

Dr inż. Wojciech Jerzy Skuza

Promotor pracy: **prof. dr hab. inż. Henryk Paul**, promotor pomocniczy: **dr inż. Katarzyna Berent**

Tytuł rozprawy (w języku polskim): **Wieloskalowa charakterystyka połączeń w platerach Ti/Cu spajanych metodą wybuchową**

Tytuł rozprawy (w języku angielskim): **Multi-scale characterization of Ti/Cu clads manufactured by explosive welding method**

Słowa kluczowe: **charakterystyka złącza, zgrzewanie wybuchowe, plater tytan/miedź, obszary przetopione**

Keywords: **interface characterization, explosive welding, titanium/copper bimetal, melted areas**

Charakterystyka pracy w języku polskim:

Przedmiotem badań prowadzonych w ramach niniejszej pracy były bimetale tytan-miedź wykonane metodą zgrzewania wybuchowego. Płytę nastrzelowaną stanowiła blacha z

niestopowego tytanu (grade 1), zaś płytę podstawową - blacha z miedzi odtlenionej fosforem (Cu-DHP). Proces zgrzewania realizowany był przy zastosowaniu równoległego układu płyt oraz zmiennych parametrów technologicznych procesu zgrzewania, tj. prędkości detonacji (2000 - 2500 - 3000 m/s) oraz początkowej odległości blach (1,5 - 3,0 - 4,5 - 6,0 - 7,5 - 9,0 mm). W efekcie uzyskano 17 odmiennych układów bimetalu Ti/Cu.

Przegląd literatury przeprowadzony we wstępnej części pracy pozwolił na sprecyzowanie problematyki, związanej głównie z analizą zjawisk obserwowanych w bezpośrednim sąsiedztwie granicy między połączonymi metalami. Opisu platerów dokonano bazując na zróżnicowanej skali obserwacji, w jakiej identyfikowano poszczególne efekty. W rezultacie wyszczególniono trzy główne obszary analiz: w skali makro/meso, w skali mikro oraz w skali nano. W ich obrębie ulokowano szereg grup problemowych, związanych z: badaniami kształtu połączenia, a także jego własności mechanicznych oraz elektrycznych, wpływem wzrostu temperatury i ciśnienia (w trakcie procesu zgrzewania) na zmiany w obszarze złącza oraz wpływem oddziaływania temperatury w trakcie wygrzewania platerów po spojeniu. W celu analizy tych zagadnień wykorzystano szereg metod pomiarowych obejmujących: badania mikroskopowe (mikroskopia optyczna, SEM, TEM), badania wytrzymałościowe (testy ścinania w próbie rozciągania, testy zginania w warunkach dynamicznych z wykorzystaniem młota Charpy'ego oraz pomiary mikrotwardości), pomiary oporności elektrycznej (czteroprzewodowa metoda Kelvina) oraz rentgenowską analizę fazową.

W części pierwszej dokonano analizy wpływu zastosowanych parametrów technologicznych procesu zgrzewania na morfologię formujących się złącz oraz ich własności użytkowe. Określono wynikający ze zmiany prędkości detonacji materiału wybuchowego oraz początkowej odległości blach kierunek zmian falistości złącz oraz ilości/powierzchni formujących się obszarów przetopionych. Jednocześnie określono ich wpływ na własności mechaniczne oraz elektryczne platerów. Wykonane obserwacje mikroskopowe stref w obszarze złącza pozwoliły na analizę wpływu podwyższonej temperatury i ciśnienia, panujących w obszarze kolizji, na formującą się w nim mikrostrukturę. Zaobserwowano obecność silnie zdeformowanych i wydłużonych ziaren w obszarze granicy między metalami bazowymi, a także równoosiowej mikrostruktury w sąsiedztwie obszarów przetopionych. W strefach tych dodatkowo analizowano wielkość umocnienia uzyskanych platerów. Wykorzystując techniki mikroskopowe i rentgenowskie scharakteryzowano również uformowane obszary przetopione - zarówno pod względem ich budowy, jak i składu chemicznego/fazowego. Zidentyfikowano obecność w obrębie stref przetopionych zarówno faz zbliżonych pod względem składu chemicznego do składów równowagowych, jak i takich, których skład znacznie odbiega od tych obserwowanych na układzie równowagi Ti/Cu. Obserwacje w skali nano- wykazały obecność cienkiej (<200 nm) i ciągłej warstwy przetopionej między spojonymi metalami, która była niewidoczna w skali mikro. Co więcej, charakteryzowała się ona budową amorficzną. Ostatnim etapem prowadzonych badań była analiza wpływu wygrzewania na charakterystykę złącza Ti/Cu. Wykazała ona formowanie się ciągłej warstwy dyfuzyjnej o szerokości rosnącej wraz z czasem wygrzewania i zbudowanej z podwarstw o składach chemicznych zgodnych z układem równowagi Ti/Cu.

The abstract of the thesis (in English):

Explosively welded titanium-copper bimetals were investigated during the performed researches. The clads were prepared using unalloyed titanium (grade1) sheet as a flyer plate and deoxidized high phosphorus (DHP) copper sheet as a base plate. Welding process was performed with a parallel arrangement of the plates. The clads were manufactured with variable process parameters: detonation velocity (2000 - 2500 - 3000 m/s) and stand-off distance (1,5 - 3,0 - 4,5 - 6,0 - 7,5 - 9,0 mm). As the result, a set of 17 specific clad systems was obtained.

Key issues related to phenomena occurring in the immediate vicinity of the interfaces were specified on the basis of literature review, which was made in the introductory part of work. Description of the obtained clads was divided, due to observation scale, into macro/meso scale, micro scale and nano scale. A number of issues was studied: shape and properties (mechanical and electrical) of interfaces, influence of high temperature and high pressure (during welding) on the characteristics of areas near the interface and influence of annealing after welding. To describe these problems, various methods were used, e.g. microscopic analyses (optical microscopy, SEM, TEM), strength tests (shear test, bending under dynamic loading with the use of a Charpy hammer and microhardness test), electrical resistivity measurements (four probe method) and X-ray phase analysis.

Firstly, the influence of technological process parameters on interface morphology and properties were analyzed. The trend of changes of waviness and quantity of melted regions, caused by various detonation velocities and stand-off distances, were determined. Simultaneously, the influence of process parameters (and interface characteristics) on mechanical and electrical properties was determined. Analyses of the influence of high temperature and pressure on microstructural changes in near-the-interface areas were conducted on the basis of microscopic observations. Occurrence of strongly deformed and elongated grains near flat part of interface and formation of equiaxed grains near large melted areas was observed. Moreover, strain hardening effect of these areas was analyzed. Structure, chemical and phase compositions of melted areas were studied with the use of TEM, SEM and XRD methods. Most of the observed phases appear in the equilibrium Ti-Cu phase diagram, but also phases with chemical composition far from equilibrium were identified. Observation in nano scale showed an occurrence of very thin (<200 nm) and continuous, (mostly) amorphous melted layer between bonded metals (this layer was invisible in micro scale). Finally, the annealing effect (after welding) on morphological changes near the interface was analyzed. Formation of diffusion layer between welded metals was noted. Width of this layer increases with increasing time of the annealing. Moreover, it was comprised with well visible sublayers, which were composed of equilibrium phases.

Publikacje z zakresu pracy:

Skuza W., Paul H., Berent K., Prażmowski M., Bobrowski P., *Microstructure and mechanical properties of Ti/Cu clads manufactured by explosive bonding at different stand-off distances*, Key Engineering 716, s 464-471