

Wojciech ZIÓLKOWSKI¹, Maciej KOTYK², Paweł MAĆKOWIAK³

WPLYW GRUBOŚCI ELEMENTÓW ŁĄCZONYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAKŁADKOWEGO POŁĄCZENIA KLEJONEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki autorskich badań wpływu grubości łączonych ze sobą blach na wytrzymałość złącza klejonego. Obiekt badań stanowiły łączone w sposób zakładkowy za pomocą kleju Plexus MA 300 płaskowniki wykonane ze stopu aluminium PA 9. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że grubość łączonych blach w badanym zakresie wpływa na wytrzymałość złącza, przy czym wytrzymałość rośnie wprost proporcjonalnie do grubości łączonych blach.

Słowa kluczowe: wytrzymałość połączenia klejonego, połączenie zakładkowe, naprężenia maksymalne, wpływ grubości

1. ANALIZA LITERATURY

Kleje do łączenia materiałów stosowano już w starożytnym Egipcie. Do tego typu połączeń wykorzystywano składniki naturalne, takie jak żywice drzewne. Naturalnie wówczas nie opracowano na szeroką skalę innych metod spajania, jednak technologia łączenia za pomocą klejów jest bezspornie wykorzystywana do czasów współczesnych, choć przy zastosowaniu innego rodzaju spoiw [4].

Wzmiankowane w temacie pracy połączenia działają na zasadzie sił adhezji pomiędzy łączonymi materiałami. Niekiedy, aby wspomniane siły wystąpiły, pomiędzy materiałami nie musi być spoiwa. Proces łączenia opiera się wówczas na odpowiednim przygotowaniu materiałów łączonych (lub jego warstw). Doskonałym przykładem takiego zastosowania własności materiałów jest drukowanie w technologii 3D. Do łączenia poszczególnych warstw w tym procesie nie stosuje się klejów, a odpowiednio: nagrzewa, nakłada, a później chłodzi poszczególne warstwy materiału [6, 9, 13].

Wspomniane metody łączenia należą do rozwiązań niszowych. Można je zakwalifikować do metod tak zwanego szybkiego prototypowania, a wytworzony w opisywany sposób produkt stanowi częściej model (prototyp), a nie produkt finalny.

W zastosowaniach przemysłowych połączenia realizowane wskutek działania sił adhezji polegają na wprowadzeniu pomiędzy łączone warstwy dodatkowego materiału w postaci spoiwa (kleju). Połączenia tego typu z punktu widzenia obliczeń inżynierskich są obciążone dużą niepewnością w stosunku do innych, takich jak połączenia kształtowe lub spawane.

¹ Wojciech ZIÓLKOWSKI, UTP Bydgoszcz, e-mail: wojciech.ziolkowski96@gmail.com

² dr inż. Maciej KOTYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ mgr inż. Paweł MAĆKOWIAK, UTP Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

Liczne badania prowadzone w zakresie wytrzymałości połączeń klejonych są realizowane z co najmniej dwóch powodów. Pierwszym z nich jest atrakcyjność ekonomiczna i czasowa stosowania tego typu połączeń, drugim zaś duża niepewność dotycząca wytrzymałości opisywanych spoin [1]. Z analizy literatury przedstawiającej badania własności mechanicznych połączeń klejonych wynika, że są dwa kierunki badań. Są to badania prowadzone w celu określenia własności mechanicznych samego materiału kleju oraz badania połączeń w różnych cechach geometrycznych.

1.1. Analiza literatury z zakresu wyznaczania własności mechanicznych klejów

Badania naukowe, w których wyznaczano własności mechaniczne kleju z zakresu wytrzymałości statycznej, gdzie badane próbki były wykonane wyłącznie z kleju, przedstawiono w pracy [10]. Autorzy poza obszernym opisem opracowanej metody wykonywania (odlewnia) próbek zaprezentowali przykładowe wyniki badań monotonicznie narastającego obciążenia.

W publikacji [8] przedstawiono wyniki badań kleju pochodzącego z materiału spoiny, ale na próbkach okrągłych. Omówiono przykładowe wyniki badań ściskania z monotonicznym przyrostem obciążenia wspomnianych próbek.

Podobne podejście w sposobie badania zaprezentowano w pracy [5], gdzie również wyznaczano własności mechaniczne klejów epoksydowych, wykonanych wyłącznie z materiału kleju, ale w nieco innym ujęciu niż we wcześniej wymienionych artykułach. W artykule przedstawiono wyniki badań odporności na uderzenie z zastosowaniem młota Charpy'ego. W rozpatrywanym przypadku w sposób szczególny podkreślono zasadniczą trudność polegającą na usunięciu pęcherzy powietrza z przygotowywanej próbki.

Badania wytrzymałości spoiny klejonej prowadzi się nie tylko w warunkach otoczenia, ale także w podwyższonych temperaturach. W pracy [2] Da Silva oraz Adams – oprócz szerokiej analizy SEM mikrostruktury kleju – przedstawili również wyniki autorskich badań, w których wyznaczali spadek własności mechanicznych kleju wskutek działania temperatur dochodzących do 200°C.

1.2. Analiza literatury z zakresu wyznaczania własności mechanicznych połączeń klejonych

W literaturze zdecydowanie częściej występują prace, w których omawia się badania nie tylko wyłącznie kleju, ale całego połączenia. Odzwierciedla to rzeczywiste warunki eksploatacyjne, w jakich elementy ze złączami klejowymi są eksploatowane. Ze względu na znaczne zróżnicowanie obiektów technicznych w przedmiotowej literaturze można odnaleźć informacje o badaniach naukowych wykonywanych na próbkach o zróżnicowanej geometrii.

Doskonały przykład badań połączenia klejonego, a nie wyłącznie próbek pochodzących z materiału spoiny omówiono w pracy [3]. Dokonano analizy wybranych metod wyznaczania własności mechanicznych różnego rodzaju typów połączeń klejonych. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych

połączeń klejonych, będące przykładem praktycznego zastosowania omawianych w artykule metod.

Nie zawsze jednak geometria próbki jest modelem połączenia rzeczywistego. Niekiedy kształt złącza poddanego eksperymentowi ułatwia wyznaczenie ściśle określonych wielkości mechanicznych. Przykładem pracy, która w szerszy sposób prezentuje to zagadnienie, jest artykuł [11], w którym autorzy opisują metody wyznaczania modułu Kirchhoffa oraz współczynnika Poissona. W analizowanym przypadku kształty próbki nie są odwzorowaniem połączenia. Mają jedynie ułatwić wyznaczenie charakterystyk mechanicznych w sposób jednoznaczny (normatywny). Naturalnie opracowanie to jest pewnym rozwinięciem stosownych norm, jednak Maćkowiak i współautorzy prezentują metody wyznaczania tych wartości na próbkach o określonej już geometrii [11].

W artykule [6] dokonano analizy rozkładu naprężeń w zakładkowym połączeniu klejonym. Badaniu poddano różne kleje, w tym klej Plexus MA 300. Według autorów, rozkład w takim połączeniu ma charakter paraboliczny, przy czym wierzchołek paraboli, a więc zerowa wartość naprężeń (punkt zmiany zwrotu wektora naprężeń) przypada na środku połączenia zakładkowego.

Omawiane zagadnienie jest również obiektem analiz numerycznych. Propozycję modelu numerycznego połączenia zakładkowego zaprezentowano w pracy [12]. Autor podkreśla, jest to model uproszczony, jednak zaprezentowane podejście wskazuje, że problem połączeń klejonych, w tym także zakładkowych, jest zagadnieniem aktualnym, rozpatrywanym na wielu płaszczyznach – zarówno naukowych, jak i technicznych.

Po dokonaniu analizy wybranych pozycji literaturowych z zakresu tematycznego stwierdzono zasadność prowadzenia badań naukowych dotyczących wyznaczania wytrzymałości zakładkowych połączeń klejonych.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

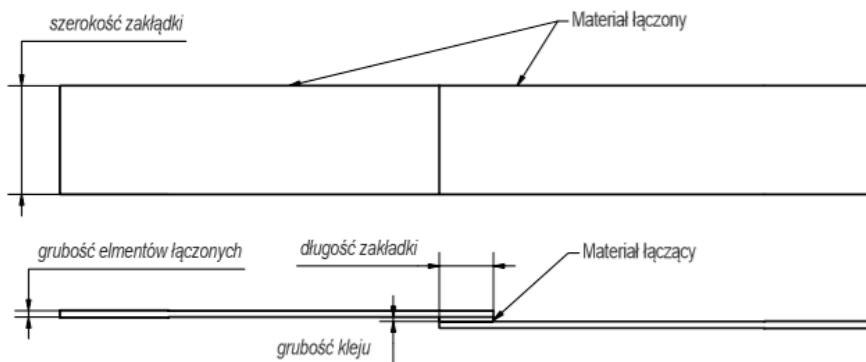
2.1. Obiekt badań

Badaniu poddano próbki w postaci zakładkowych połączeń klejonych, wykonanych w oparciu o normę PN EN 1456. Schematyczne przedstawienie opisywanego połączenia zaprezentowano na rysunki 1. Materiałem łączonym były blachy wykonane z aluminium PA9 o grubościach kolejno 1,5 mm, 3 mm oraz 5 mm. Pozostałe cechy geometryczne badanych próbek nie zmieniały się.

Głównym powodem, dla którego zdecydowano się na prowadzenie badań we wskazanym zakresie, jest eksperymentalna weryfikacja zaleceń producenta kleju. Dodatkowo zalecenia te w żaden sposób nie uwzględniają sztywności materiału łączonego za pomocą kleju. Przy tak szerokiej gamie materiałów, które według producenta można łączyć za pomocą badanego kleju, uwzględnienie w zaleceniach sztywności materiałów łączonych zdaniem autorów pracy wydaje się zasadne.

Spoiłem, jakie zastosowano do łączenia blach, był klej metakrylowy Plexus MA 300. Wybrane tworzywo adhezyjne ma czas wiązania wynoszący 4–6 minut

oraz uzyskuje 75% docelowej wytrzymałości w 10–15 minut. Klej umożliwia ponadto łączenie termoplastów, metali i kompozytów, co sprawia, że jest wykorzystywany w budowie maszyn i urządzeń.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zakładkowego połączenia klejonego

Fig. 1. Diagram of the overlap adhesive bond

2.2. Przygotowanie próbek

Proces klejenia rozpoczął się od przygotowania materiałów łączonych. Błachy poddano jednostronnemu piaskowaniu ścierniwem elektrokorundowym na odległość odpowiadającej długości zakładki. Następnie elementy łączone odtłuszczone jednokrotnie przy użyciu środka Cleaner MC 6060. Po osuszeniu płaszczyzn przystąpiono do procesu klejenia. Do tego celu użyto wcześniej przygotowanych form drewnianych, uniemożliwiających przemieszczenie łączonych elementów podczas spajania. Wspomniane formy zapewniały również powtarzalność wymiarów połączenia zakładkowego oraz umożliwiały zrealizowanie właściwego docisku spajanych ze sobą elementów. Wykonane połączenia zakładkowe, po usieciowaniu kleju, wyjęto z form i usunięto wypływki.

W opisywany sposób, zgodnie z założeniami przedstawionymi w pkt. 2.1, wykonano 3 rodzaje próbek różniących się grubością, a dla każdej z nich wykonano po 6 próbek.

2.3. Przebieg badań

Badania rozpoczęto od zmierzenia wymiarów geometrycznych (rys. 1). Następnie modele połączenia zakładkowego poddano próbie monotonicznie narastającego obciążenia, trwającego do momentu zerwania połączenia klejonego. Pomiarzy zostały przeprowadzone bez użycia ekstensometru. Seria eksperymentów została przeprowadzona na maszynie wytrzymałościowej Instron 5966. Dla każdej z próbek prędkość rozciągania wynosiła $0,05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Próbkę zamocowaną w szczękach maszyny wytrzymałościowej zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Próbką zamocowana w uchwycie maszyny wytrzymałościowej

Fig. 2. Sample clamped in the testing machine handle

2.4. Wyniki badań

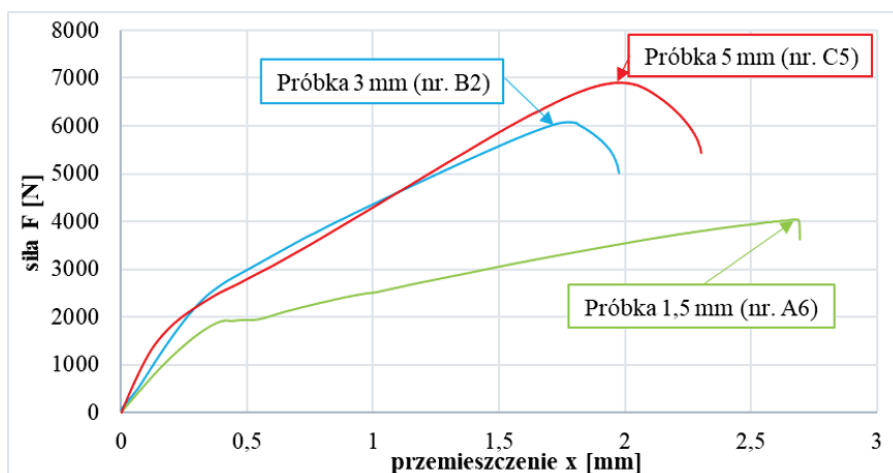
Uśrednione wartości charakteryzujące podstawowe wielkości geometryczne badanych próbek (zgodnie z rys. 1) zestawiono w tabeli 1. Należy zaznaczyć, że szczególnie istotna jest długość zakładki.

Tabela 1. Uśrednione wartości cech geometrycznych próbek

Table 1. Averaged values of geometrical quantities of the sample

Rodzaj próbki	Szerokość zakładki [mm]	Odch. standard.	Długość zakładki [mm]	Odch. standard.	Grubość kleju [mm]	Odch. standard.
Próbka 1,5 mm	24,97	0,24	13,58	0,31	0,89	0,17
Próbka 3 mm	24,75	0,48	13,32	0,66	0,84	0,15
Próbka 5 mm	24,92	0,08	13,37	0,21	0,99	0,10

W wyniku przeprowadzenia wcześniej wspomnianych prób monotonicznie narastającego obciążenia wyznaczono przebieg krzywej siła – przemieszczenie, dla poszczególnych rodzajów próbek. Wybrane z nich przedstawiono na rysunku 3. Natomiast wyniki badań eksperymentalnych wraz z wynikami obliczeń dla wszystkich próbek oraz grubości blach łączonych zestawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Wybrane przebiegi siła – przemieszczenie dla poszczególnych grubości łączonych blach
Fig. 3. Selected curve – displacement, for individual thicknesses of joined sheets

Uzyskane wyniki badań odniesiono do pola przekroju badanego połączenia zgodnie z zależnością:

$$\tau = \frac{F_{MAX}}{S} \quad (1)$$

gdzie:

- τ – maksymalne naprężenia styczne występujące w połączeniu zakładkowym, tzw. naprężenia zrywające [MPa],
- F_{MAX} – maksymalna siła zmierzona podczas badania poszczególnych próbek [N],
- S – pole powierzchni klejonej poszczególnych próbek [mm²].

Tabela 2. Zestawienie wyników badań

Table 2. Summary of test results

Lp.	Obciążenie [N]			Naprężenie [MPa]			Odształcenie [mm]		
	1,5	3	5	1,5	3	5	1,5	3	5
1	4139,73	5708,07	6614,85	11,86	16,14	20,00	2,30	1,72	2,18
2	3617,32	6082,50	6895,75	10,46	18,64	20,87	1,75	1,99	2,12
3	4386,12	5903,97	7470,69	12,63	17,24	22,01	3,04	1,78	2,51
4	3061,61	6256,04	7479,34	9,44	20,06	23,98	1,75	2,14	3,10
5	4121,65	6430,20	6910,05	12,58	20,29	21,81	2,44	2,02	2,32
6	4042,27	6229,01	6839,01	11,98	19,06	22,84	2,70	1,78	2,32

2.5. Analiza wyników badań

Zgodnie z informacjami zaprezentowanymi w części 2, średnie wartości wymiarów szerokości i długości zakładki oraz grubości kleju poszczególnych rodzajów próbek są zbliżone, co pozwoliło ograniczyć wpływ geometrii próbek na wynik przeprowadzanej analizy porównawczej.

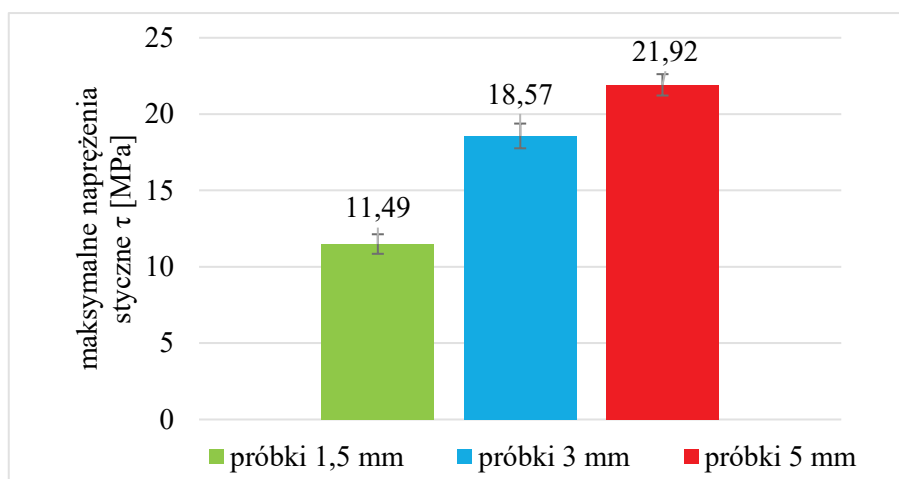
W tabeli 3 przedstawiono wartości średnie wyników pomiarów wpływu grubości blachy na wytrzymałość zakładkowego połączenia klejonego, natomiast na

rysunku 4 – średnie maksymalne wartości naprężeń stycznych zakładkowego połączenia klejonego dla poszczególnych grubości łączonych blach w formie graficznej.

Tabela 3. Uśrednione wartości wyników badań

Table 3. Averaged values of test results

Rodzaj próbki	Obciążenie [N]	Odch. standard.	Naprężenie [MPa]	Odch. standard.	Odkształcenie [mm]	Odch. standard.
próbka 1,5 mm	3894,78	478,71	11,49	1,28	2,33	0,51
próbka 3 mm	6101,63	261,67	18,57	1,62	1,91	0,17
próbka 5 mm	7034,95	356,99	21,92	1,41	2,43	0,35



Rys. 4. Średnie wartości siły zrywającej zakładkowe połączenie klejone dla poszczególnych grubości łączonych blach

Fig. 4. Average values of the destructive force of the lamellar joint for individual thicknesses of joined sheets

Na podstawie wartości średnich z otrzymanych wyników zauważono, iż zwiększanie grubości płaskowników spowodowało wzrost wartości siły zrywającej połączenie oraz zwiększenie wartości maksymalnych naprężeń stycznych. Zależność ta nie ma charakteru liniowego. Liczba zebranych wartości nie jest wystarczająca do zbudowania modelu określającego wpływ grubości na wytrzymałość połączenia.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że wraz ze wzrostem grubości blach wykonanych z PA9 rośnie również siła zrywająca zakładkowe połączenie klejone.

Zwiększenie grubości elementów łączonych powoduje wzrost sztywności zakładkowego połączenia klejonego. W konsekwencji, próbka podczas obciążania ulega mniejszemu odkształceniu, w związku z tym udział złożonego stanu naprężenia (konsekwencji wyboczenia próbki) zmniejsza się. Zdaniem autorów pracy wzrost sztywności próbek jest bezpośrednią przyczyną zwiększenia wartości naprężeń stycznych, niszczących połączenie.

W dalszych badaniach z tego zakresu sugeruje się zwiększanie grubości łączonych płaskowników, aby wyznaczyć takie cechy geometryczne, w których dalsze zwiększanie grubości elementów łączonych nie będzie wpływało na wzrost naprężeń niszczących zakładkowe połączenie klejone.

Wzrost wytrzymałości połączenia nie ma charakteru liniowego. W celu budowy modelu o szerszym zakresie, określającego wpływu grubości na wytrzymałość połączenia, sugeruje się zwiększyć liczbę rozpatrywanych grubości blach.

Uzyskane wyniki badań charakteryzują się niewielkim rozrzutem wyrażonym poprzez wartość odchylenia standardowego do wartości średniej (poniżej 11%), co w przypadku próbek klejonych korzystnie wpływa na jednoznaczność wyników badań.

LITERATURA

- [1] BĄBIŃSKI C., KOWALIK R., ZMYŚKO D., BIEŃCZAK R.: Projektowanie zakładów przemysłowych: tendencja postępu, architektura, budownictwo, projektowanie modelowe, laboratoria i elektrownie ciepłne. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
- [2] DA SILVA L.F.M., ADAMS R.D.: Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2, 2005, 109–141.
- [3] KARNY M.: Połączenia klejone w strukturach kompozytowych – metodyka badań. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 3, 2016, 97–108.
- [4] KOCANDA D., GÓRKA A.: Nowe technologie łączenia tarcowego metali. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2, 2010, 395–411.
- [5] KOMOREK A., KOWALIK R., ZMYŚKO D., BIEŃCZAK R.: Wpływ modyfikacji fizycznej na udarność kleju konstrukcyjnego. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 6, 2016, 921–923.
- [6] KOTYK M., MAĆKOWIAK P.: Badanie podstawowych właściwości mechanicznych próbek z tworzywa ABS wykonanych za pomocą drukarki 3D w zależności od stopnia ich wypełnienia. [W:] *Nauka niejedno ma imię*, Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2015, 34–52.
- [7] MAĆKOWIAK P., LIGAJ B.: Manufacture of specimens and mechanical properties determination of structural adhesives under static loading condition. *Engineering Mechanics*, 2018, 525–528.
- [8] MAĆKOWIAK P., LIGAJ B., PŁACZEK D., JASIŃSKA A.: Metody badania właściwości mechanicznych kleju metakrylowego stosowanego w budowie pojazdów. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 12, 2017, 1092–1095.
- [9] MAĆKOWIAK P., MAGDZIARZ D., KOTYK M., TOMKIEWICZ R., KABAT P.: Wielkość i liczba wad w elementach wyprodukowanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 4, 2016, 17–31.
- [10] MAĆKOWIAK P., PŁACZEK D., KOTYK M.: Determination of design mechanical properties of adhesives in a tensile and compression test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393, 2018, 1–8.

- [11] MAĆKOWIAK P., PŁACZEK D., SOŁTYSIAK A.: Metody wyznaczania modułu Kirchhoffa i współczynnika Poissona dla tworzyw adhezyjnych. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 5, 2017, 27–43.
- [12] MAJDA P.: Uproszczony model zakładkowego połączenia klejonego. *Modelowanie Inżynierskie*, 3, 2007, 93–98.
- [13] PEJKOWSKI Ł., ANDRZEJEWSKA A.: Wytrzymałość pojedynczej warstwy polilaktydu PLA wykonanej metodą druku 3D w warunkach monotonicznego rozciągania. *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, 8, 2016, 75–81.

THE INFLUENCE OF JOINED ELEMENTS THICKNESS ON THE STRENGTH OF A PLASTIC GLUE JOINT

Summary: The article presents the results of the author's research on the impact of thicknesses of joined sheets on the strength of the glued joint. In the experiment sheets welded together, made of aluminum PA 9, were welded together. Based on the tests of weld strength made of Plexus MA 300 adhesive, it was found that the thickness of the joined sheets in the tested range affects the strength of the joint, while the strength increases in direct proportion to the thickness of joined sheets.

Key words: bond strength, lap joint, maximum stress, thickness effect