

mgr inż. Marcin Trajer

**Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminidkowe
uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny
wysokiego ciśnienia**

Doktorat realizowany w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” na podstawie umowy z MNISW 0050/DW/2018/02.

Streszczenie

Zagadnienie wykonywania otworów chłodzących o małych średnicach i złożonych kształtach jest obszarem słabo rozpoznany w naszym kraju. Wynika to z braku rodzimego przemysłu, który wymagałby rozwoju technologii elementów chłodzonych turbin. Zaangażowanie przez General Electric Company Polska sp. z o.o. w projekt nowego europejskiego silnika turbośmigłowego Catalyst umożliwiło rozwój nie tylko technologii projektowania elementów chłodzonych, ale także technologii produkcji i inspekcji takich części. Celem prac naukowo badawczych w obszarze technologii produkcyjnej było nabycie umiejętności i wiedzy pozwalającej na opracowanie kompleksowego procesu produkcyjno- inspekcyjnego. To z kolei umożliwiłoby zrozumienie ograniczeń i wymagań technologiczno- projektowych. Szeroki zakres testów i analiz wynikał z faktu, iż wykorzystywana drążarka elektroerozyjna nie była wyposażona w gotowe biblioteki czy to parametrów obróbczych czy ścieżek narzędzia. Wszystkie te elementy musiały być opracowane od podstaw. Rozpoczynając prace zespół nie miał wcześniej doświadczenia z elektrodrążaniem tak małymi elektrodami, których średnica standardowo wynosi około 0.2mm. Przy pracy tak małymi elektrodami pojawiają się zupełnie nowe zjawiska, które nie są dobrze zbadane. Proces realizowany w określonych parametrach przy użyciu elektrody 0.6 mm jest stabilny Dla elektrod o mniejszych średnicach parametry te nie sprawdzają się. Nie ma jasno zdefiniowanej granicy, kiedy parametry przestają być właściwe. Proces stopniowo zaczyna być coraz mniej przewidywalny- co skutkuje np. spadkiem wykrywalności przebicia. Zagadnienie dodatkowo komplikuje fakt, iż na działanie elektrody ma wpływ kilka czynników. Dostępne są opracowania naukowe, gdzie analizuje się wpływ intensywności płukania czy długości elektrody na wydajność procesu. Zależności tych czynników są opisane i przystępując do prac zapoznano się z tymi materiałami. Obszary, które wymagają dalszych badań to w przypadku drążenia elektroerozyjnego na przykład wpływ pojemności na stabilność drążenia, ale także na wykrywalność przebicia.

Kluczowym elementem rozwoju technologii okazało się zagadnienie posuwu elektrody. Wynika to z szybkiego zużywania się elektrod o małych średnicach. Jeżeli zużycie ma charakter jednostajny- co jest prawdą dla elektrod o dużych średnicach (większych od 1.5mm) dobór prawidłowego posuwu jest relatywnie łatwy do osiągnięcia przy użyciu jednego z narzędzi optymalizacyjnych. Sytuacja zmienia się dla elektrod o małych i bardzo małych średnicach, gdzie dla zapewnienia stabilności wymagana wartość posuwu dla nowej elektrody jest inna niż dla elektrody zużytej. Nieprawidłowy dobór posuwu może prowadzić do błędnych wniosków odnośnie wpływu innych zmiennych procesu. Taką zmienną jest na przykład przepływ. Przyjęte przy rozpoczęciu prac założenie, że przepływ jest stały dla danej średnicy elektrod okazało się błędne. W trakcie realizacji badań stanowisko uzupełniono o precyzyjny przepływomierz Bronkhorst MicroCoriflow M14, który pozwolił na wypracowanie limitów przepływu wewnętrznym kanałem elektrody. Ustanowione limity zapewniły stabilną pacę drążarki. Jednocześnie precyzyjne pomiary przepływu pomogły zidentyfikować producenta elektrody jako zmienną, która do tej pory nie była brana pod uwagę. Testy wykazały duży rozrzut wszystkich metryk procesu spowodowany właśnie pochodzeniem elektrod.

Opracowanie stabilnej technologii wykonywania otworów pozwoliło na rozpoczęcie drugiego etapu prac jakim jest wykonanie powłok ochronnych na detalach drążonych. Rozpoczęto od oceny wpływu geometrii małych otworów na jakość powłoki aluminikowej. W tym celu wykonano próbki ze stopu Inconel 718 w których wydrążono otwory o trzech średnicach: 1mm, 0.6. i 0.4mm. Detale następnie przekazano do zakładu Avio Polska w Bielski Białej, gdzie zostały poddane procesowi wykonywania powłoki aluminikowej w procesie VPA. Próbka następnie została poddana badaniu metalograficznemu. Na podstawie pomiarów grubości pokrycia oceniono zgodność wykonanej powłoki ze specyfikacją techniczną. Badanie pokazało, że jakość powłoki zmienia się wraz ze średnicą powłoki. Część z próbek poddane zostały testowi na utlenianie. Test ten realizowany był poprzez wygrzewanie detalu przez 23 godziny w temperaturze 1100oC w atmosferze powietrza. Następnie przeprowadzono badania metalograficzne i rentgenowskie składu fazowego powłoki. Badanie XRD zidentyfikowało fazy NiAl, Ni3Al oraz Al2O3. Test utleniający w widoczny sposób wpłynął na powłokę. Najbardziej zmniejszyła się grubość warstwy w otworach o średnicy 0.4mm. Zmiana wyniosła 32%. Dla pozostałych otworów zmiana grubości powłoki wyniosła odpowiednio dla otworu o średnicy 1 mm 18% a dla średnicy 0.6 mm 23%. Potwierdzenie wpływu geometrii otworów na odporność powłoki aluminikowej pozwoliło na

rozpoczęcie przygotowań do testu głównego. Celem postawionym przed tym testem było nie tylko potwierdzenie wpływu geometrii otworu- która ogranicza dyfuzję glinu, ale także zweryfikowanie jak bardzo wpływa na powłokę proces elektrodrążenia oraz czy parametry tego procesu mają realny wpływ na odporność powłoki. Do tego testu użyto detale ze stopu Inconel 718 oraz Rene N515. Detale miały kształt płytek o wymiarach 25mm x 50mm x 2mm. Wykonano w nich otwory o średnicy 0.4 mm oraz głębokości 20 mm. Otwory były naprzemiennie drążone parametrami o niskiej i wysokiej energii impulsu. Ze względu na brak możliwości zastosowania do badań metody grawimetrycznej analizę oparto o weryfikację ilości glinu i tlenu w poszczególnych przekrojach otworów. Te wykonane były co 5mm do głębokości 15mm. Zawartość glinu, niklu i tlenu badano w 4 punktach oddalających się od krawędzi otworu. Odległość między punktami wynosiła 5 µm. Analizę składu materiałowego przeprowadzono przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM-6490LA. Próbkę podzielono następnie na dwie grupy- na pierwszej wytworzono powłokę aluminidkową w technologii CVD na drugiej w technologii VPA. Po wykonaniu powłoki detale podzielone zostały na 4 grupy a następnie umieszczono je w piecu atmosferycznym. Każdy z 4 stojaków, na których umieszczono próbki przebywał w piecu odpowiednio: 48, 120, 192 i 246 godzin. Test realizowany był w temperaturze 1100oC. Po wyjęciu i ostudzeniu wykonano zgłady metalograficzne oraz pomiary ilościowe zawartości glinu i tlenu. Dzięki usystematyzowanemu nazewnictwu plików- dane pomiarowe zaimportowane zostały do bazy danych co umożliwiło w dalszej kolejności ich sprawną obróbkę. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że dla tworów ślepych o małych średnicach powłokę o wyższej odporności korozyjnej uzyskano w procesie osadzania z fazy chemicznej. Dla procesu CVD pomiar wykazał nieco mniejszą zawartość glinu w punktach A, przekrojów 3 i 4 porównując do przekrojów 1 i 2. Wpływ procesu drążenia elektroerozyjnego najlepiej widoczny jest dla powłok tuż po ich wykonaniu. Wartość średnia udziału masowego glinu dla otworów drążonych parametrami o niższej energii jest wyższa niż dla otworów drążonych parametrami o wysokiej energii. Wpływ parametrów drążenia w tym przypadku silniejszy niż wpływ technologii wykonywania powłok.

Słowa kluczowe: powłoki aluminidkowe, odporność korozyjna, drążenie elektroerozyjne, osadzanie z fazy chemicznej, osadzanie z fazy gazowej

mgr inż. Marcin Trajer, M.Sc.

Evaluation of the EDM parameters influence on aluminide coating obtained by different method of deposition in cooling holes of high-pressure turbine components

Doctoral Research was conducted as a part of „Doktorat wdrożeniowy” programme based on contract with MNISW 0050/DW/2018/02.

Summary

Coatings deposition on small diameter and complex shapes is a poorly recognized topic in our country. Main reason for that situation is lack of domestic industry which may require development of such technologies. Engagement of General Electric Company Polska in new European turboprop Catalyst engine triggered both designed, manufacturing as well as inspection technologies for cooling holes. Main goal of conducted research in area of production technologies was to gain knowledge and experience allowing further development of production manufacturing and inspection processes. Such know-how would also support European designs improvements. Lack of pre-defined setups for EDD machine resulted in broad scope of performed tests and evaluation. That allowed to build such database from scratches. Starting that adventure Team had no previous experience with holes drilling with tube electrodes as small as 0.2 mm. With such small electrode new phenomena takes place. Stable parameters defined for 0.6 electrode are not applicable for 0.4mm and far useless for 0.2mm. As diameter of the electrode drops FHD process becomes less predictable. To make things even more complex FHD process has number of significant variables. Studies performed by the scientists focus on couple areas such as flushing importance or electrode length on the process performance. From last four years perspective it can be stated that there is number of areas of EDD process awaiting development. At first electrode feed, in parallel with pulse electrical parameters voltage (U) and current (I), was identified as a key variable driving process stability. Unlike sinker EDM, in FHD electrodes erodes quickly what influences interelectrode gap. To maintain the gap appropriate feed must be used. Set incorrectly may waive conclusions drawn from incorrectly defined experiment. As said before also feed becomes more complex issue for electrodes with diameters below 0.3mm. For those feed

acceptable for new and by that long electrode is not suitable for the one close to the end. That drove variable feed development. Another variable which can act is shadow is flushing. On a conduct of the tests unexpected variation in results was observed. Detailed investigation revealed clogged electrodes were procured and installed. High pressure pump delivering the pressure now warning occurred. To eliminate that variable from our process Bronkhorst MicroCoriFlow M14 micro flow meter was installed. That allowed for close process monitoring as well as setting flow limits. That activity allowed to draw another conclusion- even having same size there is a lot of variation in flow between different electrodes manufactures.

Completion of a milestone related to stable FHD process coating trials were launched. Initial testing was done for test coupons made from Inconel 718 alloy. Three sets of holes were manufactured in square samples. First set was drilled with 0.3mm diameter electrode- 0.4 hole diameter was obtained. Second set was drilled with 0.5mm diameter electrode resulting in 0.6mm holes. For third set of holes FHD milling technique was used. Holes with 1 mm in diameter were manufactured. Coupons were aluminide coated by VPA process at Avio Polska plant. Next sample was split- one part was evaluated for microstructure, the other was used for 23h oxidation test at 1100°C in air atmosphere. Further investigation revealed that all holes coatings prior oxidation met thickness limit. Smaller the hole more coating inclusions were observed. Oxidated sample coating was much thinner- similarly to inclusions smaller the hole more coating thickness reduction. Smallest hole coating thickness was reduced by 32%, medium hole by 23% and the largest by 18%. The following test focused on two theses: could hole geometry influence coating durability? And the second: could FHD parameters influence coating durability? Test samples to those used in the first test were procured. Additionally to Inconel 718, SX Rene N515 plates were used. Square plates had the following dimensions: 25mm x 50 mm x 2mm. In each plate 20mm deep, 0.4mm in diameter holes were made. Every other hole was drilled with low and high energy setup. Due to specific hole geometry standard gravimetric method could not be used. Therefore, it was decided to based evaluation on chemistry measurements. Those were made in four sections along holes depth. Starting at the top surface and then every 5 mm down to 15 mm. At each section two measurements each based on four points were conducted. First point was located at hole edge. Points were 5 µm apart from each other. Measurements were done by JEOL JSM-6490LA. After manufacturing samples were split in to two groups. First was VPA whereas second was CVD aluminide coated. Once received back samples were split in to four sets and place on the ceramic

holders. Together with holders' samples were placed in air furnace and oxidized for 48, 120 and 246 hours at 1100°C. Complete samples were mounted, and microstructural and chemistry evaluation was performed. Standard data files marking allowed automating data upload to the database system. Oxygen and alumina mass % change over time and hole depth was evaluated in every point. Based on gathered data it was concluded that for blind small diameter holes CVD process is more suitable. Alumina penetrates deeper and oxygen pickup is slower. Interestingly it was proved that FHD parameters indeed have an influence in the coating process. Regardless coating application method CVD or VPA coating deposited on the holes drilled with lower energy contained more alumina.

Key words: aluminide coatings, corrosion durability, electroerosion drilling, chemical vapour deposition, vapour phase aluminiation