

Streszczenie Rozprawy Doktorskiej

Mgr inż. Jarosław Kalabis

pt. „Badania nad opracowaniem technologii wytwarzania multimetalowych drutów o strukturze multiwłóknistej do zastosowań w spawalnictwie i procesach przyrostowych”

przygotowanej pod kierunkiem

dr hab. inż. Santiny Topolskiej prof. PŚ (promotor) oraz mgr inż. Witolda Malec
(opiekun pomocniczy)

W pracy podjęto działania związane z opracowaniem technologii wytwarzania nowych materiałów spawalniczych, takich których nie można uzyskać klasycznymi metodami np. przez odlewanie ciągłe. Wpływ niektórych pierwiastków stopowych na własności odlewnicze jest tak duży, że nie możliwym staje się uzyskanie pełnowartościowego materiału o podwyższonej zawartości pierwiastków stopowych. Głównym materiałem będącym przedmiotem badań były materiały na bazie miedzi, zawierające w swoim składzie aluminium powyżej 10 % masowo. Dodatkowo wykonano próby otrzymywania materiałów dodatkowo zawierających w swoim składzie nikiel. Nowa technologia opiera się na pakietowaniu czystych metali (aluminium oraz aluminium i niklu) do rury miedzianej następnie w drodze operacji przeróbki plastycznej otrzymanie materiału o średnicy umożliwiającej zastosowanie go w technologii druku 3D metodą Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Dokonano przeglądu literatury, na podstawie którego opisano stan zagadnienia. Przybliżono stosowane dotychczas materiały spawalnicze, metody druku 3D oraz materiały wytwarzane niestandardowymi technikami. Przedstawiono również podział technik druku 3D w metalu oraz z zastosowaniem tworzyw sztucznych. Przybliżono zasadę działania technologii druku 3D metodą WAAM w raz z zastosowaniem tej technologii w produkowanych częściach maszyn oraz pomysłach na wykorzystanie tej technologii w inżynierii materiałowej oraz architekturze. W pracy przedstawiono rozwój techniki druku 3D na podstawie opracowań i raportów foresightowych. Ciągły rozwój technologii druku 3D wymaga również rozwijania technologii materiałowych w materiały charakteryzujące się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi, odporności korozyjnej, czy odporności udarowej. Nie bez znaczenia pozostaje rozwój

techniki wojskowej w której druk 3D oraz nowe materiały znajdują zastosowanie w coraz to odważniejszych projektach.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników z prac poprzedzających projekt doktorski zaproponowano tezę pracy, która zakłada opracowanie technologii wytwarzania multiwłóknistych drutów spawalniczych umożliwiającą uzyskanie konkurencyjnych rozwiązań materiałowych charakteryzujących się wyższymi własnościami mechanicznymi, jednorodnością materiału, jego izotropowością mechaniczną oraz liniową sprężystością w pewnym zakresie wytrzymałości przez co nowopowstały materiał stanie się konkurencyjny dla komercyjnych rozwiązań.

Na podstawie badań własnych ustalono przebieg działań mających na celu otrzymanie nowych materiałów charakteryzujących się lepszymi własnościami użytkowymi. Wybrano materiały takie jak rura miedziana Cu ETP, druty aluminiowe oraz druty niklowe które pakietowano w różnych wariantach uzyskując materiały CuAl1, CuAl3, CuAl8, CuAl12 oraz CuAl10Ni10 o strukturze multiwłóknistej. Materiały te poddane przeróbce plastycznej uzyskano w średnicy 2,15 mm i przeprowadzono wstępne testy spawalnicze metoda TIG na blasze stalowej w celu uzyskania obiektów przestrzennych (model ścianki). Opracowano parametry prądowo napięciowe w jakich materiały charakteryzowały się odpowiednimi własnościami spawalniczymi tak aby uzyskać materiały do dalszych badań. Wykonano badanie składu chemicznego multidrutów w celu zweryfikowania składu chemicznego otrzymanych drutów multiwłóknistych.

Równolegle wykonano próby uzyskania materiałów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 o średnicy 1,00 mm do zastosowania w drukarce WAAM będącej na wyposażeniu Laboratorium Wytwarzania i Aplikacji w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych. Podjęte próby druku 3D przyniosły zadowalający efekt uzyskując tym samym materiał do dalszych badań. Uzyskane materiały poddano badaniom makroskopowym z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego, badaniom mikroskopowym wykorzystując technologię mikroskopii świetlnej. Dalszy etap badań stanowiły badania wykorzystujące skaningową mikroskopię elektronową. Wykonano analizy punktowe z podziałem na trzy obszary badań – góra (strefa lica napoiny), środek i dół próbki (grań napoiny) przedstawiono wyniki zawartości poszczególnych pierwiastków w punktach pomiarowych. Wykonano mapy rozmieszczenia pierwiastków oraz obrazy uzyskane z wykorzystaniem elektronów wtórnych (SE). Kolejny etap stanowiły badania twardości metodą Vickersa z użyciem czworobocznego foremego ostrosłupa diamentowego o kącie wierzchołkowym 136° pod zadany statycznym obciążeniem ($F=98,07N$). Następnie wykonano próbę ściskania z użyciem uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Przygotowano po 3 próbki w kształcie walca z każdego rodzaju materiału o wymiarach $d/h - 1:1$. Wymiary próbek różniły się zależnie od grubości napoiny jaką udało się wykonać. Wyznaczono umowną granicę plastyczności, skrócenie procentowe oraz naprężenie ściskające odpowiadające pierwszym deformacjom trwałym próbki – tworzenie się kształtu 'beczki' lub

pojawienie się rys na powierzchni próbki. W ramach kolejnego etapu badań wykonano Test typu „pin on disc” określa zużycie ślizgowe par trących w układzie próbka – przeciw próbka (najczęściej kulka stalowa lub Al_2O_3). W ramach próby tej przebadano materiały CuAl8 MigWeld (materiał komercyjny), CuAl8, CuAl12, CuAl10Ni10 po TIG oraz warianty materiałów CuAl12 oraz CuAl10Ni10 po druku metodą WAAM. Wykonano również badanie korozyjne w mgle solnej NSS próbek wytworzonych z multidrutów oraz drutu komercyjnego (badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06). Próbki badano przez 14 dób każdorazowo próbki po wyjęciu z komory były dokładnie myte, osuszane i ważone. Kolejnym etapem badań było wykonanie analizy fazowej XRD realizowanej na podstawie obrazów dyfrakcyjnych i identyfikację składu fazowego badanych próbek CuAl12 WAAM oraz CuAl10Ni10 WAAM. Próbki zostały podzielone na trzy obszary badania – lico napoiny, środek oraz dół tak jak w przypadku próbek badanych przy pomocy SEM. Analizę jakościową składu fazowego próbek wykonano na podstawie interpretacji dyfraktogramów sporządzonych przy pomocy dyfraktometru rentgenowskiego XRD7 firmy Seifert-FPM. Stosowano rentgenowskie promieniowanie charakterystyczne $\text{Cu K}\alpha$ oraz filtr Ni. Pomiary wykonano w geometrii Bragga-Brentano. Analizę przeprowadzono w zakresie kątów 2θ od 10° do 100° , co odpowiada zakresowi odległości międzypłaszczyznowych d_{hkl} od 0,8838 do 0,10064 nm. Identyfikacji związków występujących w próbkach dokonano w oparciu o oprogramowanie firmy Seifert i Match! oraz dane katalogowe ICDD PDF-4+ z roku 2023. Pomiary wykonano na wypolerowanej płaskiej powierzchni próbek. Obszar analizy oświetlony wiązką promieniowania wynosił około $0,5 \text{ cm}^2$. Cel pracy został osiągnięty, a teza została potwierdzona.