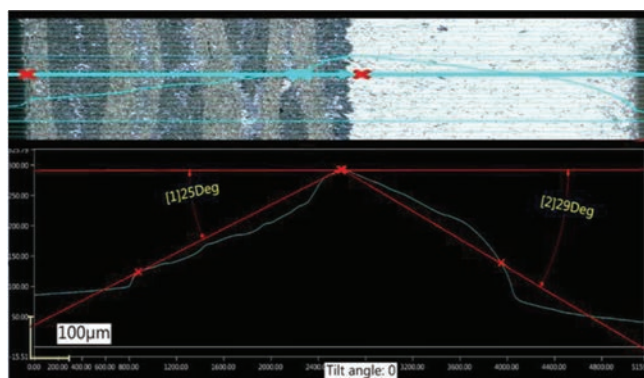


Rys. 4. Sposób pomiaru kąta ukosowania powierzchni na przykładzie struktury trzywarstwowej: poliamid PA6 – kompozyt węglowy – stop aluminium 2017A

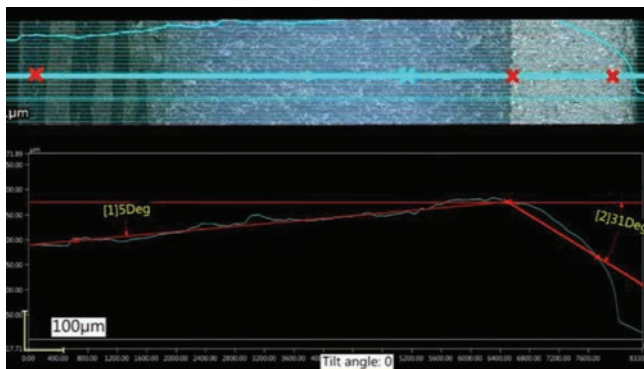
Wartości kątów ukosowania różnią się w zależności od kombinacji materiałów, jednak jest kilka wyjątków od tej reguły. Jeden z nich stanowią struktury, w których wystąpiła kombinacja stali 316L z kompozytem węglowym lub stali 316L, poliamidu PA6 i kompozytu węglowego.

Zarówno w przypadku cięcia struktur dwu-, jak i trzywarstwowych, na granicy faz – pomiędzy stalą 316L a kompozytem węglowym – następuje nagła zmiana kąta ukosowania powierzchni przeciętej. Wchodząc w stal 316L, struga zwęża się, a następnie, docierając do spoiny klejowej pomiędzy stalą 316L a kompozytem węglowym, gwałtownie rozszerza się w kierunku wyjścia (rys. 5 i 6).

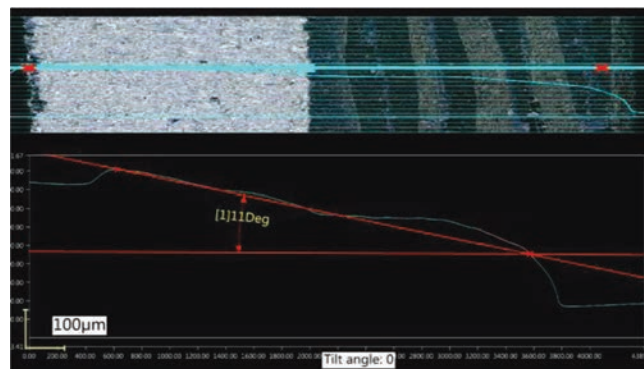
Opisana sytuacja gwałtownej zmiany kąta ukosowania zachodzi jednak tylko w przypadku wchodzenia strugi od strony stali 316L w kierunku kompozytu węglowego. Jeżeli natomiast proces cięcia rozpoczyna się od strony kompozytu węglowego, wówczas następuje zawężenie strugi (rys. 7).



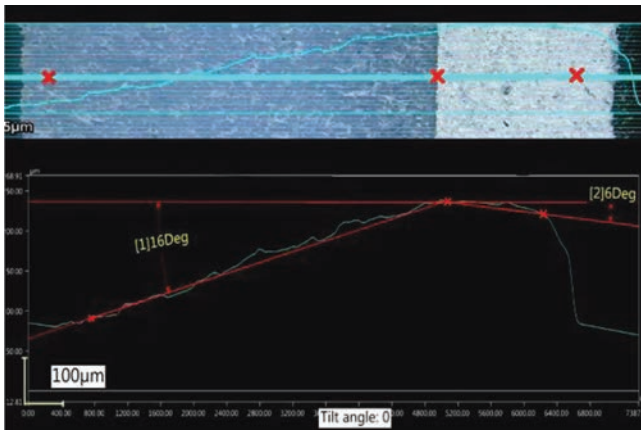
Rys. 5. Kąty ukosowania powierzchni przecięcia struktury dwuwarstwowej stal 316L – kompozyt węglowy w przypadku cięcia z prędkością posuwu $v_f = 500$ mm/min



Rys. 6. Kąt ukosowania powierzchni przecięcia trzywarstwowej struktury stal 316L – poliamid PA6 – kompozyt węglowy w przypadku cięcia z prędkością posuwu $v_f = 200$ mm/min



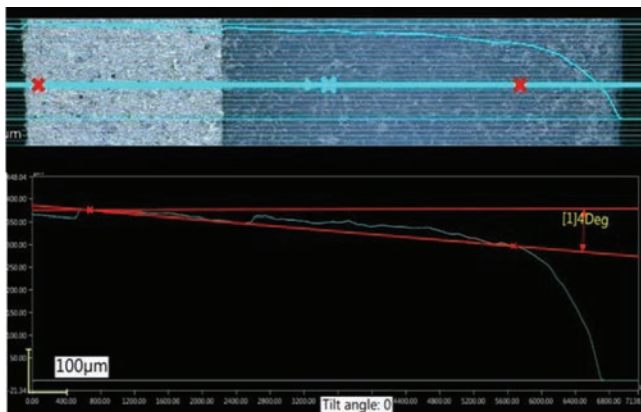
Rys. 7. Kąt ukosowania powierzchni przecięcia struktury dwuwarstwowej kompozyt węglowy – stal 316L w przypadku cięcia z prędkością posuwu $v_f = 200$ mm/min



Rys. 8. Kąty ukosowania powierzchni przecięcia struktury dwuwarstwowej stop aluminium 2017A – poliamid PA6

Kolejnym analizowanym wariantem była kombinacja stopu aluminium 2017A i poliamidu PA6 (rys. 8). Tu również następowała zmiana kąta ukosowania powierzchni przecięcia, jednak nie tak gwałtowna jak w przypadku stali 316L i kompozytu.

W odwrotnym przypadku – gdy proces cięcia rozpoczynał się od poliamidu PA6 w kierunku stopu aluminium 2017A – następowało niewielkie zawężenie strugi (rys. 9).



Rys. 9. Kąt ukosowania powierzchni przecięcia struktury dwuwarstwowej poliamid PA6 – stop aluminium 2017A

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań doświadczalnych sformułowano następujące wnioski:

- W czasie przecinania struktur w żadnym przypadku nie wystąpiło zjawisko delaminacji. Nie zaobserwowano też żadnych innych uszkodzeń w strefie złącza klejowego.
- Podczas wstępnych obserwacji zauważono, że największe wady przecinanych powierzchni wystąpiły przy prędkości posuwu $v_f = 1000$ mm/min, a mniejsze – przy prędkości posuwu $v_f = 500$ mm/min. Przy prędkości posuwu $v_f = 200$ mm/min jakość uzyskanych powierzchni ogólnie była dobra. Sporadycznie pojawiały się minimalne, charakterystycznie zakrzywione ślady po obróbce.
- Analizując próbki z zastosowaniem mikroskopu, zaobserwowano nieprostokątność przeciętych powierzchni. W większości przypadków występowała tendencja do zwężania się strugi w kierunku wyjścia.
- W dwu- i trzywarstwowych strukturach stal 316L – kompozyt węglowy oraz stal 316L – poliamid PA6 – kompozyt węglowy zaobserwowano gwałtowną zmianę kąta

ukosowania powierzchni powstałej po cięciu. Gdy struga wodno-ścierna wchodzi w próbkę od strony stali 316L, wtedy się zwęża, a następnie po dotarciu do spoiny klejowej gwałtownie się rozszerza w kierunku wyjścia. Wartości kątów ukosowania powierzchni rosną wraz ze wzrostem prędkości posuwu. Natomiast gdy wejście strugi następuje od strony kompozytu węglowego, takie zjawisko nie występuje – struga zwęża się na całej grubości cięcia.

- W przypadku kombinacji stopu aluminium 2017A z poliamidem PA6 również następuje zmiana kąta ukosowania powierzchni powstałej po cięciu, jednak nie jest to tak gwałtowne jak w przypadku połączenia stali 316L i kompozytu węglowego. Gdy proces cięcia rozpoczyna się od strony poliamidu PA6, takie zjawisko nie występuje – struga minimalnie się zwęża.

* * *

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność zastosowania wysokociśnieniowej strugi wodno-ścierniej do cięcia struktur przekładkowych. Dzięki odpowiednio dobranym parametrom technologicznym można uzyskać dobrą jakość przeciętych powierzchni. Ważna jest także strategia obróbki, zwłaszcza gdy cechy fizyczne materiałów użytych w strukturze przekładkowej istotnie się od siebie różnią.

LITERATURA

1. Borkowski P.J. „Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych”. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010.
2. Borkowski P.J. „Teoretyczne i doświadczalne podstawy hydrostrumieniowej obróbki powierzchni”. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2004.
3. Klimpel A. „Cięcie strumieniem wody. Technologia i zastosowania przemysłowe – cz. II”. *STAL Metale & Nowe Technologie*. 3–4 (2013): s. 18–23.
4. Kłonica M. „Analiza powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną klejonych materiałów polimerowych”. *Przetwórstwo Tworzyw*. 2 (2016): s. 71–78.
5. Kłonica M., Kuczmaszewski J. „Analiza cech geometrycznych powierzchni po cięciu hydroabrazywnym konstrukcji przekładkowych”. *Przegląd Spawalnictwa*. 9 (2016): s. 135–140.
6. Kuczmaszewski J. „Fundamentals of metal-metal adhesive joint design”. Lublin: Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie, 2006.
7. Montesano J., Bougherara H., Fawaz Z. „Influence of drilling and abrasive water jet induced damage on the performance of carbon fabric/epoxy plates with holes”. *Composite Structures*. 163 (2017): s. 257–266.
8. Shukla R., Singh D. „Experimentation investigation of abrasive water jet machining parameters using Taguchi and Evolutionary optimization techniques”. *Swarm and Evolutionary Computation*. 32 (2017): s. 167–183.
9. Skoczylas A. „Analiza porównawcza procesu cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym”. *Advances in Science and Technology*. 8 (2011): s. 121–128.
10. Spadło S., Krajcarz D., Młynarczyk P., Bańkowski D. „Kształtowanie jakości powierzchni przecięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną”. *Logistyka*. 6 (2014): s. 9876–9883.
11. Sutowska M. „Wskaźniki jakości procesu cięcia materiałów strugą wodno-ścierną”. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. 5 (2011): s. 535–537.
12. Żenkiewicz M. „Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”. Warszawa: WNNT, 2000.