

BADANIA SKUTECZNOŚCI KLEJENIA KOMPOZYTU WĘGLOWEGO

Research on the effectiveness of carbon composite bonding

Mariusz KŁONICA

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczące skuteczności klejenia kompozytu węglowego. Skoncentrowano się na badaniach porównawczych wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych z udziałem kompozytu węglowego, z użyciem różnych klejów konstrukcyjnych. Ponadto w pracy przedstawiono wybrane parametry chropowatości powierzchni 2D oraz 3D.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, warstwa wierzchnia, kompozyt węglowy

Abstract: The paper presents the results of research on the effectiveness of carbon composite bonding. Concentrations on comparative shear strength studies of carbon composite joints using various structural adhesives. In addition, the work presents selected parameters of surface roughness 2D and 3D.

Keywords: adhesive joints, surface layer, carbon composite

Wstęp

Połączenia adhezyjne (zwłaszcza klejenie) są coraz częściej stosowane w przemyśle. Jest to związane z wieloma zaletami klejów i połączeń klejowych [9, 11, 12]. Technika wykonywania połączeń klejowych, dzięki postępowi w dziedzinie chemii materiałów adhezyjnych ciągle się rozwija, a jej znaczenie w przemyśle nieustannie wzrasta.

Połączenia klejowe w technologii montażu maszyn i urządzeń zyskują coraz większe zainteresowanie spośród różnych rodzajów wykonywanych w przemyśle połączeń materiałów konstrukcyjnych [10, 14]. Jest to spowodowane szybkim rozwojem materiałów adhezyjnych stosowanych w przemyśle. W nowoczesnych konstrukcjach często projektuje się elementy maszyn z kompozytów, m.in. z kompozytu węglowego. Skuteczność wykonywania połączeń klejowych w dużym stopniu zależy od doboru odpowiedniego kleju oraz od uzyskanych parametrów powierzchni łączonych elementów [1, 2, 5].

Celem pracy było określenie skuteczności łączenia kompozytu węglowego z wykorzystaniem klejów. W pracy analizie poddano konstrukcje klejone różnymi klejami, istotnie różniącymi się sztywnością.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z kompozytu węglowego o wymiarach 3,4×25×100 mm. Złącze klejowe wykonano z użyciem trzech klejów: Loctite EA 9484, Loctite 4090 oraz Loctite EA 9466. Wszystkie próbki oczyszczono i odtłuszczono trzykrotnie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, a następnie sklejono. Proces sieciowania kleju przebiegał

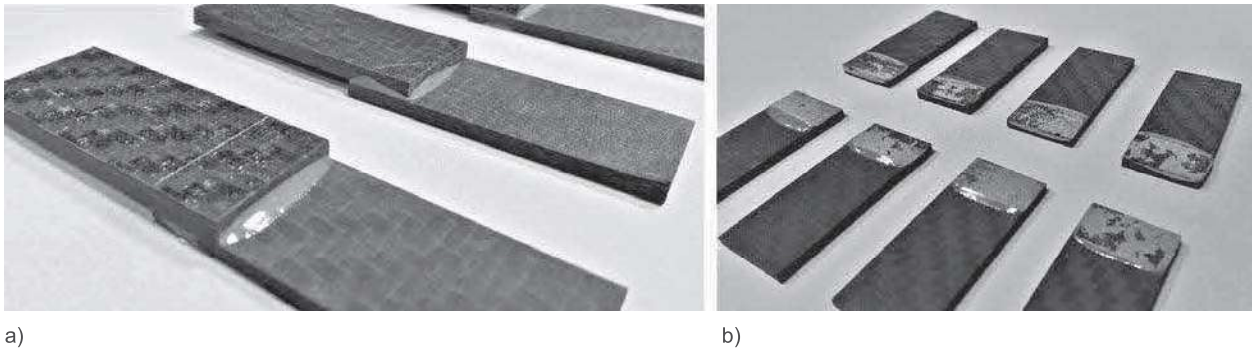
w temperaturze otoczenia wynoszącej 21–24°C, przy wilgotności względnej 45–55%. Wartość ciśnienia jednostkowego wywieranego na powierzchnię próbek w procesie klejenia wynosiła 0,2 MPa. Czas utwardzania ustalono na stałym poziomie 168 godz.

W tab. I przedstawiono wybrane właściwości użytych klejów w stanie utwardzonym.

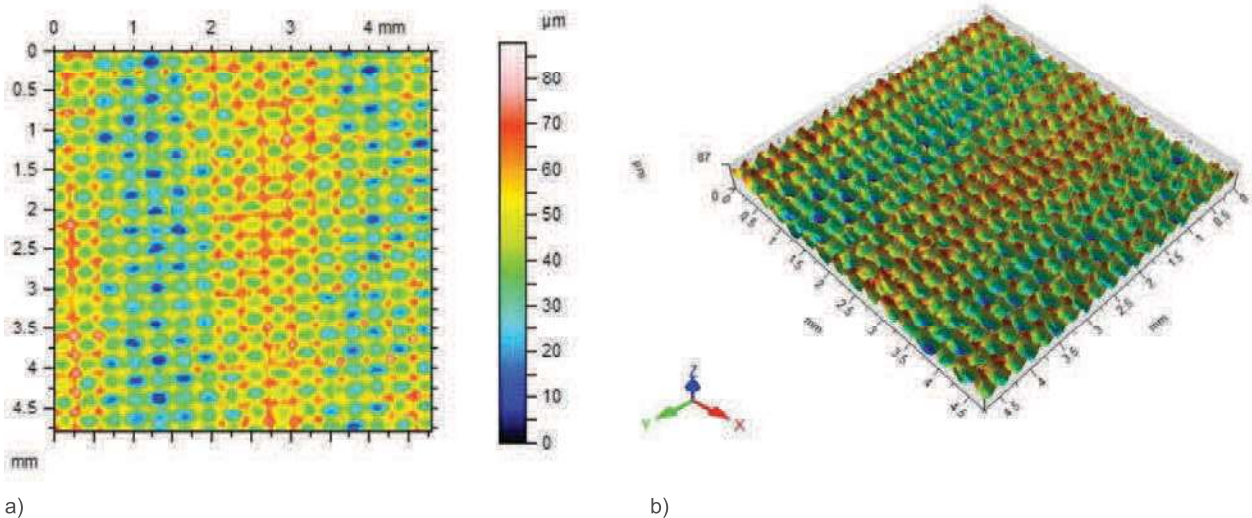
Tabela I. Wybrane właściwości kleju w stanie utwardzonym [6-8]
Table I. Selected properties of the adhesive in the hardened state [6-8]

Właściwości fizyczne	Loctite EA 9484	Loctite 4090	Loctite EA 9466
Wytrzymałość na rozciąganie (ASTM D882), N/mm ²	15	7,1	32
Wydłużenie (ASTM D882), %	50	3,6	3
Moduł sprężystości (ASTM D882), N/mm ²	161	565	1718
Twardość (ASTM D1706), Shore D	55	65	60

Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni przeprowadzono na urządzeniu do pomiaru konturu, chropowatości i topografii 3D T8000 RC-120-400 firmy Hommel-Etamic. Urządzenie to było wyposażone w końcówkę pomiarową o promieniu 2 μm. Wybrane parametry chropowatości powierzchni 3D analizowano z obszaru o wymiarach 4,8×4,8 mm. Analizie poddano następujące parametry chropowatości powierzchni [4]: R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, R_p – maksymalna wysokość piku



Rys. 1. Próbkę wykonano z kompozytu węglowego z udziałem kleju Loctite EA 9484: a) przed zniszczeniem, b) po zniszczeniu
 Fig. 1. Samples made of carbon composite with Loctite EA 9484 adhesive: a) before destruction, b) after destruction



Rys. 2. Topografia powierzchni kompozytu węglowego: a) mapa 2D, b) widok izometryczny powierzchni
 Fig. 2. Topography of the carbon composite surface: a) 2D map, b) isometric view of the surface

profilu chropowatości, Rq – odchylenie średnie kwadratowe profilu chropowatości, Rt – całkowita wysokość profilu chropowatości, Rz – maksymalna wysokość profilu chropowatości, Rv – maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości, Rc – średnia wysokość elementów profilu chropowatości. Przedstawione w artykule parametry z badań są zgodne z normą PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010P [13]. W badaniach analizie poddano również wybrane parametry chropowatości powierzchni 3D: Sa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu, Sq – średnia kwadratowa rzędnych profilu, Sp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu, Sv – wartość najniższego wgłębienia profilu oraz Sz – maksymalna wysokość profilu.

W celu zobrazowania powierzchni kompozytu węglowego w badaniach wykorzystano mikroskop Keyence VHX-5000.

Badania wytrzymałości na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone zgodnie z normą DIN EN 1465 [3] na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z 150. Odległość uchwytów przy

pozycji startowej wynosiła 85 mm, natomiast prędkość trawersy podczas próby niszczącej wynosiła 2 mm/min. Liczebność próbek w każdej serii wynosiła 7.

Wyniki

Na rys. 1 przedstawiono widok próbek wykonanych z kompozytu węglowego. Do wykonania próbek zastosowano klej Loctite EA 9484. Rysunek 1a przedstawia próbki przed zniszczeniem, a rys. 1b próbki po zniszczeniu. Zaobserwowano adhezyjno-kohezyjny charakter zniszczenia próbek z wykorzystaniem kleju Loctite EA 9484.

Na rys. 2 przedstawiono topografię powierzchni kompozytu węglowego od strony wykonania połączenia klejowego. Rysunek 2a przedstawia mapę 2D, natomiast rys. 2b to widok izometryczny powierzchni kompozytu węglowego o wymiarach 4,8×4,8 mm.

Na przedstawionym rys. 2 zaobserwowano charakterystyczny dwukierunkowy układ struktury dla kompozytu węglowego.

W tab. II przedstawiono uśrednione wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni 2D próbek wykonanych z kompozytu węglowego.

Tabela II. Wybrane parametry chropowatości powierzchni 2D
Table II. Selected parameters of surface roughness 2D

	<i>Rp</i> [μm]	<i>Rv</i> [μm]	<i>Rz</i> [μm]	<i>Rc</i> [μm]	<i>Rt</i> [μm]	<i>Ra</i> [μm]	<i>Rq</i> [μm]
Wartość średnia	18,1	14,9	33,2	24,8	37,2	7,34	8,55
Odczylenie standardowe	1,32	1,26	1,95	1,74	1,89	1,04	0,97

Na podstawie analizy uzyskanych wyników parametrów chropowatości powierzchni 2D stwierdzono odpowiedni stopień rozwinięcia analizowanej powierzchni pod technologię klejenia. Uzyskane wyniki charakteryzują się niewielkim rozrzutem wokół wartości średniej. Maksymalna wartość odchylenia standardowego wynosiła 1,95

dla parametru *Rz* chropowatości powierzchni, natomiast najmniejszą wartość odchylenia standardowego zaobserwowano dla parametru chropowatości powierzchni *Rq* i wynosiła ona 0,97.

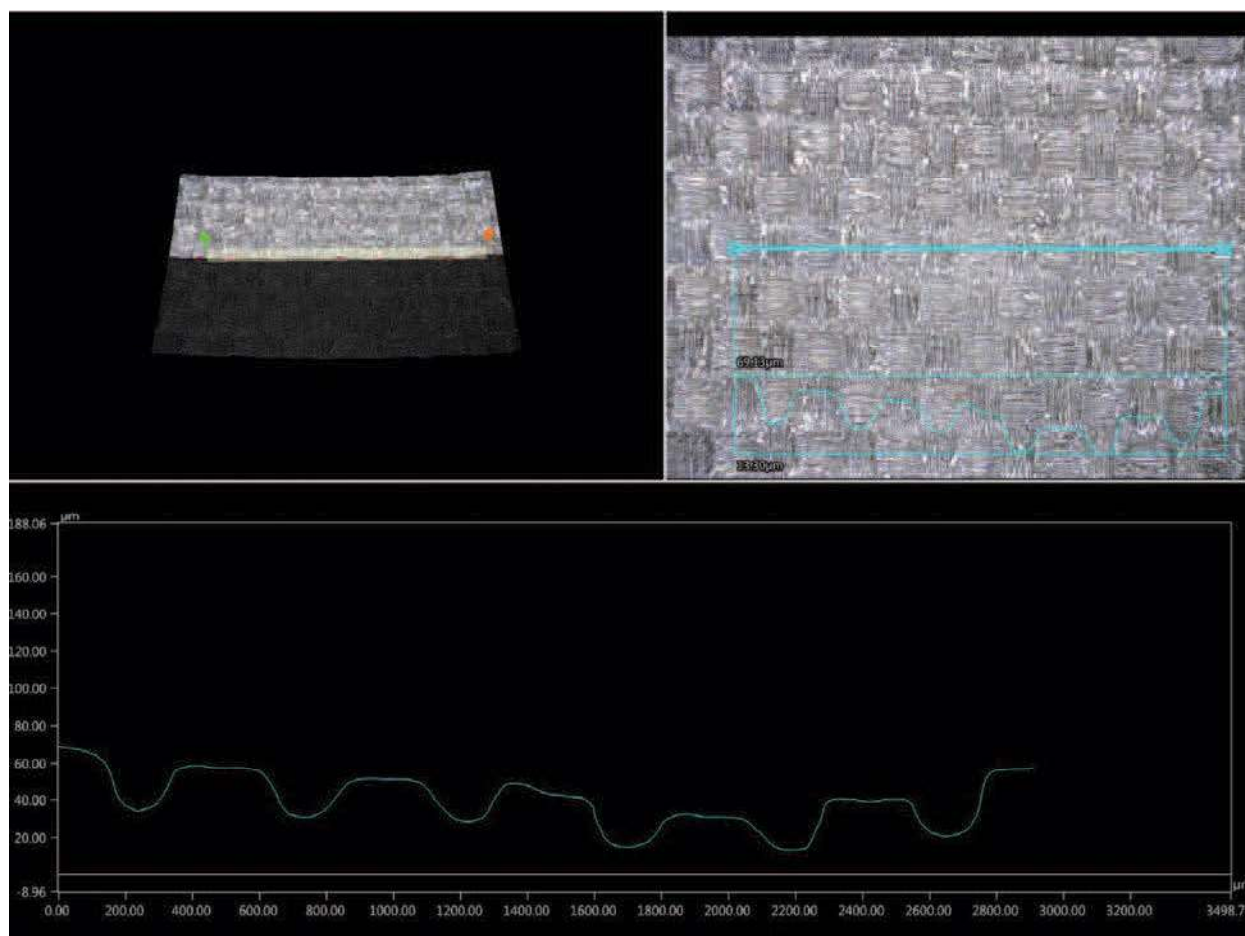
W tab. III zestawiono wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni 3D analizowanych próbek.

Tabela III. Wybrane parametry chropowatości powierzchni 3D
Table III. Selected parameters of surface roughness 3D

Parametry	<i>Sq</i> [μm]	<i>Sp</i> [μm]	<i>Sv</i> [μm]	<i>Sz</i> [μm]	<i>Sa</i> [μm]
Wartość	13,2	43,7	43,8	87,5	10,2

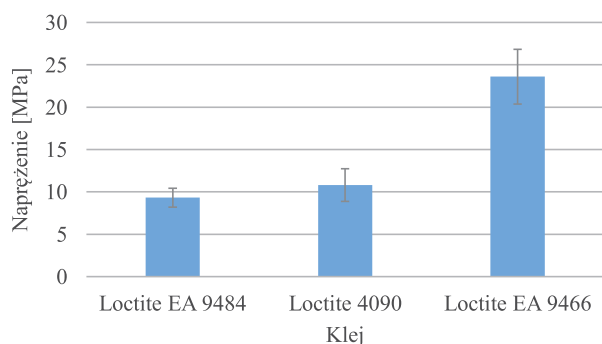
Przedstawione wartości parametrów chropowatości uzyskano z analizowanej powierzchni o wymiarach (4,8×4,8) mm. Analizie poddano ważniejsze parametry chropowatości powierzchni 3D ze względu na technologię klejenia. Wartość parametru *Sz* z analizowanego obszaru powierzchni próbki wynosiła 87,5 μm, natomiast parametr *Sa* charakteryzował się wartością ok. 10 μm.

Na rys. 3 przedstawiono topografię powierzchni kompozytu węglowego z zaznaczonym charakterystycznym profilem chropowatości. Zdjęcie wykonano przy powiększeniu ×100.



Rys. 3. Topografia powierzchni kompozytu węglowego z zaznaczonym profilem chropowatości powierzchni
Fig. 3. Topography of carbon composite with marked surface roughness profile

Analiza przedstawionego profilu (rys. 3) może stanowić istotny element oceny jakości powierzchni elementów przeznaczonych pod technologię adhezyjne.



Rys. 4. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych z kompozytu węglowego
Fig. 4. Shear stress obtained in experimental studies for carbon composite samples

Na rys. 4 przedstawiono wartości napężenia ścinającego, uzyskanego w badaniach eksperymentalnych dla próbek klejonych różnymi klejami. Największe wartości naprężeń niszczących zaobserwowano dla próbek klejonych klejem Loctite EA 9466, które wynosiły ok. 24 MPa przy odchyleniu standardowym 3,24. Najmniejsze wartości napężenia ścinającego odnotowano dla kleju Loctite AE 9484.

Dla wszystkich użytych klejów uzyskano pole powierzchni klejonych próbek na tym samym poziomie. Powierzchnia pola sklejania ma istotne znaczenie podczas prób wytrzymałościowych, a ponadto wpływa na rozrzut uzyskanych wyników z badań niszczących.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym:

1. Powierzchnia kompozytu węglowego nie wymaga stosowania dodatkowej obróbki w celu rozwinięcia powierzchni w sensie geometrycznym.
2. Największe wartości wytrzymałości połączenia klejowego uzyskano dla próbek klejonych klejem Loctite EA 9466.
3. Najmniejszy rozrzut (odchylenie standardowe) wyników napężenia niszczącego uzyskano dla próbek klejonych klejem Loctite EA 9484 i wynosiły 1,1, natomiast największy uzyskano dla próbek wykonanych z użyciem kleju Loctite EA 9466 i wynosiły 3,24.

4. Pole powierzchni sklejania próbek dla wszystkich klejów uzyskano na tym samym poziomie ok. 330 mm².

LITERATURA

- [1] Blicharski M. 2009. „Inżynieria powierzchni”. Warszawa: WNT.
- [2] Ciecierska B., R. Perłowski. 2013. „Swobodna energia powierzchniowa wybranych materiałów lotniczych po obróbce laserowej”. *Technologia i Automatyka Montażu* (1): 56–62.
- [3] DIN EN 1465:2009-07: Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
- [4] Humienny Z. (red.). 2001. „Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: 540.
- [5] Jańczuk B., T. Biało Piotrowicz. 1987. „Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów”. *Polimery* (32): 269–271.
- [6] Karta technologiczna produktu firmy Loctite 4090, dostęp 07.2014.
- [7] Karta technologiczna produktu firmy Loctite 9466, dostęp 2.01.2003.
- [8] Karta technologiczna produktu firmy Loctite 9484, dostęp 07.2003.
- [9] Kłonica M. et. Al. 2016. “Polyamide 6 surface layer following ozone treatment”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (64): 179–187.
- [10] Kubit A., T. Mączka. 2012. „Zastosowanie techniki wizyjnej w pomiarze odkształcenia bezwzględnej warstwy kleju w spoinie”. *Pomiary Automatyka Robotyka* (5): 91–97.
- [11] Kuczmaszewski J. 2006. “Fundamentals of metal-metal adhesive joint design”. Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie.
- [12] Kwiatkowski M. et. al. 2013. “Comparative analysis of energetic properties of Ti6Al4V titanium and EN-AW-2017A(PA6) aluminum alloy surface layers for an adhesive bonding application”. *Ozone-Science & Engineering* 35 (3): 220–228.
- [13] PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010P: Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [14] Zielecki W. et. al. 2013. “Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pretreatment”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13 (2): 175–185.

dr inż. Mariusz Kłonica – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-640 Lublin, e-mail: m.klonica@pollub.pl