



Badania spajania materiałów w układzie miedź – aluminium przy wykorzystaniu metody wyciskania bocznego wspomaganego tarciem

Testing of material bonding in a copper – aluminum system using friction-assisted lateral extrusion

(1) Michał Chruściński*, (2) Szymon Szkudelski, (3) Beata Pachutko, (4) Stanisław Ziółkiewicz
Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Polska

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 22.04.2016

Data recenzji: 16.06.2016

Data akceptacji: 30.06.2016

Wkład autorów

- (1) Opracowanie artykułu, przeprowadzenie badań spajania
- (2) Współpracowanie artykułu, metodyka, przeprowadzenie badań spajania
- (3) Wykonanie badań metalograficznych
- (4) Kierownik projektu, koncepcja, założenia, metodyka badań

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nowej metody spajania materiałów na zimno w układzie miedź – aluminium przy wykorzystaniu metody wyciskania bocznego wspomaganego tarciem. Metoda spajania polega na wyciskaniu bocznym umieszczonych wewnątrz pojemnika dwóch wsadów. W skutek połączenia siły osiowo działającej na wsad oraz siły tarcia generowanej przez obrotową tarczę następuje wyciśnięcie i połączenie dwóch materiałów. Cykl badań prowadzony był przy zmiennych prędkościach obrotowych: 8, 28 obr/min, przy dwóch wartościach siły wciskającej 31, 126 kN oraz przy trzech położeniach wsadu. Materiał spajany poddano odkształceniu ze stopniem przerobu $\lambda=8$. W badaniach wykorzystano miedź elektrolityczną M1E (99,9% Cu) oraz czyste aluminium 1050 (99,9 Al), dla których przebadano możliwość uzyskania połączenia z innymi stopami aluminium. Trwałe spojenie profili oraz jakość ich powierzchni uzyskano przy dużych prędkościach obrotowych i maksymalnej sile wciskającej wsad w obrotową tarczę. Istotny wpływ na uzyskanie spojenia profilu ma również ustawienie wsadu w pojemniku, trwałe spojenie uzyskano przy ustawieniu aluminium jako pierwsze względem kierunku obrotu tarczy. Ustawienie wsadu w tym położeniu gwarantuje uzyskanie trwałego połączenia profilu oraz wysoką jakość powierzchni. Dla uzyskanych połączeń wykonano obserwacje mikroskopowe oraz wykonano test jakości uzyskanego połączenia. Obserwacje mikroskopowe oraz test jakości wykonano na profilach uzyskanych w parametrach procesu: 28 obr/min tarczy oraz sile wciskającej równej 126 kN.

Słowa kluczowe: wyciskanie boczne, tarcie, spajanie, aluminium, miedź

Article info

Received: 22.04.2016

Reviewed: 16.06.2016

Accepted: 30.06.2016

Abstract

This article presents the test results of a new cold bonding method in a copper – aluminum system using friction-assisted lateral extrusion. The bonding method is based on lateral extrusion of two stocks placed inside a container. As a result of the combination of axial forces acting on the stock and friction generated by the rotating disk, the two materials are extruded and bonded. The testing cycle was conducted at different rotational speeds: 8, 28 rpm, at two values of pressing force 31, 126 kN, and at three stock positions. The bonded material was subjected to deformation with a degree of processing $\lambda=8$. M1E electrolytic copper (99.9% Cu) and pure 1050 aluminum (99.9% Al) were used in tests, and the possibility of achieving bonding with other aluminum alloys was tested for these materials. Permanent bonding of sections and their surface quality were obtained at high rotational speeds and at the maximum force pressing the stock into the rotating disk.

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: michal.chruscinski@inop.poznan.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 61 657 05 55; Fax: +48 61 657 07 21; e-mail: michal.chruscinski@inop.poznan.pl

Authors' contribution

- (1) Development of the article, research bonding
- (2) Co development of the article, methodology and testing bonding
- (3) Implementation of metallographic research
- (4) The head of the project, the concept, assumptions and research methodology

The stock's position in the container also had a significant impact on bonding of the section, and permanent bonding was achieved when aluminum was positioned first relative to the direction of the disk's rotation. This position of the stock guarantees achievement of permanent bonding of the section as well as high surface quality. Obtained bonds were observed under a microscope, and a quality test of the obtained bond was performed. Observations under a microscope and the quality test were also performed for sections obtained with process parameters: 28 rpm of disk and pressing force equal to 126 kN.

Keywords: lateral extrusion, friction, bonding, aluminum, copper

1. WSTĘP

Obecnie obserwujemy nieustające wysiłki ośrodków badawczych oraz przemysłowych nad opracowywaniem i wdrażaniem nowych technologii wytwarzania. Technologie te powinny charakteryzować się ograniczonym wpływem na środowisko, małą energochłonnością procesów technologicznych oraz nie znaczną emisją zanieczyszczeń do środowiska naturalnego. Przykładem technologii spełniającej powyższe kryteria może być spajanie metali [1–4].

W INOP podjęto prace nad opracowaniem nowej technologii spajania przy wykorzystaniu metody wyciskania bocznego wspomaganego tarcie. Badania doświadczalne procesu spajania metodą wyciskania bocznego wspomaganego tarcie obrotowej tarczy wykonano na stanowisku laboratoryjnym (rys. 1) w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu. Stanowisko badawcze zostało wyposażone w układy pomiarowe pozwalające na rejestrację parametrów procesu takich, jak: siła wciskania materiału w pobocznicy tarczy, moment obrotowy, droga stempla, kąt obrotu wału, temperatura matrycy, temperatura tarczy obrotowej, temperatura kształtowanego materiału. Urządzenie posiada możliwość nastawy takich parametrów, jak:

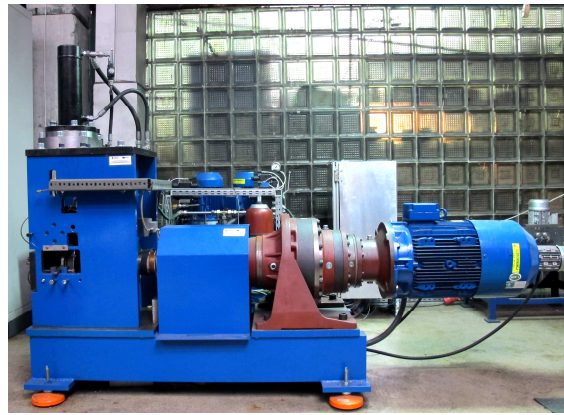
- siła wciskająca wsad w obrotową tarczę 31–126 kN, (prędkość liniowa siłownika to 30 mm/s),
- prędkość obrotowa tarczy – od 0 do 28 obr/min.

1. INTRODUCTION

We are currently observing continuous efforts by research and industrial centers to develop and implement new production technologies. These technologies should be characterized by limited environmental impact, low energy consumption of technological processes, and low emissions of pollution into the natural environment. Bonding of metals is an example of a technology that meets the aforementioned criteria [1–4].

Work has been undertaken at INOP to develop new bonding technology by means of friction-assisted lateral extrusion. Experimental studies of the bonding process by means of lateral extrusion assisted by friction with a rotating disk were conducted at a laboratory workstation (Fig. 1) at the Metal Forming Institute in Poznań (INOP). The research station was equipped with measuring systems allowing for registration of process parameters such as: force pressing the material onto the side surface of the disk, torque, path of punch, shaft angle of rotation, die temperature, temperature of rotating disk, temperature of formed material. The machine enabled setting of such parameters as:

- *force pressing the stock onto the rotating disk 31–126 kN, (linear speed of actuator equal to 30 mm/s),*
- *rotational speed of disk – from 0 to 28 rpm.*



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne

Fig. 1. Laboratory workstation

Metoda wyciskania bocznego wspomaganego tarcieciem powstała jako połączenie idei metody ECAP, gdzie materiał kształtowany przechodzi przez kątową matrycę oraz metody CONFORM, wykorzystującej tarcie koła roboczego względem materiału. Połączenie cech wyżej wymienionych metod pozwoliło na uzyskiwanie znacznego stopnia przerobu oraz wytworzenie silnie rozdrobnionej struktury. Uzyskiwane wyroby charakteryzują się zróżnicowanym stanem powierzchni zewnętrznej, a także stopniem rozdrobnienia struktury. Metoda wyciskania bocznego wspomaganego tarcieciem obrotowej tarczy pozwala na kształtowanie profili umożliwiając odkształcenie stali i metali nieżelaznych. Zakres obróbki zawiera się w przedziale od 20 do 650°C. [5]

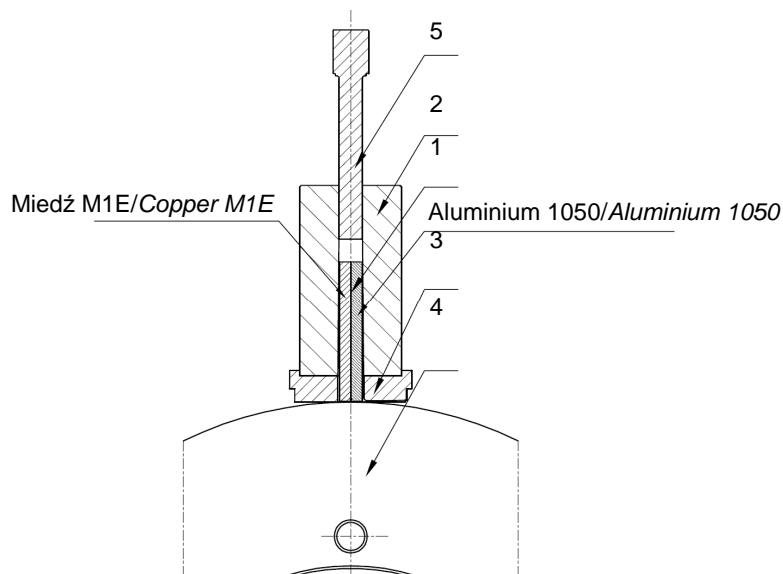
2. IDEA PROCESU

Na rys. 2 przedstawiono zasadę procesu spajania. Wsad (1) złożony z dwóch materiałów (miedzi i aluminium) umieszczony jest w przelotowym pojemniku (2), który z jednej strony zamknięty jest matrycą (3) z otworem z wyprofilowanym kształtem – kanałem bocznym. Otwór matrycy zamknięty jest obracającą się tarczą (4). Umieszczony w pojemniku wsad przy pomocy stępła (5) wciskany jest w tarczę. Złożenie siły osiowej wywieranej przez stempel z siłą tarcia obracającej się tarczy powoduje uplastycznienie, wypłynięcie oraz połączenie wsadu. Prezentowana metoda umożliwia łączenie materiałów z jednoczesnym ich formowaniem.[6].

The friction-assisted lateral extrusion method was created as a combination of the concept of the ECAP method, where the formed material passes through an angular die, and the CONFORM method, which uses friction between the working wheel and the material. The combination of the aforementioned features made it possible to achieve a high degree of processing as well as a highly refined structure. Obtained products are characterized by a varying condition of their exterior surface as well as by a varying degree of structural refinement. The method of lateral extrusion assisted by friction with a rotating disk makes it possible to form sections and enables deformation of steels and non-ferrous metals. The processing range is between 20 and 650°C. [5]

2. CONCEPT OF THE PROCESS

Fig. 2 presents the principle of the bonding process. The stock (1), consisting of two materials (copper and aluminum), is placed in a container with openings on both sides (2), closed on one side with a die (3) with a shaped opening – the lateral channel. The opening of the die is closed by the rotating disk (4). The stock placed in the container is pressed onto the disk by means of the punch (5). The combination of the axial force exerted by the punch and the friction with the rotating disk results in plasticization, flowing, and bonding of the stock. The presented method makes it possible to join materials while simultaneously forming them [6].



Rys. 2. Technologia spajania na zimno metodą wyciskania bocznego wspomaganą tarciem obracającej się tarczy

Fig. 2. Cold bonding technology utilizing lateral extrusion assisted by friction with the rotating disk

3. METODOLOGIA BADAŃ

Celem badań było rozpoznanie możliwości spajania metali nieżelaznych wykorzystując metodę wyciskania bocznego wspomaganego tarciem. Badania zostały wykonane dla wsadu o wymiarach 9x9x55 mm, złożonego z dwóch próbek, aluminiowej oraz miedzianej o wymiarach 4,5x9x55 mm. Próbkę wykonano z aluminium gatunku 1050 i miedzi elektrolitycznej M1E (99.9% Cu). Tabela 1 przedstawia program badań. Badania spajania realizowane były w trzech różnych ustawieniach wsadu dla dwóch różnych sposobów przygotowania powierzchni spajanych (szlifowanie i szczotkowanie). Pierwsza kolumna tabeli 1 przedstawia ustawienie wsadu względem kierunku obrotu tarczy. Badania były przeprowadzone w kombinacji ustawień maksymalnego i minimalnego ciśnienia wciskania wsadu w obracającą się tarczę oraz z maksymalną i minimalną prędkością obrotową tarczy.

Temperatura wsadu wyniosła 20°C. Tarczę smarowano grafitem przed procesem (dla uniknięcia naklejania się aluminium na tarczę). Przyjęty stopień odkształcenia $\lambda=8$.




3. METHODOLOGY OF TESTING

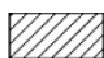
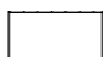
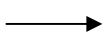
The objective of tests was to determine the possibilities of bonding non-ferrous metals by using the friction-assisted lateral extrusion method. Tests were performed for stock with dimensions of 9x9x55 mm, consisting of two specimens, aluminum and copper, with dimensions of 4.5x9x55 mm. Specimens were made of 1050 grade aluminum and M1E electrolytic copper (99.9% Cu). Tab. 1 presents the testing program. Bonding tests were performed in three different stock positions for two different methods of preparing bonded surfaces (polishing and brushing). The first column in Tab. 1 presents the stock's position relative to the direction of the disk's rotation. Tests were conducted for combinations of maximum and minimum settings of force pressing the stock onto the rotating disk as well as maximum and minimum rotational speeds of the disk.

The stock's temperature amounted to 20°C. The disk was lubricated with graphite before the process (to prevent adhesion of aluminum to the disk). Accepted degree of deformation $\lambda=8$.

Tab. 1. Plan badań spajania dwóch materiałów wyciskaniem bocznym

Tab. 1. Testing plan for bonding of two materials via lateral extrusion

Ustawienie próbek w matrycy <i>Position of specimens in die</i>	Ciśnienie robocze <i>Working Pressure</i> [bar]	Siła wciskania <i>Extrusion force</i> [kN]	Obroty tarczy <i>Disk rotational speed</i> [obr/min]/[rmp]
	40	31	8
	40	31	28
	160	126	8
	160	126	28
	40	31	8
	40	31	28
	160	126	8
	160	126	28
	40	31	8
	40	31	28
	160	126	8
	160	126	28

Legenda / Legend:— Miedź / *Copper*— Aluminium / *Aluminum*— Kierunek obrotu tarczy / *Direction of disk rotation***4. WYNIKI BADAŃ**

Przeprowadzone badania pokazały, że uzyskanie połączenia jest możliwe tylko dla próbek szczotkowanych przed procesem spajania. Trwałe połączenie, bez rozwarstwień na całej długości wyrobu uzyskano jedynie przy wykorzystaniu maksymalnej siły wciskającej (126 kN) oraz maksymalnych obrotów (28 obr/min). Spojenie uzyskano przy trzecim układzie ustawienia próbek (tabela 1), gdzie materiał miedziany znajduje się w styku z obrotową tarczą a aluminium w styku z matrycą podczas wypływu. Rys. 3, 4, 5 przedstawiają uzyskany wyrób w 3 różnych widokach. Cechą charakterystyczną uzyskanego wyrobu jest wypływka boczna materiału aluminiowego.

4. TEST RESULTS

Conducted tests showed that obtaining a bond is only possible for specimens that were brushed before the bonding process. A permanent bond, without delaminations throughout the entire length of the product, was only obtained when maximum pressing force (126 kN) and maximum rotational speed (28 rpm) were applied. Bonding was achieved for the third configuration of specimen positions (Tab. 1), where the copper material is found in contact with the rotating disk, and aluminum is in contact with the die during flow out of it. Fig. 3, 4, 5 present the obtained product in 3 different views. A side fin of the aluminum material is a characteristic feature of the obtained product.



Rys. 3. Próbką spojona, widok od strony tarczy

Fig. 3. Bonded specimen, view from side of disk



Rys. 4. Próbką spojona widok od strony matrycy

Fig. 4. Bonded specimen, view from side of die

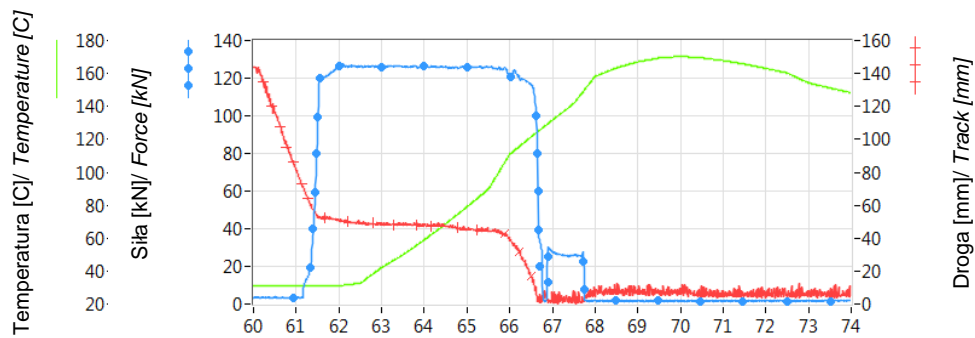


Rys. 5. Próbką spojona, widok z boku

Fig. 5. Bonded specimen, side view

Na rys. 6 przedstawiono parametry siłowe uzyskiwane podczas procesu spajania przy największych parametrach procesu (dla którego uzyskano spojenie). Na skutek procesu kształtowania nastąpił wzrost temperatury do 170°C. Przy zastosowaniu niższych parametrów procesowi nie udało się uzyskać spojenia profilu; spowodowane było to zbyt małą siłą wyciskania w stosunku do obrotu tarczy lub zbyt małymi obrotami tarczy. Odnotowano też wzrost temperatury nawet do 250°C (dla 28 obr/min, 31 kN), a jednak pomimo tego uzyskano połączenia aluminium z miedzią. Rys. 7 i 8 przedstawiają przykładowe, niespojone profile wykonane przy parametrach: 8 obr/min tarczy i sile wciskania 126 kN.

Fig. 6 presents the force parameters obtained during the bonding process at maximum process parameters (at which bonding was achieved). Temperature increased to 170°C as a result of the forming process. Bonding of the section was unsuccessful when lower process parameters were applied; this was due to insufficient extrusion force relative to rotation of the disk or insufficient disk rotational speed. An increase of temperature up to 250°C (at 28 rpm, 31 kN) was also noted, however, despite this, a bond between aluminum and copper was achieved. Fig. 7 and 8 present examples of non-bonded sections made at the following parameters: 8 rpm of disk and pressing force equal to 126 kN.



Rys. 6. Wykres przedstawiający temperaturę, siłę oraz drogę wciskania w czasie, przy parametrach 28 obr/min, 126kN

Fig. 6. Chart presenting temperature, force and extrusion path over time, for parameters 28 rpm, 126 kN



Rys. 7. Próbką nie spojona wykonana przy parametrach: 8 obr/min, 126 kN – widok od strony tarczy

Fig. 7. Non-bonded specimen made at the following parameters: 8 rpm, 126 kN – view from side of disk



Rys. 8. Próbką nie spojona wykonana przy parametrach: 8 obr/min, 126 kN – widok od strony matrycy

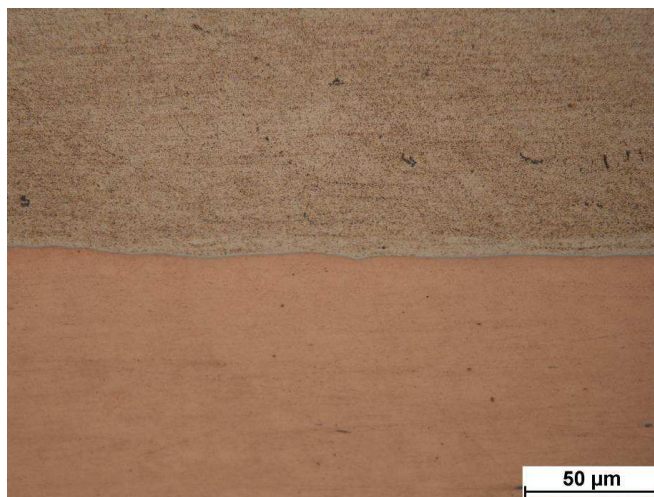
Fig. 8. Non-bonded specimen made at the following parameters: 8 rpm, 126 kN – view from side of die

Ze względu na rozmiar spajanych próbek nie było możliwości wykonanie badań nieniszczących (w tym badań radiologicznych) połączenia spajanego, dlatego wykonano badania metalograficzne. Badania te wykonano za pomocą mikroskopu świetlnego Eclipse L150 (Nikon) na próbkach przygotowanych jak zglądy metalograficzne. Wyniki badania połączenia aluminium – miedź przedstawiono na rys 9.

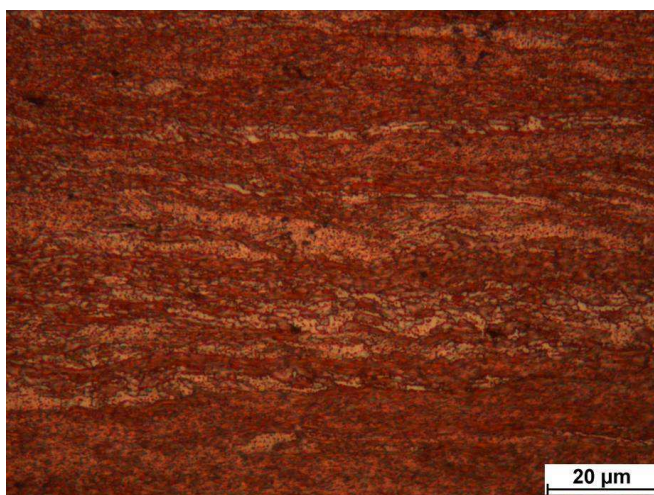
Due to the size of bonded specimens, it was not possible to perform non-destructive tests (including radiological tests) of the bond, so metallographic investigations were carried out. These investigations were conducted by means of an Eclipse L150 (Nikon) optical microscope on specimens prepared as metallographic specimens. The results of investigations of the aluminum – copper bond are presented in Fig. 9.

Nie zaobserwowano żadnych zanieczyszczeń w postaci tlenków czy przerw w połączeniu. Dodatkowo wykonano obserwacje mikrostruktury materiału (miedź M1E) po procesie spajania (rys. 10). Skutkiem spajania struktura miedzi uległa znacznemu rozdrobnieniu.

No contaminants in the form of oxides or breaks in the bond were observed. In addition, observations of the material's microstructure (M1E copper) were conducted after the bonding process (Fig. 10). As an effect of bonding, the structure of copper underwent significant refinement.



Rys. 9. Miejsce spojenia
Fig. 9. Bonding site



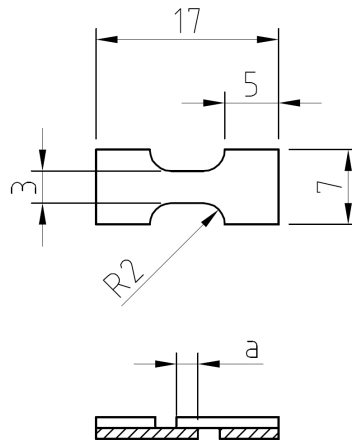
Rys. 10. Mikrostruktura miedzi M1E po procesie spajania na zimno
Fig. 10. Microstructure of M1E copper after the cold bonding process

W celu sprawdzenia jakości uzyskanego połączenia przeprowadzono próbę rozciągania na urządzeniu Mikrotester MT5000HC. Do badania przygotowano próbki pokazane na rys. 11. Na próbkach zostały wykonane dwa nacięcia. Pierwsze nacięcie wykonano tak, aby w przekroju zostało wyłącznie aluminium przecinając warstwę miedzi, natomiast drugie nacięcie - aby w przekroju została tylko miedź. Dla

In order to check the quality of the obtained bond, a tensile test was performed on a Mikrotester MT5000HC strength tester. The specimens shown in Fig. 11 were prepared for the test. Two notches were made on specimens. The first notch was made so that only aluminum remained in the cross-section, cutting through the copper layer, and the second notch – so that only copper remained in the cross-section. Specimens

porównania wyników przeprowadzonego badania wykonano również próbki bez nacięć i próbki z materiałów w stanie wyjściowym. Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia, z prędkością trawersy 0,5 mm/min.

without notches and specimens of materials in their initial state were also tested to compare results. Tests were conducted at ambient temperature, at a traverse speed of 0.5 mm/min.

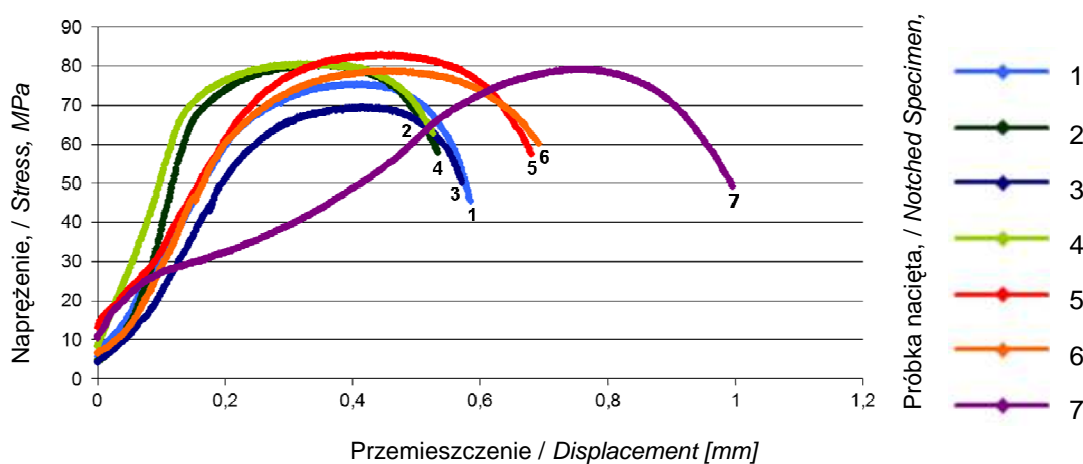


Rys. 11. Próbkki do badania na Mikrotesterze MT5000HC

Fig. 11. Specimens for testing on MT5000HC Mikrotester strength tester

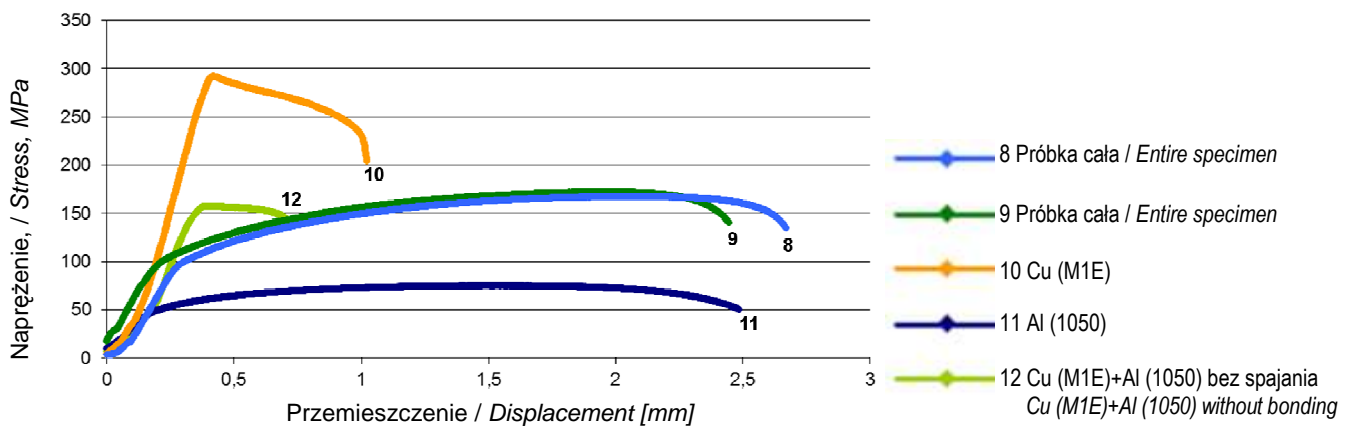
Na rys. 12 przedstawiono wyniki prób rozciągania wykonane dla próbek z nacięciami. Wykres przedstawia zestawienie krzywych zależności naprężenie od przemieszczenia. Wszystkie próbki zerwały się w przekroju aluminiowym.

Fig. 12 presents the results of tensile tests performed for specimens with notches. The chart presents a compilation of stress-displacement curves. All specimens broke in the aluminum cross-section.



Rys. 12. Wykres prób rozciągania wykonany dla naciętych próbek

Fig. 12. Chart of tensile tests performed on notched specimens



Rys. 13. Wykres prób rozciągania wykonany dla próbek bez nacięcia, jak i wstanie wyjściowym

Fig. 13. Chart of tensile tests performed on specimens without notches, in initial state

Na wykresach pokazanych na rys. 12 i 13 zaobserwowano, że dla połączonych materiałów uzyskanych przy parametrach 126 kN i 28 obr/min, z których wykonano nacięte próbki (1-7), wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 80-85 MPa i była nieznacznie większa od wytrzymałości na rozciąganie dla samego aluminium 74 MPa (próbka 11). Dla próbek bez nacięcia (8, 9) zerwanie nastąpiło przy naprężeniu wynoszącym około 170 MPa. Próbkę złożoną z dwóch materiałów aluminium i miedzi nie połączonych ze sobą rozerwała się przy naprężeniu ok. 160 MPa. Na podstawie tych wyników, można stwierdzić, że metodą wyciskania bocznego wspomaganego tarcem można uzyskać trwałe połączenie dwóch materiałów, a wyciśnięty wyrób ma wytrzymałość około 10% większej w stosunku do swojego rodzimego odpowiednika.

Weryfikację możliwości metody przeprowadzono również w próbie spajania stopu aluminium 6063 z miedzią elektrolityczną M1E. Próby wykonano przy parametrach 28 obr/min tarczy i sile wciskania 126 kN. Powierzchnie obu materiałów zostały oczyszczone (szczotkowane) i wyczyszczone benzyną ekstrakcyjną przed procesem spajania. Uzyskano spojony taśmę, którą pokazano na rys.14 i 15. Próba potwierdziła możliwość spajania innych gatunków aluminium z miedzią elektrolityczną.

The charts shown in Fig. 12 and 13 show that tensile strength was within the range of 80-85 MPa for bonded materials obtained at parameters of 126 kN and 28 rpm, from which notched specimens were made (1-7), and these values were slightly greater than the tensile strength of aluminum by itself – 74 MPa (specimen 11). In specimens without notches (8, 9), failure occurred at a stress of approx. 170 MPa. The specimen consisting of aluminum and copper not bonded with one another failed at a stress of approx. 160 MPa. Based on these results, it can be stated that the friction-assisted lateral extrusion method can serve for obtaining a permanent bond between the two materials, and the extruded product has a strength that is approx. 10% greater relative to its native counterpart.

Verification of the method's capabilities was also conducted in a test of bonding 6063 aluminum alloy with M1E electrolytic copper. Tests were performed at the following parameters: 28 rpm of disk and pressing force equal to 126 kN. The surfaces of both materials were cleaned (brushed) and cleaned with extraction naphtha before the bonding process. A bonded tape was obtained, as shown in Fig. 14 and 15. The test confirmed the possibility of bonding other aluminum grades with electrolytic copper.



Rys. 14. Próbką spójona w układzie miedź M1E aluminium 6063 – widok od strony matrycy

Fig. 14. Specimen bonded in configuration: M1E copper and 6063 aluminum – view from side of die



Rys. 15. Próbką spójona w układzie miedź M1E aluminium 6063 – widok od strony matrycy

Fig. 15. Specimen bonded in configuration: M1E copper and 6063 aluminum – view from side of die

5. PODSUMOWANIE

Opierając się na uzyskanych wynikach badań można stwierdzić, że:

1. Otrzymano powtarzalne, wytrzymałe i trwałe złącza między łączonymi materiałami dla parametrów 126 kN i 28 obr/min. Wytrzymałość złącza jest większa od wytrzymałości łączonych materiałów.
2. Na skutek cieplno-mechanicznego procesu, w strefie kontaktu z tarczą, zaobserwowano silne rozdrobnienie struktury jednego z kształtowanych materiałów. Wielkość ziaren miedzi była mniejsza od 1 mikrometra. Tak duże rozdrobnienie jest efektem nałożenia się silnego odkształcenia warstwy materiału i najprawdopodobniej dynamicznej rekrytalizacji zachodzącej podczas procesu kształtowania.
3. Duża prędkość obrotowa tarczy (28 obr/min) i duża siła docisku wsadu do tarczy wpływa na wzrost temperatury kształtowanego profilu, umożliwiając tym samym powstanie trwałego złącza.
4. Proces spajania profili w układzie miedź – aluminium jest zależny od wielu parametrów procesu i warunków, w których ten proces jest prowadzony. Do najważniejszych należą:

5. SUMMARY

Based on obtained test results, it can be stated that:

1. Repeatable, strong and permanent bonds were obtained between the joined materials at parameters of 126 kN and 28 rpm. The strength of the bond is greater than the strength of the materials that were joined.
2. As a result of the thermomechanical process occurring in the area of contact with the disk, strong refinement of the structure of one of the formed materials was observed. The grain size of copper was less than 1 micrometer. Such a large degree of refinement is the effect of the combination of strong deformation of the layer of material and, most probably, dynamic recrystallization taking place during the forming process.
3. The high rotational speed of the disk (28 rpm) and high force pressing the stock onto the disk increase the temperature of the formed section, making it possible for a permanent bond to form.
4. The process of bonding sections in the copper – aluminum configuration is dependent on many process parameters and on the conditions under which this process is conducted. The most important among them include:

- przygotowanie powierzchni wsadu – powierzchnia szczotkowana,
 - siła wciskająca materiał kształtowany,
 - w obrotową tarczę – 126 kN,
 - prędkość obrotowa tarczy – 28 obr/min ,
 - stopień odkształcenia $\lambda > 4$,
 - gatunek materiału.
- *preparation of the stock's surface – brushed surface,*
 - *force pressing the formed material onto the rotating disk – 126 kN,*
 - *rotational speed of disk – 28 rpm,*
 - *degree of deformation $\lambda > 4$,*
 - *material grade.*

PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach pracy statutowej BO .901.0040 pt. Wykorzystanie wyciskania bocznego wspomaganego tarczem w procesach spajania.

LITERATURA

- [1] Woźniak Henryk. 2004. „Ocena jakości spoin Cu-Cu i Al-Cu wykonanych metodą spajania na zimno”. *Obróbka Plastyczna Metali XV* (1): 5–9.
- [2] Woźniak Henryk. 2009. „The results of the so far performed investigations of Al-Cu butt cold pressure welding by the method of upsetting”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 9 (1): 135–145.
- [3] Kowalczyk Leonard. 1988. *Łączenie metali w stanie stałym w procesach obróbki plastycznej*, 193. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [4] Niewiadomski Cyryl, Mieczysław Olszewski. 1931. *Spajanie metali na zimno*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [5] Szkudelski Szymon, Stanisław Ziółkiewicz, Beata Pachutko. 2015. „Wytwarzanie struktury ultradrobnoziarnistej z wykorzystaniem koncepcji metody wyciskania bocznego wspomaganego tarcie”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (3): 191–202.
- [6] Ziółkiewicz Stanisław, Szymon Szkudelski. 2013. „Kształtowanie profili wspomagane tarczem”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 147–157.

ACKNOWLEDGEMENTS

Studies were conducted within the framework of statutory research BO .901.0040 titled “Application of friction-assisted lateral extrusion in bonding processes.”

REFERENCES

- [1] Woźniak Henryk. 2004. „Ocena jakości spoin Cu-Cu i Al-Cu wykonanych metodą spajania na zimno”. *Obróbka Plastyczna Metali XV* (1): 5–9.
- [2] Woźniak Henryk. 2009. „The results of the so far performed investigations of Al-Cu butt cold pressure welding by the method of upsetting”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 9 (1): 135–145.
- [3] Kowalczyk Leonard. 1988. *Łączenie metali w stanie stałym w procesach obróbki plastycznej*, 193. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [4] Niewiadomski Cyryl, Mieczysław Olszewski. 1931. *Spajanie metali na zimno*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [5] Szkudelski Szymon, Stanisław Ziółkiewicz, Beata Pachutko. 2015. „Wytwarzanie struktury ultradrobnoziarnistej z wykorzystaniem koncepcji metody wyciskania bocznego wspomaganego tarcie”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (3): 191–202.
- [6] Ziółkiewicz Stanisław, Szymon Szkudelski. 2013. „Kształtowanie profili wspomagane tarczem”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIV* (2): 147–157.