

Dr inż. Izabella Kwiecień

Promotor: *dr hab. Joanna Wojewoda-Budka, prof. PAN*

Tytuł rozprawy: *Zjawiska dyfuzyjne w strefie reakcji stopów Al1050/Ni201 po zgrzewaniu wybuchowym*

Tytuł rozprawy w języku angielskim: *Diffusion phenomena at the interface zone of Al1050/Ni201 explosively welded clads*

Słowa kluczowe: *zgrzewanie wybuchowe, aluminium, nikiel, dyfuzja, granica rozdziału*

Keywords: *explosive welding, aluminium, nickel, diffusion, interface*

Charakterystyka pracy w języku polskim:

Zgrzewanie wybuchowe jest bardzo praktyczną i czasami jedyną możliwą do zastosowania, nowoczesną metodą spajania materiałów, szczególnie przydatną w przypadku elementów wielkogabarytowych, produkcji kompozytów wielowarstwowych oraz płyt bimetalicznych, zwłaszcza dla par materiałów trudnych do połączenia. W technologii zgrzewania wybuchowego wykorzystywana jest energia, pochodząca z wybuchu, gdzie siła detonacji ładunku wybuchowego rozpędza płytę nastrzelowaną w kierunku płyty bazowej. Na skutek kolizji obu płyt dochodzi do intensywnego docisku, lokalnego wzrostu temperatury na ich styku, a następnie szybkiego odprowadzania ciepła i formowania finalnego połączenia. Technologia ta jest konkurencyjna w stosunku do innych metod łączenia z uwagi na możliwość zastosowania jej do łączenia materiałów charakteryzujących się odmiennymi właściwościami fizyko-chemicznymi, takimi jak temperatura topnienia, gęstość czy wytrzymałość. Dodatkową zaletą zgrzewania wybuchowego jest formowanie się połączenia pomiędzy czystymi powierzchniami, z uwagi na zjawisko strumieniowania, czyli generowania strumienia czyszczącego w punkcie kolizji, usuwającego wszelkie zanieczyszczenia i warstwy tlenkowe. W rozprawie doktorskiej scharakteryzowano bimetaliczne płyty wytworzone ze stopów aluminium (Al1050) i niklu (Ni201) metodą zgrzewania wybuchowego w różnych warunkach procesu. Plateru zostały wytworzone z zastosowaniem różnych wyjściowych warunków łączenia takich jak: prędkość detonacji, dystans technologiczny między płytami oraz zmienna wzajemna lokalizacja zderzających się płyt. Badaniom poddano cztery plateru, ze szczególnym uwzględnieniem morfologii, mikrostruktury oraz składu chemicznego formującej się między płytami granicy rozdziału. W badanych połączeniach dla każdego plateru zaobserwowano obecność ciągłej warstwy przetopionej, jednakże wraz ze wzrostem prędkości detonacji morfologia połączenia zmieniała się z prawie płaskiej do wyraźnie falistej. Przetopione obszary charakteryzowały się niejednorodną mikrostrukturą, będącą mieszaniną różnych faz międzymetalicznych typu Al_xNi_y . W pracy przeanalizowano również wpływ temperatury i czasu wyżarzania na zmiany mikrostrukturalne strefy połączenia, na podstawie których wyznaczono kinetykę wzrostu oraz określono mechanizmy dyfuzji jakie występowały w trakcie tworzenia faz Al_3Ni i Al_3Ni_2 . Ponadto szczegółowo omówiono ewolucję mikrostruktury złącza związaną z zachodzącymi w trakcie wyżarzania procesami dyfuzyjnymi, w odniesieniu do zastosowanych warunków zgrzewania wybuchowego.

Zaobserwowano nierównomierny wzrost faz międzymetalicznych, obecność porowatości na granicy rozdziału Al1050/ Al_3Ni_2 , a także rozpad połączenia na granicy rozdziału po najdłuższym czasie wyżarzania dla plateru uzyskanego przy najniższej prędkości detonacji. Dezintegracja złącza wynikała z koincydencji zjawiska Kirkendalla oraz wzrostu obu faz międzymetalicznych w mechanizmie po granicach ziaren, będących ścieżkami szybkiej

dyfuzji. Obliczenia kinetyki wzrostu faz międzymetalicznych wykazały, że w zależności od warunków początkowych łączenia, fazy międzymetaliczne wzrastały z różną prędkością. Plastery w stanie wyjściowym oraz po wyżarzaniu zostały poddane wybranym testom mechanicznym, takim jak badania mikro- i nanotwardości oraz zginania w warunkach dynamicznych. Po raz pierwszy zastosowano badania dylatometryczne platerów zgrzewanych wybuchowo, w których został wyznaczony współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej badanych płyt bimetalicznych.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że badane połączenie ma potencjał aplikacyjny z zastrzeżeniem dotyczącym zastosowania niskiej prędkości detonacji w badanej parze stopów aluminium i niklu.

The abstract of the thesis (in English):

Explosive welding is a very useful and sometimes the only feasible modern welding method, especially suitable in the case of large-size components to be joined, production of both bimetallic plates and multilayer composites. This technology uses the energy from an explosion, where the detonation force of the explosive accelerates the top located plate towards the base plate. The collision between the plates results in intense increase of the pressure, and a local rise of temperature at the interface followed by rapid heat dissipation and formation of the final weld. This technology is competitive to other joining methods due to its ability to be used for materials characterized with different physical and chemical properties, such as: melting point, density and strength. An additional advantage of the explosive welding is the formation of a bond between clean surfaces, due to the very high dynamics of the process and the phenomenon of streaming at the collision point – when generated cleaning jet removes from the joined surfaces any impurities and oxide layers.

This study is focused on the comprehensive characterization of the bimetallic plates formed between the aluminum (Al1050) and nickel (Ni201) alloys explosively welded under various process conditions such as: detonation velocity, technological distance between the plates and the mutual location of the colliding plates (aluminum alloy acts either as a flyer or base plate). Four clads are intensively investigated with particular importance allocated to the interface zone microstructure observations by electron microscopy techniques. The presence of a continuous remelted layer is observed for each weld exhibiting the interface morphology from almost flat to wavy. A mixture of Al_xNi_y intermetallic phases is created within the remelted areas accompanied with the formation of complex microstructures. Important aspect of the work is dedicated to the influence of annealing on the microstructure transformation of the interface zone supported with the growth kinetics of two main creating intermetallics: Al_3Ni and Al_3Ni_2 , revealing their growth mechanism in relation to the applied parameters of joining. It is also shown, if and how the detonation velocity influences the growth rate of the intermetallic phases. The grain boundary mechanism of growth accompanied by the strong Kirkendall effect, manifested by the presence of porosity, leads in extreme case to the disintegration of the weld at the interface zone after long-term annealing. The microstructure changes of the Al1050/Ni201 explosively welded clads are supported by the selected properties, such as linear thermal expansion or mechanical properties provided by the bending under dynamic conditions, micro- and nanoindentation tests.

Detailed and multiscale microstructure description followed by understanding of the phenomena occurring at created interfaces is the starting point in designing of a new product. The experimental results presented here are important, not only to strive of a scientific truth, but also for the real-practice in industrial environment, providing important technological hints regarding the production technology.

Publikacje z zakresu pracy:

1. **Kwiecien I.** Bobrowski P., Wierzbicka-Miernik A., Litynska-Dobrzynska L., Wojewoda-Budka J., Growth Kinetics of the Selected Intermetallic Phases in Ni/Al/Ni System with Various Nickel Substrate Microstructure, *Nanomaterials* 9, 134 (2019) doi:10.3390/nano9020134.
2. **Kwiecien I.** Bobrowski P., Janusz-Skuza M., Wierzbicka-Miernik A., Szulc Z., Wojewoda-Budka J., Microstructure of the interface zone after explosive welding and further annealing of A1050/Ni201 clads using various joining conditions, *J. Mater. Sci.* 55 (2020) 9163–9172, doi: 10.1707/s10853-019-04317-7.
3. **Kwiecien I.** Bobrowski P., Janusz-Skuza M., Wierzbicka-Miernik A., Tarasek, A., Szulc Z., Wojewoda-Budka J., Interface Characterization of Ni/Al Bimetallic Explosively Welded Plate Manufactured with Application of Exceptionally High Detonation Speed, *J. Mater. Eng. Perform.* 29 (2020) 6286-6294, doi: 10.1007/s11665-020-05117-w.
4. **Kwiecien I.** Wierzbicka-Miernik A, Szczerba M, Bobrowski P, Szulc Z, Wojewoda-Budka J., On the Disintegration of A1050/Ni201 Explosively Welded Clads Induced by Long-Term Annealing, *Materials* (2021) 14 2931 doi /10.3390/ma14112931.