



DZIEŃ MECHANIKA 2026



Konkurs na Najlepszą Pracę Dyplomową na Wydziale Mechanicznym UMG

Streszczenia prac konkursowych

Analiza kosztów i pracochłonności wytwarzania powłok konwersyjnych wykorzystywanych jako zabezpieczenie antykorozyjne na elementach ze stopu AW-5083

Niniejsza praca magisterska poświęcona została analizie kosztów i pracochłonności procesu wytwarzania powłok konwersyjnych metodą plazmowego utleniania elektrolitycznego (MAO) na elementach wykonanych ze stopu aluminium AW-5083. Tematyka pracy ma szczególne znaczenie w przemyśle morskim, w którym materiały konstrukcyjne są narażone na długotrwałe oddziaływanie agresywnego środowiska korozyjnego. Pomimo dobrej naturalnej odporności stopów aluminium na korozję, ich eksploatacja w warunkach morskich wymaga stosowania odpowiednich metod zabezpieczania powierzchni. Jednym z takich rozwiązań jest technologia MAO, umożliwiająca wytwarzanie trwałych powłok ceramicznych o korzystnych właściwościach ochronnych i mechanicznych.

Celem pracy było wykonanie analizy kosztów i pracochłonności procesu wytwarzania powłok antykorozyjnych metodą MAO na elementach konstrukcyjnych ze stopu aluminium AW-5083.

Praca składa się z sześciu rozdziałów. Cztery pierwsze mają charakter teoretyczny i obejmują korozję metali, metody badań korozyjnych, właściwości stopu AW-5083 oraz technologię MAO. W rozdziale piątym przeanalizowano wyniki badań korozyjnych oraz oszacowano koszty i pracochłonność procesu. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski dotyczące praktycznego wykorzystania technologii.

W rozdziale pierwszym przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące korozji metali, jej mechanizmy i klasyfikację. Szczególną uwagę poświęcono korozji elektrochemicznej, istotnej podczas eksploatacji elementów metalowych w środowisku morskim. Scharakteryzowano rodzaje uszkodzeń korozyjnych, czynniki wpływające na degradację materiałów oraz odporność i trwałość korozyjną metali, zwłaszcza stopów aluminium.

W rozdziale drugim opisano metody przeprowadzania badań korozyjnych, wykorzystywane do oceny odporności materiałów konstrukcyjnych. Przedstawiono laboratoryjne badania przyspieszone, umożliwiające ocenę zachowania materiałów w kontrolowanych warunkach środowiskowych, w tym badania realizowane w atmosferze mgły solnej. Omówiono także badania elektrochemiczne, pozwalające na określenie parametrów charakteryzujących przebieg procesów korozyjnych oraz badania korozji

naprężeniowej, uwzględniające jednocześnie oddziaływanie środowiska agresywnego i obciążeń mechanicznych. Uzupełnieniem rozdziału była charakterystyka badań prowadzonych w warunkach naturalnych oraz metod oceny stanu próbek po zakończeniu ekspozycji korozyjnej.

Trzeci rozdział poświęcono stopowi aluminium AW-5083. Przedstawiono jego skład chemiczny, właściwości mechaniczne i użytkowe oraz zastosowania w środowisku morskim. Zwrócono uwagę na magnez jako podstawowy dodatek stopowy. Dobra spawalność, korzystne właściwości wytrzymałościowe i wysoka odporność na korozję sprawiają, że stop AW-5083 znajduje zastosowanie między innymi w budowie kadłubów statków i konstrukcji morskich. Charakterystyka materiału stanowiła podstawę oceny wpływu powłok MAO na jego zachowanie w środowisku korozyjnym.

W rozdziale czwartym przedstawiono technologię plazmowego utleniania elektrolitycznego (MAO), stosowaną do wytwarzania powłok tlenkowych na stopach aluminium. Proces polega na oddziaływaniu wysokiego napięcia na materiał zanurzony w elektrolicie. W wyniku procesów elektrochemicznych i wyładowań plazmowych powstaje ceramiczna warstwa tlenkowa, której głównym składnikiem jest Al_2O_3 .

Omówiono mechanizm powstawania warstwy oraz jej twardość, odporność na ścieranie i korozję. Porównano technologię MAO z tradycyjnym anodowaniem, wskazując różnice w przebiegu procesów i właściwościach powłok. Podkreślono, że uzyskanie korzystnych właściwości użytkowych wymaga odpowiedniego wyposażenia i znacznych nakładów energetycznych.

Piąty rozdział stanowi główną część analityczną pracy. Wykorzystano wyniki badań odporności korozyjnej stopu AW-5083, porównując próbki w stanie dostawy i pokryte powłoką MAO. Analiza obejmowała badania w mgłę solnej, badania elektrochemiczne potencjodynamiczne oraz badania korozji naprężeniowej.

W pierwszej kolejności przeanalizowano wyniki badań prowadzonych w środowisku mgły solnej, z wykorzystaniem wodnego roztworu chlorku sodu o stężeniu 3,5%. Oceniono wpływ oddziaływania środowiska korozyjnego na właściwości mechaniczne próbek, ze szczególnym uwzględnieniem wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia A_{50} . Przeprowadzone porównanie wykazało, że próbki zabezpieczone powłoką MAO zachowały korzystniejsze właściwości po ekspozycji korozyjnej niż próbki bez powłoki ochronnej. Po zakończeniu badania wytrzymałość na rozciąganie próbek pokrytych powłoką MAO wynosiła około 230 MPa, natomiast próbek w stanie dostawy około 214 MPa. Wyniki wskazały również

na większą stabilność właściwości plastycznych materiału zabezpieczonego powłoką ceramiczną.

Następnie dokonano analizy wyników badań elektrochemicznych potencjodynamicznych, przeprowadzonych w wodnym roztworze NaCl o stężeniu 3,5%. Badania umożliwiły porównanie zachowania elektrochemicznego próbek bez powłoki oraz próbek zabezpieczonych metodą MAO. Analizowano między innymi wartości gęstości prądu korozyjnego i szybkości korozji. Uzyskane wyniki wykazały znaczną poprawę odporności korozyjnej po wytworzeniu warstwy tlenkowej. Zastosowanie powłoki MAO spowodowało ponad 8700-krotne zmniejszenie szybkości korozji elektrochemicznej w porównaniu z materiałem w stanie dostawy. Potwierdziło to wysoką skuteczność warstwy ceramicznej jako bariery ograniczającej oddziaływanie środowiska agresywnego na powierzchnię stopu AW-5083.

Kolejnym etapem była analiza wyników badań korozji naprężeniowej, w których próbki poddano jednoczesnemu oddziaływaniu obciążenia mechanicznego i środowiska korozyjnego. Badania realizowano w 3,5% wodnym roztworze NaCl, przy stałym naprężeniu odpowiadającym $0,8 R_{p0,2}$. Czas ekspozycji wynosił 1500 godzin. Po zakończeniu badań oceniono zmiany właściwości mechanicznych materiału. Wytrzymałość na rozciąganie próbek zabezpieczonych powłoką MAO wynosiła 198,1 MPa, natomiast próbek bez powłoki 170,69 MPa. Różnica wyniosła 27,41 MPa, co odpowiada poprawie o około 16%. Wyniki potwierdziły, że powłoka MAO ogranicza degradację właściwości mechanicznych stopu AW-5083 w warunkach jednoczesnego działania naprężeń i środowiska korozyjnego, choć nie zapewnia całkowitej ochrony przed długotrwałym oddziaływaniem tych czynników.

W dalszej części rozdziału piątego przeprowadzono analizę ekonomiczną wytwarzania powłok MAO. Oszacowano koszty jednostkowe i oceniono nakłady finansowe w odniesieniu do właściwości ochronnych. Kalkulację wykonano dla czterech próbek ze stopu AW-5083 o łącznej powierzchni czynnej $1,3 \text{ dm}^2$.

W analizie uwzględniono koszty elektrolitu i materiałów pomocniczych, zużycia energii elektrycznej, amortyzacji urządzenia, pracy operatora oraz koszty pośrednie. Koszt elektrolitu i materiałów eksploatacyjnych oszacowano na 40,00 zł na cykl, koszt energii elektrycznej na 9,00 zł, amortyzacji urządzenia na 3,00 zł, robocizny na 68,63 zł, natomiast koszty pośrednie na 7,00 zł. Łączny koszt wytworzenia powłok w jednym cyklu technologicznym wyniósł 127,63 zł, co w przeliczeniu na jednostkę powierzchni odpowiada 98,18 zł/dm².

W celu oceny opłacalności technologii MAO dokonano również porównania jej kosztów z kosztami malowania proszkowego. Przy przyjętym w pracy koszcie malowania

proszkowego wynoszącym 0,45 zł/dm² stwierdzono, że wytwarzanie powłok metodą MAO jest około 220-krotnie droższe. Wskazano jednak, że bezpośrednie porównanie kosztów powinno uwzględniać również różnice we właściwościach użytkowych uzyskiwanych powłok. W pracy zastosowano dodatkowo wskaźnik kosztu przypadającego na uzyskaną poprawę wytrzymałości na rozciąganie, wyrażony w zł/MPa. Dla próbek poddanych badaniom korozji naprężeniowej wyniósł on 3,58 zł/MPa, natomiast dla próbek po badaniach w mgie solnej 6,14 zł/MPa.

Ostatnim elementem części analitycznej było określenie pracochłonności procesu wytwarzania powłok MAO. Uwzględniono czas potrzebny na przygotowanie próbek i stanowiska, realizację właściwego procesu technologicznego oraz czynności końcowe związane z demontażem, oczyszczaniem i kontrolą jakości. Czas przygotowania wyniósł 25 minut, proces właściwy trwał 90 minut, natomiast zakończenie procesu zajmowało 20 minut. Łączny czas jednego cyklu określono na 135 minut, czyli 2,25 godziny. Największy udział w całkowitym czasie procesu miało właściwe utlenianie elektrolityczne, stanowiące około 66% czasu cyklu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono również jednostkową pracochłonność na poziomie około 1,74 godziny na dm² powierzchni.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwoliła na ocenę skuteczności oraz ekonomicznej zasadności stosowania powłok konwersyjnych wytwarzanych metodą plazmowego utleniania elektrolitycznego na stopie aluminium AW-5083. Wykorzystane wyniki badań korozyjnych potwierdziły, że zastosowanie powłoki MAO znacząco poprawia odporność materiału na oddziaływanie agresywnego środowiska. Szczególnie istotne rezultaty uzyskano w badaniach elektrochemicznych, w których stwierdzono ponad 8700-krotne zmniejszenie szybkości korozji. Badania korozji naprężeniowej wykazały natomiast, że próbki zabezpieczone powłoką zachowują wyższe właściwości wytrzymałościowe niż próbki w stanie dostawy.

Analiza ekonomiczna wykazała wysokie koszty technologii MAO: 127,63 zł za cykl i 98,18 zł/dm² przy czasie procesu 2,25 godziny. W porównaniu z malowaniem proszkowym metoda okazała się około 220-krotnie droższa, co ogranicza jej zastosowanie w produkcji wielkoseryjnej.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że stosowanie powłok MAO jest ekonomicznie uzasadnione przede wszystkim w specjalistycznych zastosowaniach, w których kluczowe znaczenie mają wysoka odporność korozyjna, trwałość oraz niezawodność elementów konstrukcyjnych. Natomiast w przypadku produkcji masowej oraz elementów o standardowych wymaganiach eksploatacyjnych technologia ta pozostaje rozwiązaniem nieopłacalnym ze względu na wysokie koszty wytwarzania.