

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marcin Trajer

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

Promotor:

dr hab. inż. Jerzy Robert Sobiecki, prof. uczelni

Opiekun pomocniczy:

dr inż. Magdalena Machno

Warszawa 2023

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

Podziękowania

Dziękuję mojej żonie Gosi oraz moim dzieciom za wsparcie i poświęcenie.

Dziękuję Promotorowi za cierpliwość oraz cenne uwagi przekazane podczas pisania tej pracy.

Dziękuję Pani Opiekun za konsultacje i dyskusje na temat pracy.

Dziękuję Zespołowi Laboratorium Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych za pomoc i fantastyczną współpracę podczas realizacji projektu.

Spis treści

Spis treści	4
1. Podstawowe definicje skróty i oznaczenia	6
2. Wstęp.....	7
3. Przegląd literatury	9
3.1. Rozwój silników odrzutowych.....	9
3.2. Analiza tematu- obróbka elektro erozyjna	18
3.2.1. Drażenie elektro erozyjne.....	32
3.2.2. Frezowanie elektro erozyjne	44
3.3. Degradacja materiału i powłoki aluminidkowe.	47
3.3.1. Wytwarzanie powłok zawierających glin z fazy gazowej.	53
3.3.2. Chemiczne osadzanie z fazy gazowej.	55
3.4. Odporność korozyjna powłok aluminidkowych	56
4. Wnioski z analizy literatury.....	61
4.1. Proces obróbki elektro erozyjnej	61
4.2. Korozja i powłoki dyfuzyjne	62
5. Cel i zakres pracy badawczej	64
5.1. Zakres prac realizowanych w ramach projektu rozwojowego firmy General Electric Company Polska.	65
5.1.1. Narzędzia cyfrowe- przemysł 4.0.....	66
6. Opracowanie technologii drążenia elektroerozyjnego	69
6.1. Materiały i metody.....	70
6.2. Technologia drążenia otworów okrągłych	73
6.3. Płukanie obszaru roboczego	74
6.4. Wpływ posuwu elektrody na stabilność procesu drążenia.....	87
6.5. Wpływ obciążenia cyklu oraz długości faz cyklu.	93
6.6. Wpływ materiału obrabianego	94
6.7. Wpływ pojemności.....	99
6.8. Producent elektrod	101
6.9. Technologia wykonywania otworów kształtowych	104
6.10. Wnioski	108

7.	Badania powłok aluminidkowych.....	110
7.1.	Materiały i metody	110
7.2.	Badanie wstępne.....	118
7.3.	Wnioski z badania wstępnego.....	125
8.	Badanie zmiany składu chemicznego w drążonych otworach.....	126
8.1.	Mikrostruktura i skład chemiczny przed i po procesie utleniania	127
8.2.	Podsumowanie oraz wnioski z badania głównego.....	135
9.	Podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych.....	136
10.	Kontynuacja prac nad technologiami	137
10.1.	Badania drążenia elektroerozyjnego.....	137
10.2.	Badania powłok aluminidkowych.....	137
11.	Publikacje autora	138
12.	Streszczenie.....	138
13.	Summary	140
14.	Literatura.....	142
15.	Spis rysunków	151

1. Podstawowe definicje skróty i oznaczenia

Oznaczenia

T_{on}- czas pracy,

T_{off}- czas przerwy, czas płukania

F- posuw, prędkość wysuwania elektrody kompensująca jej zużycie

I- Natężenie prądu

U- napięcie prądu

Skróty

EDD- drążenie elektroerozyjne (*ang. Electroerosion Discharge Drilling*)

FHD- drążenie otworów rotującą elektrodą rurkową (*ang. Fast Hole Drill*)

VPA- Vapour Phase Aluminisation- osadzanie z fazy gazowej

CVD- Chemical Vapour Deposition- chemiczne osadzanie z fazy gazowej

ToW- Time on Wing- międzyremontowy czas eksploatacji silnika

TET- Turbine Entry Temperature- temperatura gazów wpływających do turbiny

HAZ- Heat Affected Zone- strefa wpływu ciepła

RL- Recast Layer- warstwa przetopiona

RLT- Recast Layer Thicknes- grubość warstwy przetopionej

MRR- Material Removal Rate- prędkość usuwania materiału

TWR- Tool Wear Ratio- współczynnik zużycia narzędzia

RSM- Responce Rurface Method- metoda powierzchni odpowiedzi

ANOVA- Analysis of Variance- analiza wariancji

SSMD-Strictly Standarized Mean Difference- standaryzowana różnica średnich

PVD- Physical Vapour Deposition, osadzanie fizyczne z fazy gazowej

AIP- Arc Ion Plating

MES- Metoda Elementów Skończonych

MOS- Metoda Objętości Skończonych

HVOF- High Velocity Oxygen Fuel

LPPS- Low Pressure Plasma Spray- niskociśniewe napylanie plazmowe

2. Wstęp

Niniejsza praca porusza temat, który zrodził się wprost z obserwacji procesów produkcyjnych. Zespół Laboratorium Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych otrzymał zadanie opracowania technologii produkcyjnej części chłodzonych turbiny wysokiego ciśnienia silnika Catalyst. Głównym celem tego projektu było zrozumienie ograniczeń technologicznych, które należy uwzględnić na etapie projektowania, aby zaprojektowana była możliwa do wykonania. Zarówno technologia projektowania jak i produkcji części chłodzonych podlega kontroli obrotu. Bez odpowiednich zgód wiedza jak modelować takie części, jak dobierać współczynniki wymiany ciepła czy parametry drążenia elektroerozyjnego nie może być przekazywana ze Stanów Zjednoczonych do Europy. Chcąc dobrze projektować zespół europejski musiał najpierw nauczyć się wykonywać części chłodzone.

Projekt realizowany w ramach obowiązków zawodowych swym zakresem obejmował opracowanie kompletnego procesu produkcyjnego. W przypadku produkcji lotniczej oznacza to uwzględnienie w procesie wymagań jakościowych. Produkcja lotnicza podlega regulatorom- European Union Aviation Safety Agency (EASA) na poziomie europejskim oraz Urząd Lotnictwa Cywilnego (ULC) na poziomie kraju. Organizacje te określają wymagania kontroli jakości jakie muszą być spełnione przez podmioty realizujące produkcję lotniczą. System jakości nie będzie szeroko omawiany w tej pracy- niemniej należy o nim wspomnieć, aby lepiej nakreślić ramy realizowanego zadania. Obejmowało ono następujące elementy:

- a) budowę systemu zarządzania, akwizycji danych oraz kontroli procesów stanowiących poszczególne etapy produkcyjne
- b) opracowanie technologii wykonywania małych otworów chłodzących metodą drążenia elektroerozyjnego
- c) wykonanie antykorozyjnych powłok aluminidkowych

Podczas prac przygotowawczych zauważono, iż realizowane prace naukowe koncentrują się na indywidualnych obszarach: obróbce elektroerozyjnej oraz powłokach. W rzeczywistych obiektach jakimi są detale silników lotniczych procesy te stanowią elementy jednego procesu produkcyjnego, co w tym przypadku oznacza ich interakcję.

Niniejsza praca wychodzi poza obszar badań związany z jedną dziedziną techniczną. Analizie poddany jest wpływ jaki wywiera obróbka elektroerozyjna na aluminidkowe powłoki dyfuzyjne. Analizie poddane jest zarówno zagadnienie obróbki elektroerozyjnej jak i jej wpływ na powłoki

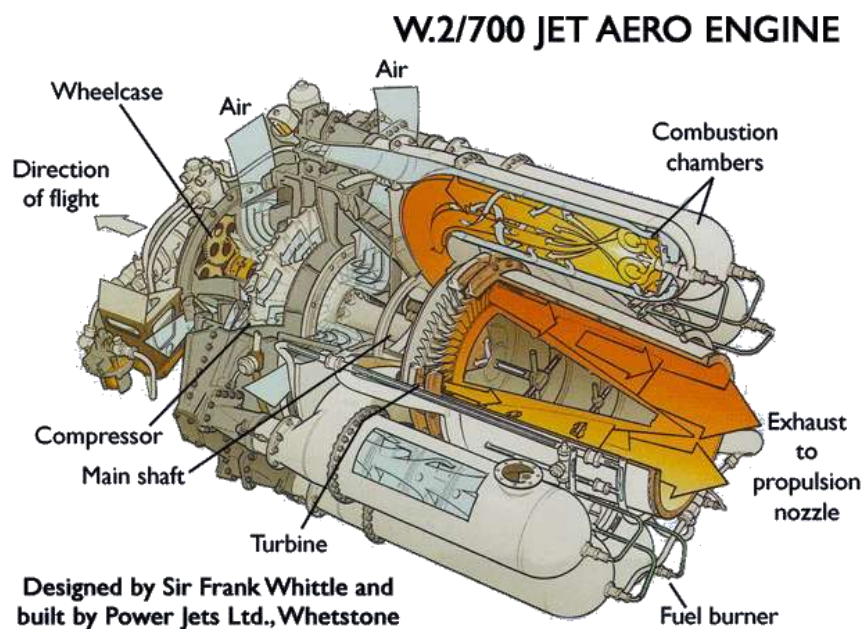
Oba obszary są szeroko badane oraz podlegają ciągłym modyfikacjom. Niemniej w dostępnej literaturze brak jest holistycznej analizy interakcji pomiędzy obróbką elektroerozyjną a procesami wytwarzania dyfuzyjnych powłok aluminidkowych. Procesy te spotykają się w jednych z najbardziej obciążonych zarówno mechanicznie jak i termicznie elementach silnika, jakimi są

części przepływowe turbiny wysokiego ciśnienia- łopatki i dysze gazowe. Są to także jedne z najbardziej zaawansowanych technologicznie, a co za tym idzie najdroższych elementów. Najnowsze konstrukcje wykorzystują nadstopy na osnowie niklu i kobaltu. Coraz wyższa oczekiwana odporność na pełzanie wymogła zastosowania odlewania kierunkowego. Jednocześnie podlegają one procesowi ciągłego udoskonalania, który z jednej strony zapewni jak najdłuższy czas użytkowania, z drugiej najniższy koszt wykonania. Niemniej mimo wnikliwej analizy procesów można spotkać obszary, które umykają weryfikacji. Do takich zaliczyć można otwory chłodzące zaawansowanych części turbiny. Warstwa wierzchnia w procesach osadzania z fazy chemicznej (CVD) czy też gazowej (VPA) przesycana jest dyfuzyjnie glinem. Zabieg taki pozwala na uzyskanie na powierzchni bogatej w glin powłoki. Jej najważniejszą zaletą jest wytwarzanie na swojej powierzchni tlenku glinu (Al_2O_3). Dzięki znakomitej odporności na warunki środowiskowe zabezpiecza materiał detalu przez korozją czy oksydacją. Proces przesycania powierzchni elementu atomami glinu opiera się dyfuzji w ciele stałym. Aby proces ten zachodził poprawnie wymagana jest odpowiednia czystość i jednorodność zarówno chemiczna jak i krystalograficzna materiału. Niezgodność w którymkolwiek z tych obszarów prowadzić może do osłabienia otrzymanej powłoki. Jednocześnie powstałe w wyniku obróbki elektroerozyjnej otwory chłodzące charakteryzują się tym, iż ich ścianki pokryte są tzw. warstwą białą (*ang. recast layer*). Jest to warstwa, która w wyniku wysokiej temperatury obróbki uległa przetopieniu. Z oczywistych względów skutkuje to zmianą zarówno struktury krystalograficznej jak i składu chemicznego.

3. Przegląd literatury

3.1. Rozwój silników odrzutowych

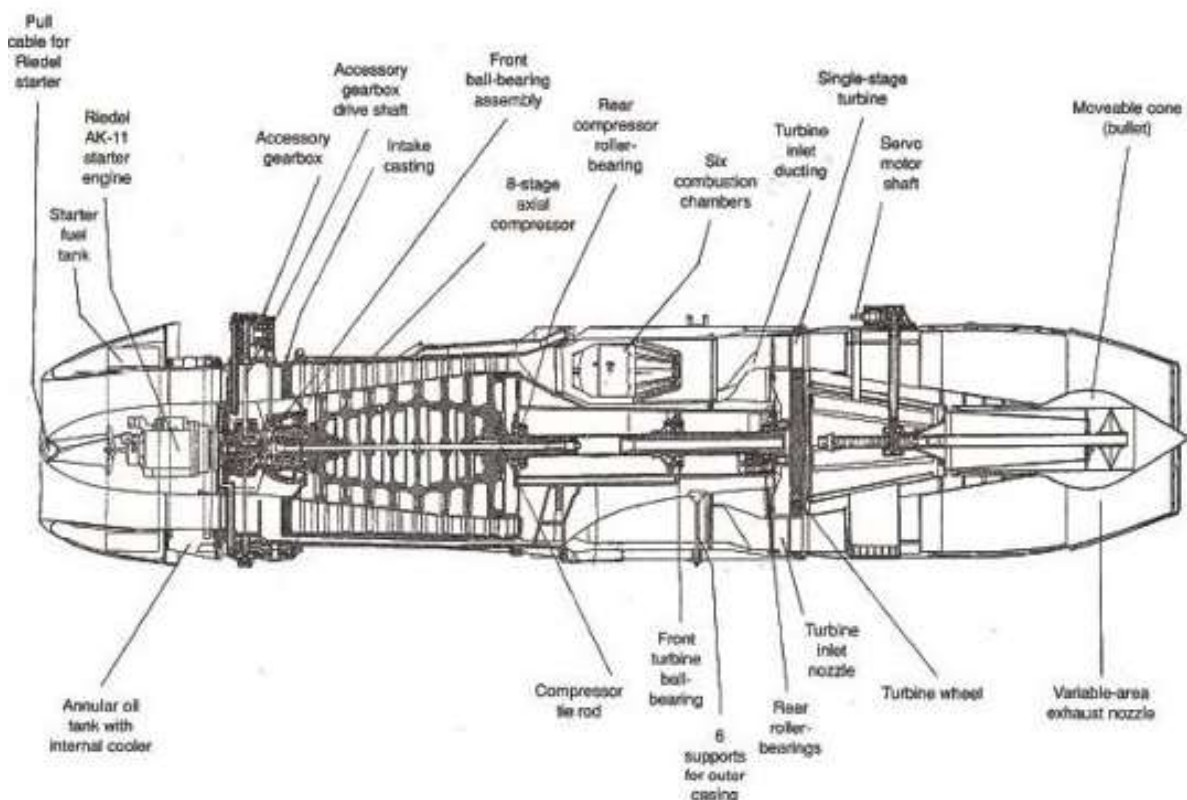
Rozwój silników odrzutowych rozpoczął się na początku lat 40tych ubiegłego wieku (1) kiedy to po raz pierwszy silnik o takiej konstrukcji został użyty do napędu samolotu. Konstrukctorem i pomysłodawcą pierwszego silnika turbinowego był Sir Frank Whittle (1907-1996). Opracowana przez niego koncepcja zakładała użycie sprężarki odśrodkowej, która była już wtedy (połowa lat 30tych XX wieku) wykorzystywana w silnikach tłokowych- zarówno samochodowych jak i lotniczych.



Rysunek 3-1 Przekrój silnika odrzutowego W.2/700- będącego wersją rozwojową pierwszej wersji W.1X napędzającego pierwszy samolot odrzutowy- Gloster E.28/39. (1)

Turbina przypominała dzisiejsze konstrukcje z palisadą dysz kierujących gazy oraz obracającym się za nią wirnikiem. Energia gazów spalinowych odbierana jest przez promieniście rozmieszczone na wirniku łopatki. Pierwszy lot samolotu Gloster odbył się w maju 1941 roku.

Należy wspomnieć, że zarówno silnik odrzutowy jak i samolot nim napędzany jako pierwsze zbudowały zakłady Heinkla pod koniec lat 30 ubiegłego wieku. W odróżnieniu od konstrukcji brytyjskiej, silnik Jumo (**Junkers Motorenwerke**) wykorzystywał sprężarkę osiową.



Rysunek 3-2 Przekrój silnika Jumo 004 opracowanego w zakładach Junkersa w latach 40 XX wieku.

[<https://erenow.net/ww/hitlers-spyplane-over-normandy-1944-worlds-first-jet/6.php>, dostęp 16/03/2023]

Jest ona rozwiązaniem bardziej efektywnym w zastosowaniach lotniczych. Silnik z taką sprężarką ma mniejszy przekrój czołowy, a zwielokrotnienie stopni sprężarki pozwala osiągnąć zakładany spręż. W tamtym narzędzia analityczne pozwalające na poprawne zamodelowanie pracy sprężarki nie były dostępne. Porównanie parametrów silników W2/850 oraz Jumo-004 w Tabeli 3-1 pokazuje wyższość konstrukcji brytyjskiej. Przewyższała ona konkurenta w każdym z kluczowych parametrów- silnik był lżejszy, miał większy ciąg i co ważne zużywał mniej paliwa.

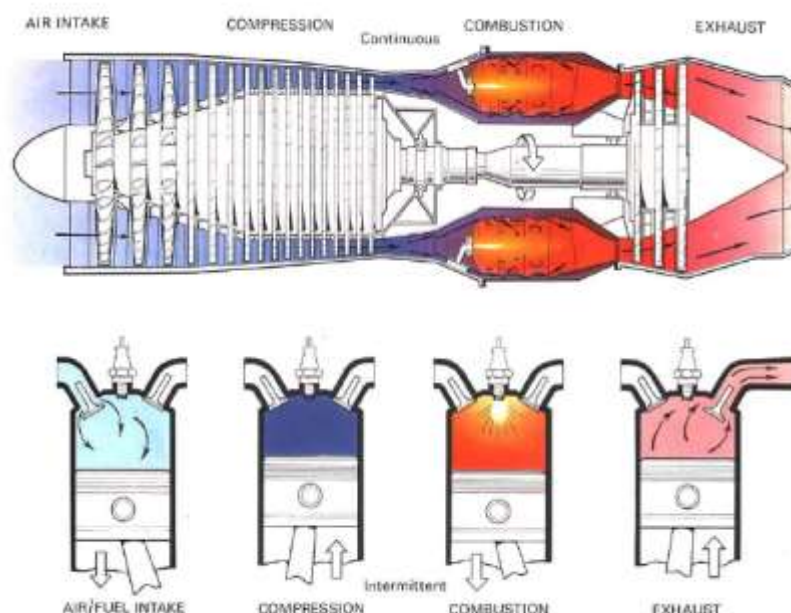
Po wojnie, wraz z rozwojem warsztatu analitycznego schemat konstrukcyjny wykorzystany w silnikach Jumo stał się podstawą dla średnich i dużych silników odrzutowych. W mniejszych konstrukcjach, dla których ważniejsza jest prostota budowy niż efektywność, wykorzystywana jest sprężarka odśrodkowa.

Tabela 3-1 Porównanie podstawowych parametrów silników W2/850 oraz Jumo-004.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Power_Jets_W.2#Components,
https://en.wikipedia.org/wiki/Junkers_Jumo_004, dostęp 16/03/2023]

		W2/850	Jumo 004
Waga silnika suchego	kg	431	719
Ciąg	kN	11.05	8.8
Spręż		4:1	3.14:1
Zużycie paliwa	kg/h	1185	1223

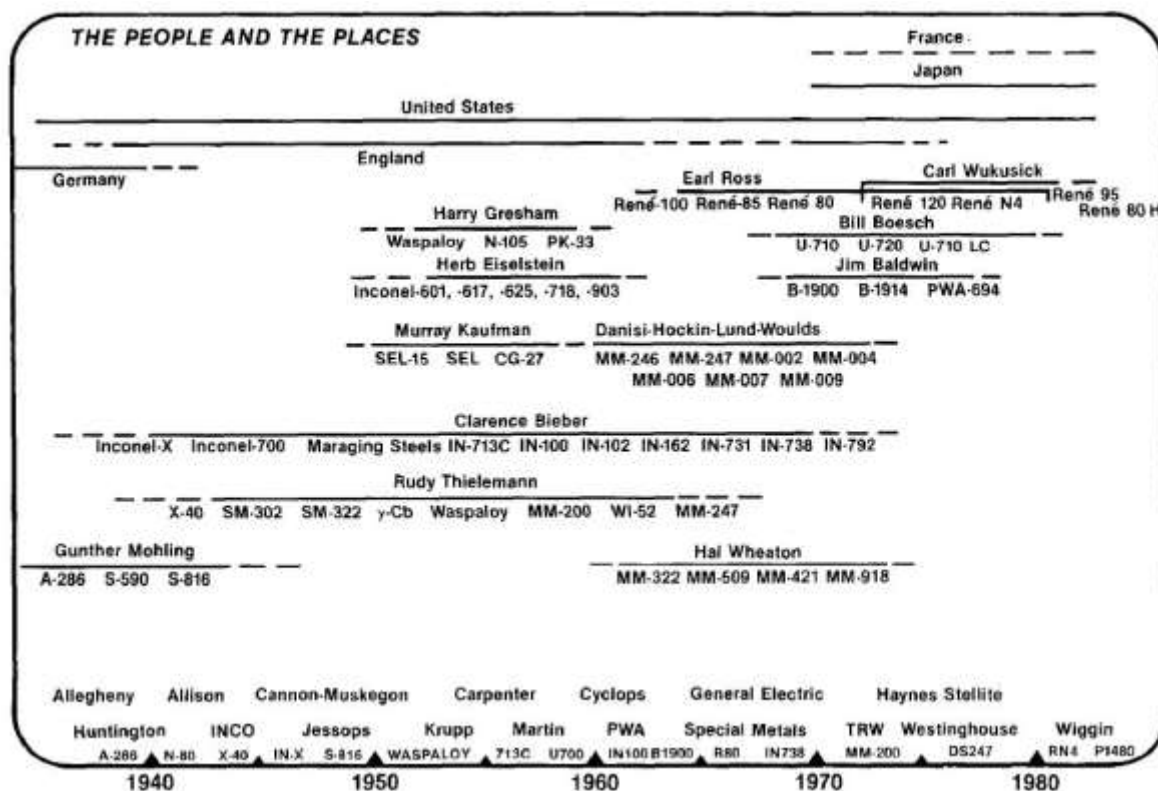
Projekt Sir Franka Whittle’a stał się podstawą rozwoju współczesnych konstrukcji silników turbo odrzutowych. Początek lat 50tych XX wieku był momentem rozpoczęcia rywalizacji na polu konstrukcji silników. Trwa on nieprzerwanie dziś. Tysiące elementów składających się na współczesny silnik odrzutowy (silnik Catalyst składa się z około 5000 indywidualnych części) są analizowane, modyfikowane i optymalizowane. Kierunki rozwoju podążają za wymaganiami użytkowników. Silniki eksploatowane przez linie lotnicze wyglądają inaczej i konstruowane są zgodnie z innymi wytycznymi niż silniki wojskowe. Różnica ta wynika z odmiennych wymagań, niemniej fizyka stojąca za działaniem obu konstrukcji jest taka sama. Ogólny schemat pracy silnika odrzutowego i porównanie do działania silnika tłokowego pokazuje Rysunek 3-3.



Rysunek 3-3 Porównanie cyklu silnika tłokowego oraz odrzutowego. (1)

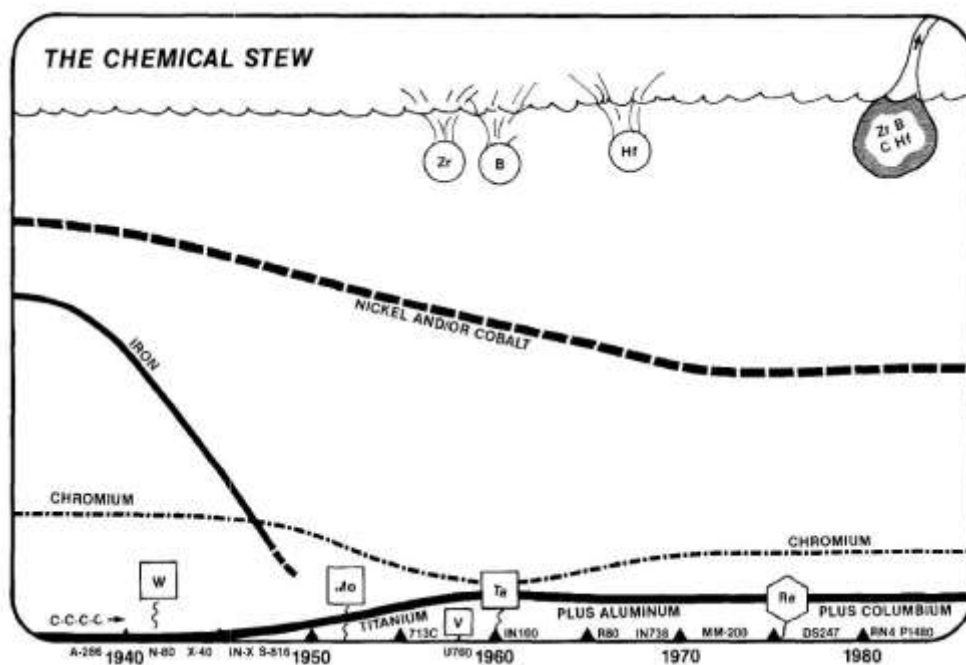
Jak widać na schemacie pokazanym na Rysunku 3-3 w silniku odrzutowym spaliny powstające w komorze spalania przepływają kanałem, który obejmuje turbinę oraz wylot. Łopatki turbiny odbierają energię od opływających je gazów. Część tej energii przekazywana jest do sprężarki a nadatek generuje ciąg silnika.

Wyścig o coraz wyższą sprawność silników czy coraz dłuższy między przeglądowy pociąga za sobą ciągły rozwój technologii zarówno projektowych jak i produkcyjnych, często dochodząc do ich znanych granic. Zaawansowane modele statystyczne, analizy numeryczne czy symulacje przy wykorzystaniu sieci neuronowych są dziś jednym z podstawowych narzędzi inżynierskich. Użytkownicy oczekują, iż kolejne generacje silników będą coraz bardziej niezawodne, oszczędne a jednocześnie spełnią wszystkie wymagania bezpieczeństwa i prostoty obsługi. Podstawowym mechanizmem poprawy sprawności cyklu pracy silników cieplnych jest podnoszenie temperatury cyklu ich pracy. Powoduje to, iż detale we współczesnych silnikach takich jak GE9X czy Trent7000 muszą wytrzymywać długotrwałe oddziaływanie temperatur rzędu 1350-1500°C (2). Możliwość pracy w tak ekstremalnych warunkach uzyskana jest dzięki odpowiedniemu doborowi materiałów, zastosowanie powłok antykorozyjnych oraz ceramicznych barier termicznych (3). Pomimo ekstremalnych warunków pracy materiały muszą zapewniać: odpowiednio wysokie życie wysoko i niskocyklowe, margines wytrzymałości na zerwanie w wyniku pełzania jak również małe odkształcenie plastyczne w wyniku pełzania (żarowytrzymałość) a także odporność na agresywne środowisko pracy. Dodatkowo muszą się cały czas dawać względnie łatwo obrabiać.



Rysunek 3-4 Rozróż kolejnych generacji superstopów. (4)

Pierwsze „super stopy” pojawiły w latach 20 ubiegłego wieku (4). Rozwój metalurgii napędzany był przez kolejne zastosowania, które do poprawnego funkcjonowania potrzebowały coraz bardziej wytrzymałych materiałów.



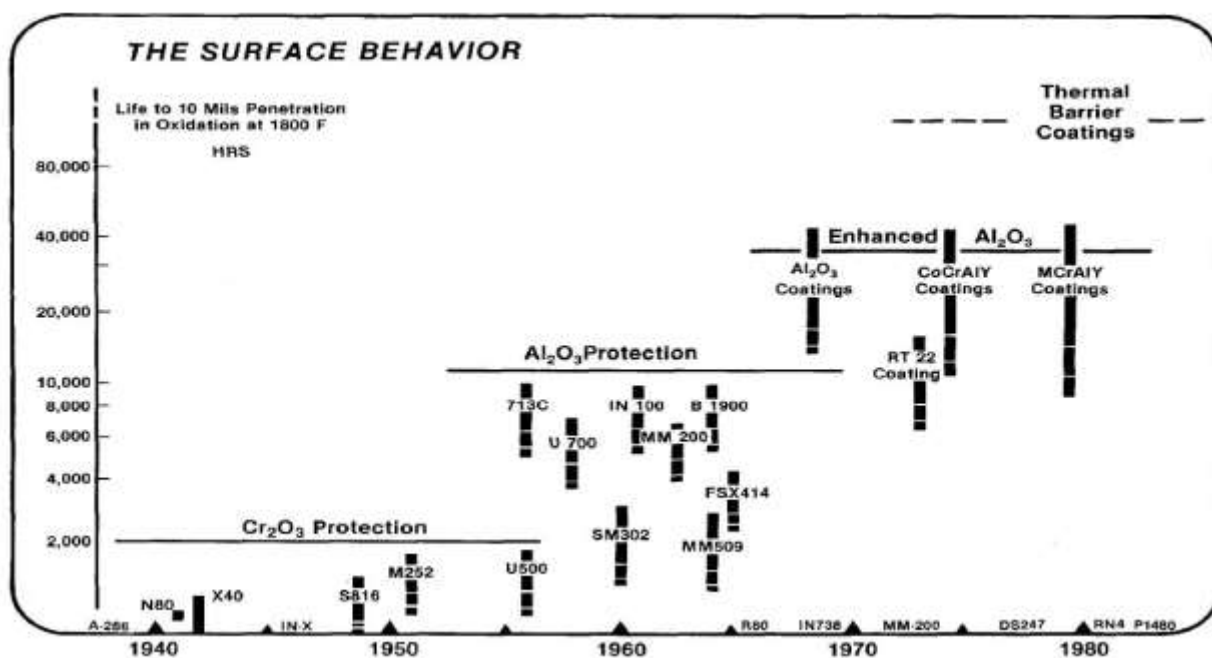
Rysunek 3-5 Ewolucja zawartości składników stopowych do połowy lat 80tych XX wieku. (4)

W latach 40 i 50 XX wieku skupiono się na podniesieniu wytrzymałości wysokotemperaturowej co osiągnięto poprzez ograniczenie zawartości żelaza przy jednoczesnym podwyższeniu zawartość niklu i kobaltu. W latach 60tych wprowadzono tytan jako dodatek stopowy jednocześnie obniżając ilość chromu, którego właściwości ochronne przestały być wystarczające. Następnie zaczęto stosować glin jako dodatek stopowy, który co prawda poprawiał odporność korozyjną, ale jednocześnie obniżał wytrzymałość. Zmianę składu superstopów na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci pokazano na Rysunku 3-5.

Wróćmy do lat 60tych XX wieku. Temperatura pracy elementów turbiny dochodzi do 1300°C. Sprawdzające się dotychczas zabezpieczenie antykorozyjne w postaci tlenku chromu Cr_2O_3 przestaje być wystarczające. Tymczasowym rozwiązaniem jest podniesienie w stopach zawartości glinu. Niestety ilość tego składnika stopowego ograniczona jest koniecznością utrzymania wysokiej odporności mechanicznej w wysokich temperaturach, a glin działa tu niekorzystnie.

Właśnie w latach 60tych rozpoczyna się historia aluminidkowych powłok dyfuzyjnych. Od tego czasu temat odporności powłok antykorozyjnych oraz sposobów podnoszenia ich żywotności jest tematem stale obecnym w publikacjach. Wpływ takich czynników jak sposób wytwarzania powłok, stan powierzchni czy skład chemiczny materiału bazowego poddane został

szczegółowym analizom. Bunker w swojej pracy (2) wymienia szereg technologii chłodzenia, dzięki którym elementy turbiny mają możliwość odpowiedniego obniżenia temperatury. Równolegle weryfikacji poddany został wpływ otworów chłodzących na wytrzymałość części, Sun (5). Zjawisko dyfuzji wykorzystywane było przez artystów i rzemieślników od stuleci (6). Do wykonywania metalicznych inkrustacji wykorzystywano amalgamaty. Miano pierwszego współczesnego naukowca zajmującego się zjawiskami dyfuzji uważa się Johna Daltona. Jeszcze w XIX wieku Fick zdefiniował swoje prawa opisujące przepływ atomów w jednofazowym dwuskładnikowym stopie. Opisanie zjawiska pozwoliło na zrozumie zależności i reguł rządzących zjawiskiem dyfuzji. Wykorzystanie praktyczne tej wiedzy rozpoczęło się pół wieku później. Rozwój powłok, które pozwalają w zamierzony sposób zmodyfikować własności powierzchni nastąpił pod koniec lat 50 i na początku lat 60 XX wieku. Wynikało to wprost z potrzeby rozwoju zaawansowanych technologicznych rozwiązań przemysłowych.



Rysunek 3-6 Ewolucja powłok ochronnych. (4)

Każda kolejna generacja superstopów pozwala elementom pracować w coraz wyższych temperaturach. Niestety odbywa się to kosztem coraz trudniejszej obrabialności tych materiałów. Dodatkowo zawężanie tolerancji wymiarowych oraz coraz bardziej wyrafinowane systemy chłodzenia (7) zmuszają producentów do ciągłego poprawiania istniejących oraz poszukiwania nowych technologii produkcyjnych. Takim obszarem jest wytwarzanie otworów chłodzących które są jednym z kluczowych elementów systemu chłodzenia. Szczegółowe porównanie technik wytwarzania otworów opisane jest w pracy Li (8). Historycznie otwory wykonywane były przy wykorzystaniu tradycyjnego wiercenia mechanicznego, jednakże wzrost twardości oraz zmniejszenie średnic wymusiło odejście od tej technologii. Zaczęto szerzej

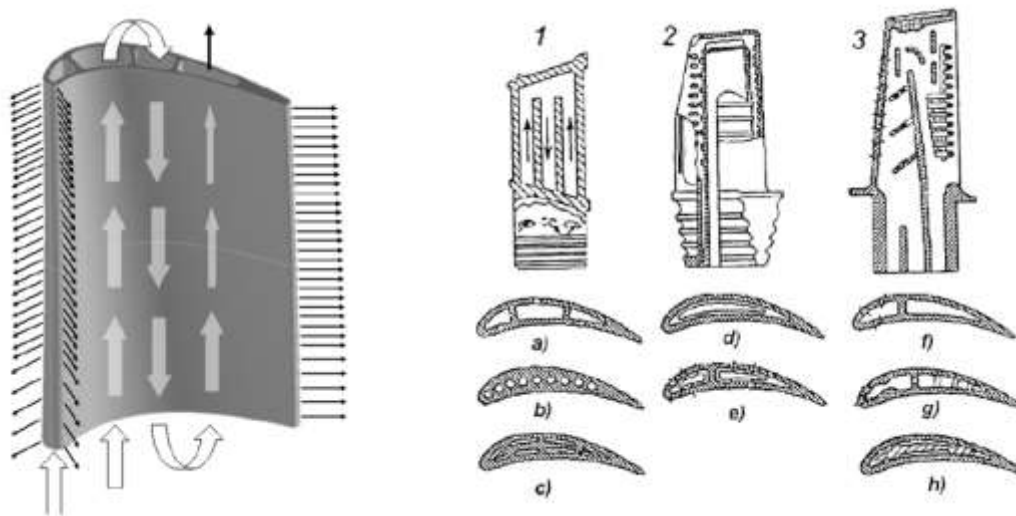
wykorzystywać obróbkę elektrochemiczną- jednakże i ona z czasem okazała się niewystarczająca a negatywny wpływ na środowisko oraz obwarowania BHP znacząco ograniczyły jej użycie.



Rysunek 3-7 Współczesna chłodzona łopatką turbiny wysokiego ciśnienia pokryta warstwą ceramiczną.

(<https://www.winbrogroup.com/applications/turbineblades/>, dostęp 16/03/2023)

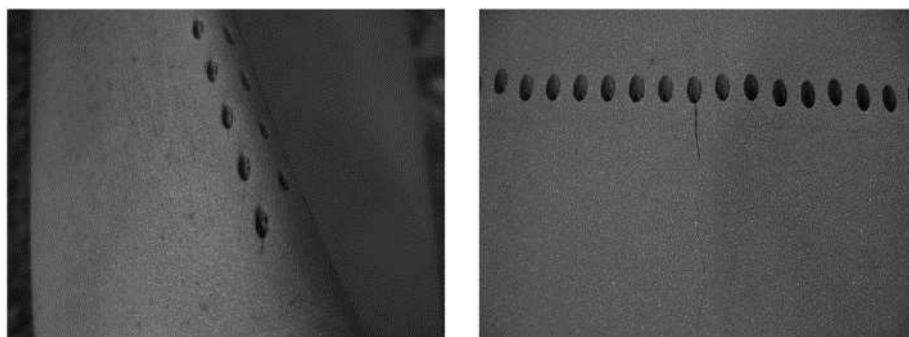
Pod koniec lat 80tych ubiegłego wieku, dzięki wprowadzeniu na szeroką skalę obrabiarek sterowanych numerycznie oraz generatorów tranzystorowych, do produkcji części chłodzonych zaczęto wykorzystywać drążenie elektroerozyjne (*ang. Fast Hole Drill*), które jako elektrody używa cienkiej rurki wykonanej z materiału przewodzącego. Przez otwory wypływa powietrze dostarczane przez kanały wewnętrzne pokazane na Rysunku 3-8.



Rysunek 3-8 Schemat przepływu wewnętrznego chłodzonego pióra oraz możliwe konfiguracje konstrukcji wewnętrznej (9).

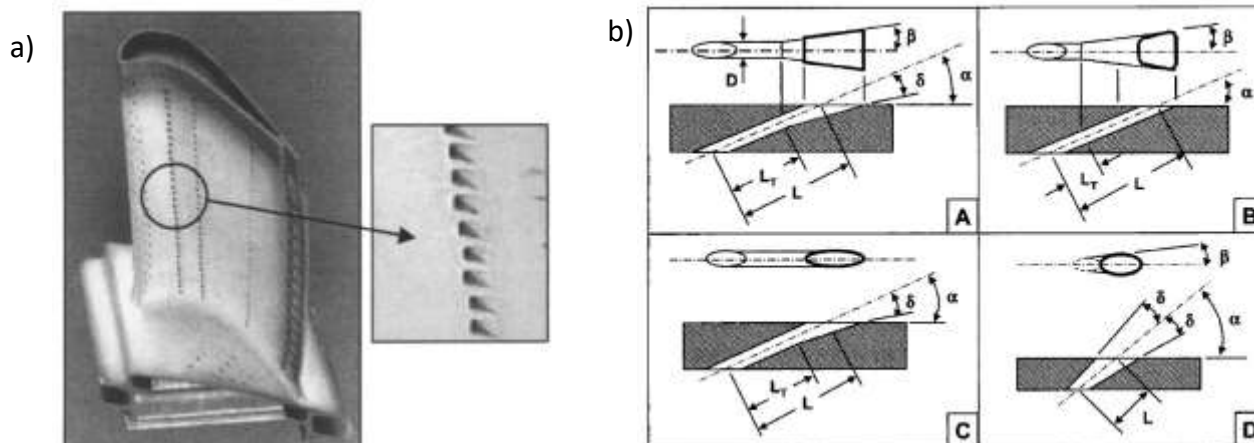
Nowy proces dawał dużo większą swobodę w rozmieszczaniu otworów na powierzchni części czego przykładem może być łopatką prezentowana na Rysunku 3-7. Pozwalał także na wykonywanie otworów kształtowych. Ze względu na fizykę zjawiska, obórka elektroerozyjna negatywnie wpływa na stan obrabianej powierzchni. Ponieważ jest to obróbka termiczna materiał usuwany jest w wyniku stopienia łukiem elektrycznym co powoduje powstanie na powierzchni obrabianej tzw. warstwy zmienionej. Warstwa ta ma nie tylko zmienioną strukturę, ale także skład chemiczny. Jak wykazała Zielińska (10) może to osłabiać strukturę wytwarzanej w kolejnych procesach powłoki dyfuzyjnej.

Wiele artykułów poświęcono analizie procesu drążenia elektroerozyjnego (11), (12). Poszukiwane są optymalne wartości parametrów procesu tak, aby zminimalizować czas obróbki przy jednoczesnym zachowaniu akceptowalnej chropowatości powierzchni oraz zużycia elektrody. Prowadzone są badania, których celem jest sprawdzenie wpływu stanu powierzchni po obróbce na odporność zmęczeniową materiału (12).



Rysunek 3-9 Przykłady pęknięć zmęczeniowo- korozyjnych z otworów chłodzących wykonywanych technologią drążenia elektro erozyjnego (12)

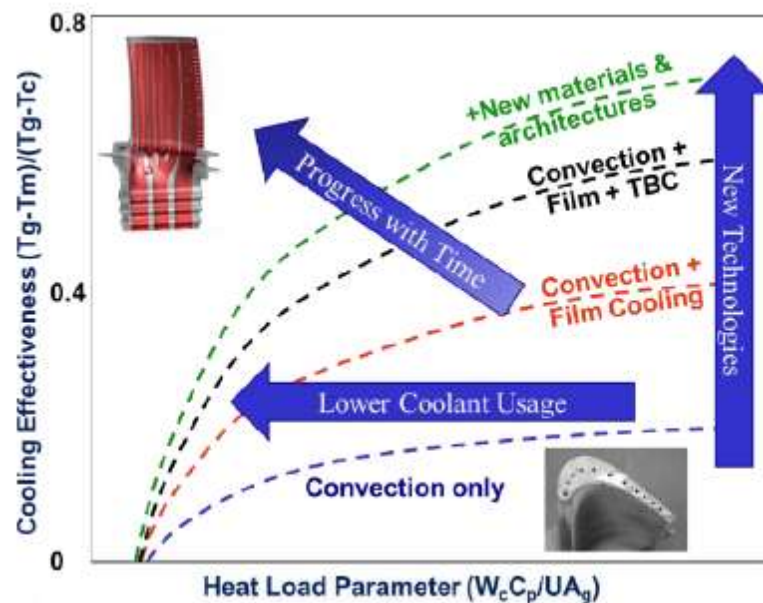
W połowie tak 80tych ubiegłego wieku obok otworów okrągłych widocznych na Rysunku 3-7 pojawiły się w tak zwane otwory kształtowe pokazane na Rysunki 3-10. Jak opisuje Bunker (13) stanowiły one kolejny przełom w projektowaniu turbin silników odrzutowych. Generowany przez otwory kształtowe film chłodzący zapewnia znacznie lepszą izolację materiału części.



Rysunek 3-10 a) otwory kształtowe we współczesnej łopatkę turbiny silnia lotniczego oraz b) podstawowe geometrie otworów kształtowych (13)

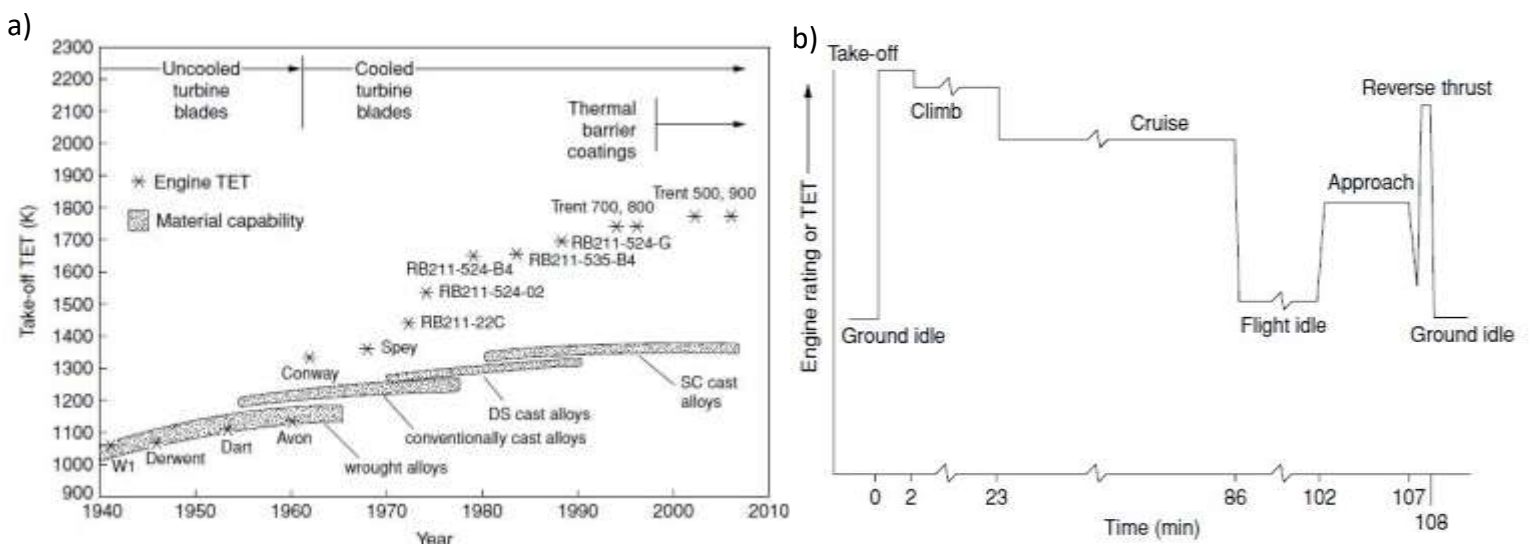
Jednocześnie, wykonanie otworów kształtowych z zachowaniem zamierzonej geometrii dyfuzora jest dużo bardziej skomplikowane w porównaniu do zwykłego otworu.

Wpływ procesu drążenia elektroerozyjnego na strukturę powierzchni detalu badał Novovic (14). Analizie poddawany był także wpływ obróbki na odporność zmęczeniową. Wpływ na jakość powierzchni badany był w pracy Ekmekcie'ego (15).



Rysunek 3-11 Konceptualne krzywe technologii chłodzenia części (2)

Kolejne wersje i generacje silników odznaczały się coraz to wyższą temperaturą wlotową turbiny (ang. Turbine Entry Temperature, TET). Jest to jedna z temperatur wyznaczających sprawność cyklu termodynamicznego silnika. Im jest ona wyższa, tym wyższa jest sprawność silnika.



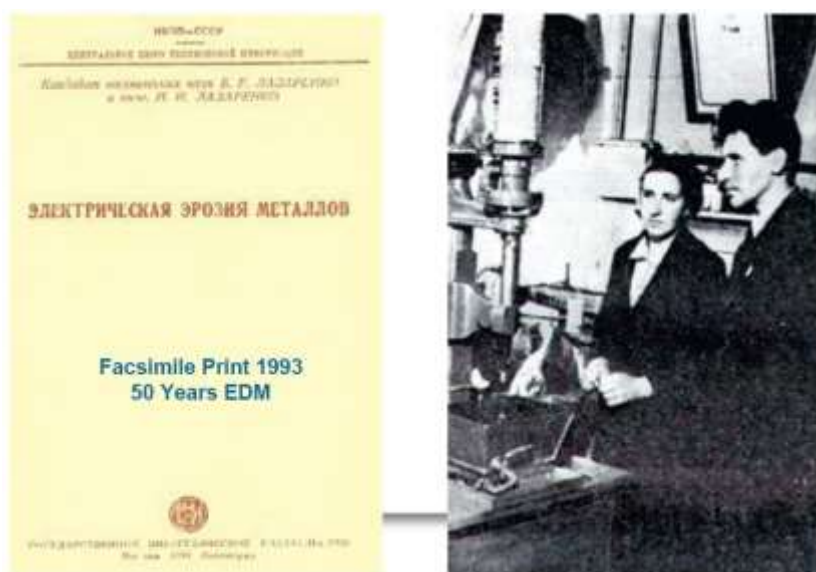
Rysunek 3-12 Wzrost temperatury wlotowej turbiny w odniesieniu do a) zmian materiałowych i konstrukcyjnych b) TET dla jednego cyklu (lotu) silnika. (16)

Podczas gdy sam przebieg cyklu silnika w zasadzie nie uległ zmianie i pozostaje taki jak na Rysunku 3-12-b to jak pokazano na Rysunku 3-12-a prawie dwukrotnie wzrosła wartość TET. Pierwsze silniki budowlane pod koniec lat 40 ubiegłego wieku miały temperaturę TET na poziomie 1000°C, podczas gdy dzisiejsze konstrukcje dochodzą do prawie 2000°C. Wzrost ten był możliwy dzięki połączeniu wysiłków zarówno w obszarze rozwoju nowych materiałów jak i konstrukcji detali. Trzeba podkreślić, iż rozwój ten nie byłby możliwy bez odpowiedniego zabezpieczenia części przed agresywnym działaniem środowiska.

3.2. Analiza tematu- obróbka elektro erozyjna

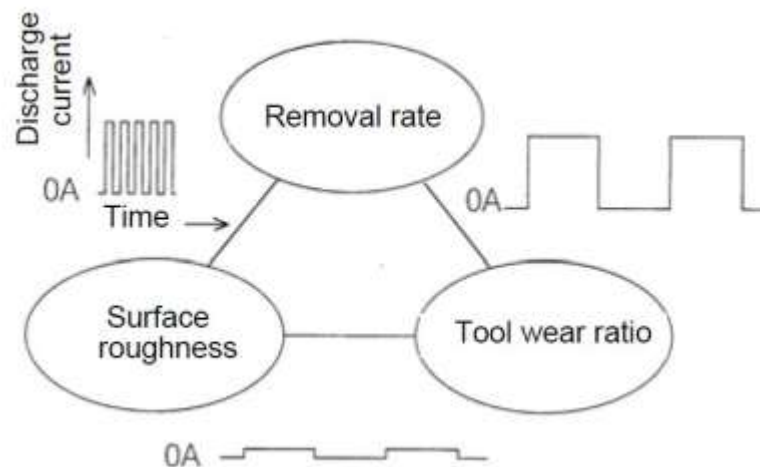
Technologia obróbki elektroerozyjnej jest przykładem procesu, którego rozwój napędzany jest z jednej strony potrzebą obrabiania nowych stopów, z drugiej poprzez dostępność coraz bardziej zaawansowanych systemów sterowania. W tym rozdziale omówię podstawy procesy elektroerozji.

Głównymi zmiennymi sterującymi procesem są parametry impulsu elektrycznego, parametry pracy elektrody oraz własności dielektryka. Są one przedmiotem szczegółowych analiz od momentu określenia technologii elektroerozyjnej jako nowej, oddzielnej technologii obróbczej. Proces został zbadany i opatentowany przez rosyjskich naukowców w połowie lat 40tych ubiegłego wieku. B. R. Lazarenko wraz z N.I. Lazarenko (17) otrzymali za zadanie zbadanie procesu wypalania się samochodowych styczników wolframowych. Następowoło to w wyniku niepożądanego iskrzenia. Efektem ich pracy było opisanie podstaw procesu obróbki elektro erozyjnej która umożliwia kontrolowaną obórkę elementów przewodzących.



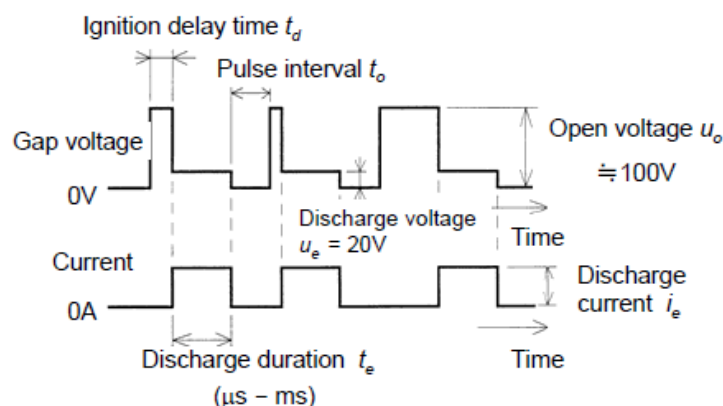
Rysunek 3-13 Wydana w 1943 roku praca B.R. Lazarenko: „Inversion of the erosion of metals and measured against contact devastation” Moskiewski Instytut Zjednoczenia, Uniwersytet Moskiewski (17)

W przemyśle niezależnie od metody czy technologii wymagania stawiane procesom są od lat niezmiennie. Wszyscy producenci dążą to tego, aby elementy wykonywane były jak najtaniej. Z punktu widzenia obróbki detalu oznacza to iż musi być ona jak najkrótsza, obrabiarki jak najtańsze, narzędzie nie powinny zużywać się wcale a proces powinien dawać 100% zgodnych części. Są to określone cele dla technologii- które stanowią jedną stronę równania. Po drugiej znajduje się proces, którym możemy sterować przy pomocy zmiennych istotnych. Ukierunkowany dobór parametrów pozwala na jego optymalizację dla danego wymogu. Proces elektroerozji, podobnie jak proces obróbki laserowej odznacza się ograniczeniami wywodzącymi się z jego fizyki. Dobrze opisał to Kunieda (18) biorąc pod uwagę trzy główne charakterystyki procesu elektroerozji: prędkość obróbki, zużycie narzędzia oraz chropowatość powierzchni, prowadząc optymalizację parametrów impulsu możemy jednocześnie poprawić wyniki dwóch z trzech charakterystyk.



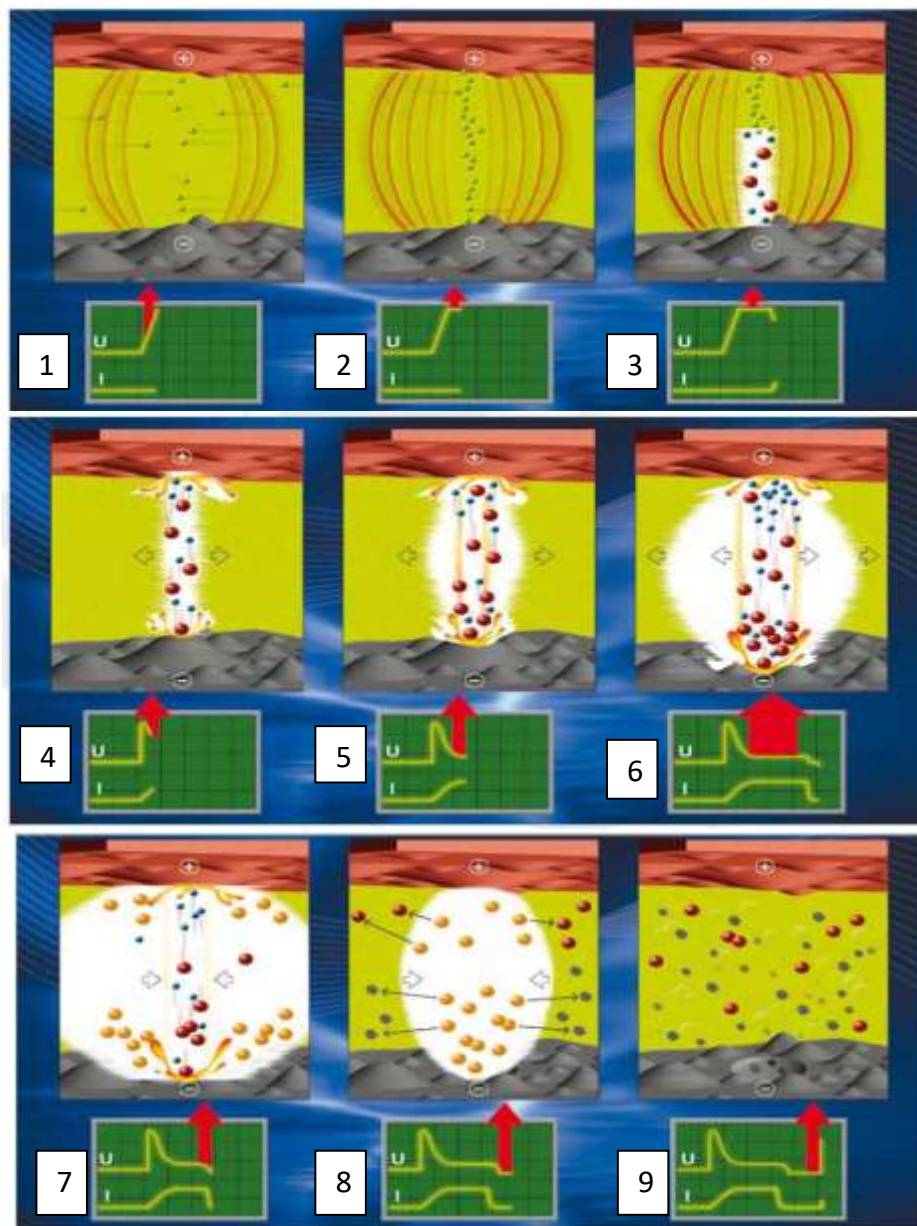
Rysunek 3-14 Trójkąt ograniczenia optymalizacji procesu EDM (18).

Podstawowe parametry procesu to napięcie (V), natężenie (A), czas pracy (T_{on}) oraz czas płukania (T_{off}). Schematycznie znaczenie poszczególnych zmiennych pokazano na Rysunki 3-15.



Rysunek 3-15 Przebiegi napięcia w natężenia prądu w procesie EDM (18)

Jaka jest interpretacja fizyczna wykresów napięcia i natężenia w szczelinie roboczej pomiędzy elektrodą a materiałem obrabianym? Najlepsze przedstawienie graficzne tego zjawiska pochodzi z ulotki firmy *Oelheld*- producenta płynów technologicznych w tym do obrabiarek EDM. Schemat przedstawiony jest na Rysunku 3-16.



Rysunek 3-16 Cykl formowania iskry, przeskoku oraz studzenia obszaru.

(<https://www.oelheld.com/en/>, dostęp 16.03.2023)

Jak widać cykl pojedynczej iskry składa się z dziewięciu etapów:

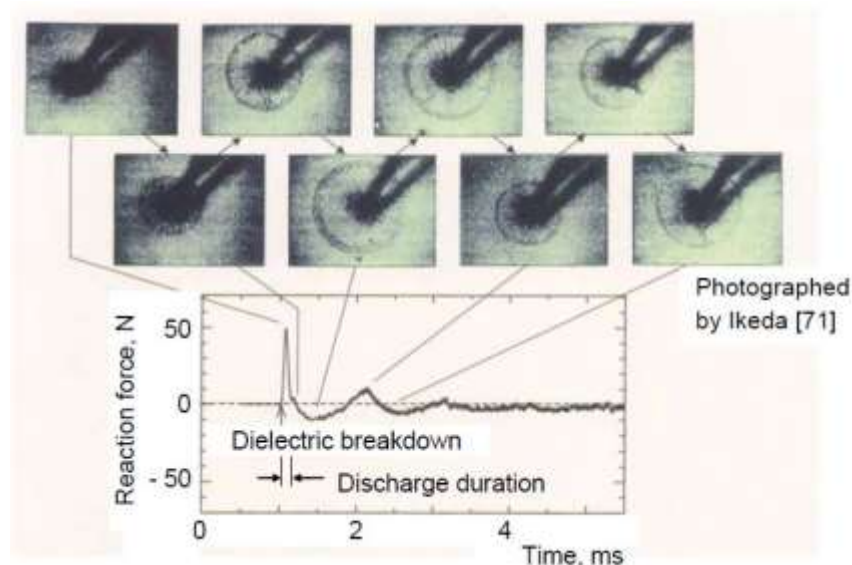
- 1) Wstępne formowanie kanału jonowego. Jest on efektem pola elektrostatycznego powstałego po pojawieniu się napięcia pomiędzy elektrodą a katodą. Pomimo iż płyn

wypełniający szczelinę jest nieprzewodzący i ilość swobodnych jonów jest niewielka wystarcza to do stworzenia ścieżki jonowej. Przyłożone napięcie wzrasta do napięcia inicjującego pozwalającego na przełamanie rezystancji dielektryka.

- 2) Uformowanie ścieżki jonowej zdolnej do transportu elektronów. Napięcie inicjujące osiąga swoją graniczną wartość. Na tym etapie nie ma przepływu elektronów- natężenie prądu wynosi 0 amper.
- 3) Po ścieżce jonów zaczynają przepływać elektrony. Wartość natężenia zaczyna rosnąć, natomiast zaczyna spadać napięcie. Dla zobrazowania fizyki zjawiska można porównać przepływ prądu do przepływu wody w wężu, gdzie ciśnienie wody to napięcie a wydatek to natężenie. Rezystancja to zwężenie, które ogranicza przepływ.
- 4) Kanał, tym razem już elektronowy, czyli iskra, łączy elektrodę z materiałem obrabianym. Emitowane jest ciepło.
- 5) Przepływ elektronów przyspiesza (natężenie rośnie, napięcie spada). Gwałtownie podgrzany materiał elektrody oraz materiał detalu ulegają stopieniu i częściowo odparowaniu. Płyn wypełniający szczelinę gwałtownie odparowuje co wywołuje pojawienie się bąbli gazowych.
- 6) Przepływ elektronów stabilizuje się. Napięcie osiąga wartość roboczą. Natężenie pozostaje na tym samym poziomie. W obszarze pojawiają się drobiny roztopionych metali.
- 7) Przepływ elektronów zostaje zamknięty. Kanał plazmowy ulega zapadnięciu. Rozgrzane drobiny materiału osiadają się na okolicznych ściankach bądź zastygają w postaci drobnych, swobodnych kulek. Wartość natężenia spada. Napięcie zaczyna rosnąć.
- 8) Obszar ulega gwałtownemu ochłodzeniu. Gazowy bąbel zapada się. Pozostałe jeszcze płynne fragmenty metali ulegają zestaleniu. Napięcie dalej rośnie. Przy braku przepływu elektronów natężenie ma wartość zerową.
- 9) Obszar ulega całkowitemu ochłodzeniu. Przepływ dielektryka usuwa z miejsca wyładowania metaliczne drobiny oraz w przypadku dielektryków na bazie węglowodorów- zwęglenia. Napięcie rośnie do inicjującej wartości granicznej.

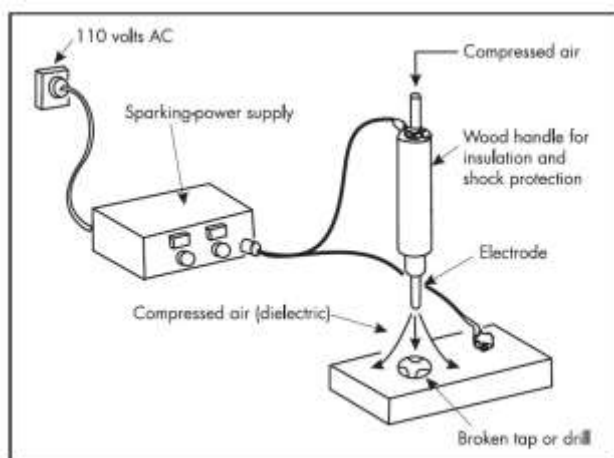
Całość zjawiska trwa milisekundy a powtarzane miliony razy powoduje mierzalną erozję materiału. Ikeda wykonał zdjęcie pojedynczej iskry przy jednoczesnym pomiarze siły wynikającej z „wybuchu” bąbla gazowego (19).

Pierwsza naukowa analiza procesu elektrodrążenia przeprowadzona została przez państwo Lazarenko w 1943 roku. Niemniej pierwsze celowe wykorzystanie zjawiska elektroerozji miało miejsce w Stanach Zjednoczonych pod koniec lat 30 XX wieku. Było to urządzenie pneumatyczno-elektryczne które pozwalało na usuwanie złamanych gwintowników i wiertel z kosztownych



Rysunek 3-17 Zmiana bąbla gazowego oraz pomiar siły ($I=30A$, $T_e=150\mu s$, $gap=0.15mm$, anoda-miedź $\Phi 20mm$. Katoda $\Phi 20mm$) (19)

odlewów. Urządzeniem ręcznie sterował operator. Napięcie było stale przyłożone do elementu obrabianego i pneumatycznie poruszanej elektrody. Sprężone powietrze wprawiające w ruch elektrodę usuwało także drobiny będące efektem pracy urządzenia.

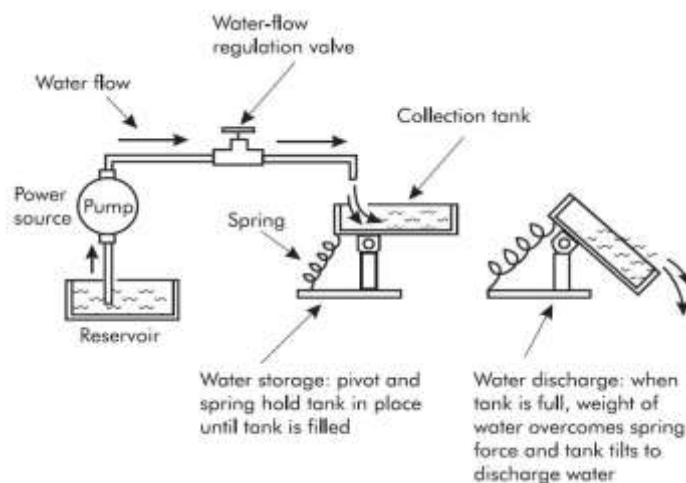


Rysunek 3-18 Pierwsze urządzenie wykorzystujące zjawisko elektro erozji. (20)

W kolejnych wersach konstruktorzy wprowadzili do swojego urządzenia zarówno mechaniczną kontrolę przemieszczenia elektrody, jak i przełącznik potencjału.

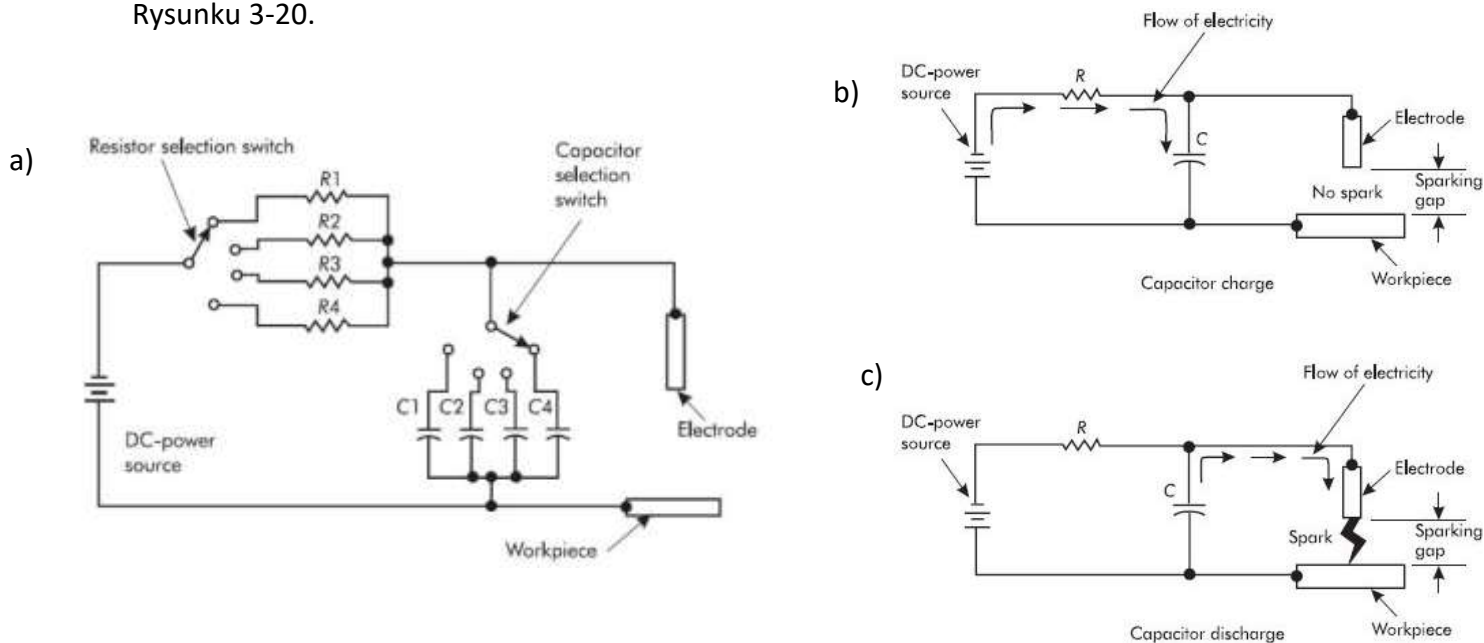
Rozwój obróbki elektroerozyjnej opisany jest w pracy B. M. Schumacher, R. Krampitz, J.-P. Kruth "Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push"" (21). Opisano w niej jak technologia ewoluowała po obu stronach Żelaznej Kurtyny. Do połowy lat 60tych państwa bloku wschodniego wyprzedzały przedsiębiorstwa zachodnie w rozwoju tej technologii. Zastosowany układ R-C pozwalał na budowanie urządzeń o

większych możliwościach i szerszym zakresie nastaw w porównaniu do rozwiązań stosowanych na zachodzie. Jest to możliwe dzięki naturalnej częstotliwości wzbudzenia jaką posiada układ o zadanych wartościach rezystancji R i pojemności C . Układ porównać można do przedstawionego na Rysunku 3-19 układu hydraulicznego. Zawór pełni tu funkcję analogiczną go rezystora ograniczającego przepływ prądu, natomiast uchylny pojemnik- kondensatora.



Rysunek 3-19 Schemat działania układu RC na przykładzie układu hydraulicznego. (20)

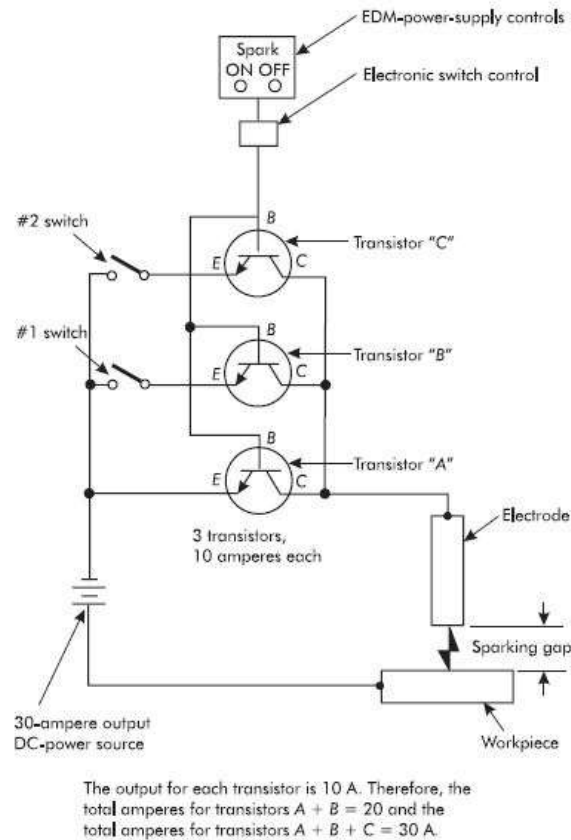
Przy zastosowaniu szeregu rezystorów oraz kondensatorów otrzymano układ o możliwościach doboru głównych parametrów procesu: napięcia wyładowania (U), natężenia przepływającego prądu (I), czasu wyładowania (T_{on}) oraz czasu płukania (T_{off}). Schemat pokazany jest na Rysunku 3-20.



Rysunek 3-20 a) schemat nastawnego układu RC b) ładowanie kondensatora c) rozładowanie kondensatora połączone z wyzwoleniem iskry. (20)

Rozwiązania wykorzystywane w urządzeniach konstruowanych w USA, Francji czy Niemczech Zachodnich oparte były na próżniowej lampie elektronowej która pełniła rolę przełącznika.

Obecnie produkowane urządzenia w znacznej większości opierają się na układach tranzystorowych, które kontrolują zarówno częstotliwość wyładowań jak i natężenie czy napięcie prądu. Układy takie cechują się bardzo dużą precyzją i stabilnością.



Rysunek 3-21 Schemat układu opartego o zestaw tranzystorów. (20)

Przełomem w wykorzystaniu urządzeń do obróbki elektroerozyjnej było zastosowanie kontroli posuwu osi za pomocą silników krokowych sterowanych numerycznie. Pierwsze takie urządzenie zaprezentowano podczas międzynarodowej wystawy Expo w Montrealu w roku 1967. Skonstruowano je w Związku Radzieckim. Na bazie tej technologii powstały trzy główne grupy obrabiarek: drutowe, wgłębne, drążarki.



Rysunek 3-22 Od lewej: GF Form P350- EDM wgłębny, Tek4 Aero- drążarka do małych otworów, Sodick AL600P- wycinarka drutowa.

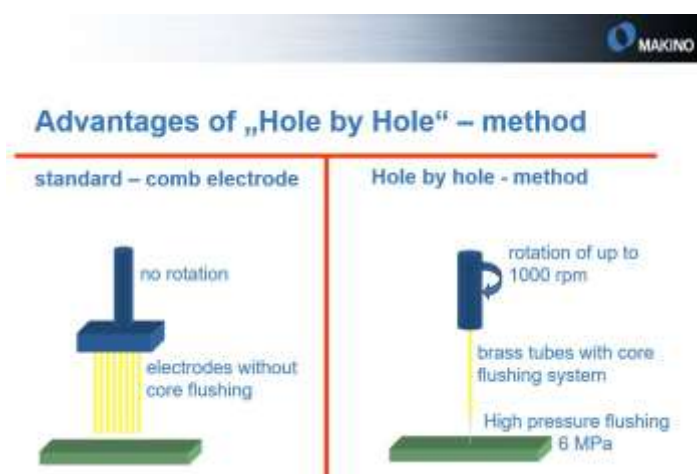
(www.gfms.com, www.tek4.co.uk, www.sodick.com, dostęp 17.03.2023)

Wszystkie opisane urządzenia opierają się na tej samej koncepcji opracowanej w połowie lat 40 XX wieku. Przepływ energii w postaci iskry powoduje podgrzanie a następnie usunięcie materiału poprzez jego stopienie bądź odparowanie. Dobór systemu generującego potencjał elektryczny, izolatora oddzielającego elektrodę od materiału obrabianego czy materiał i typ elektrody pozwalają na wykorzystanie procesu w konkretnym celu oraz jego optymalizację.



Rysunek 3-23 Priorun na pustyni Mojave [autor: Jessie Eastland - Own work, CC BY-SA 4.0, (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44273148>, dostęp 17.03.2023)]

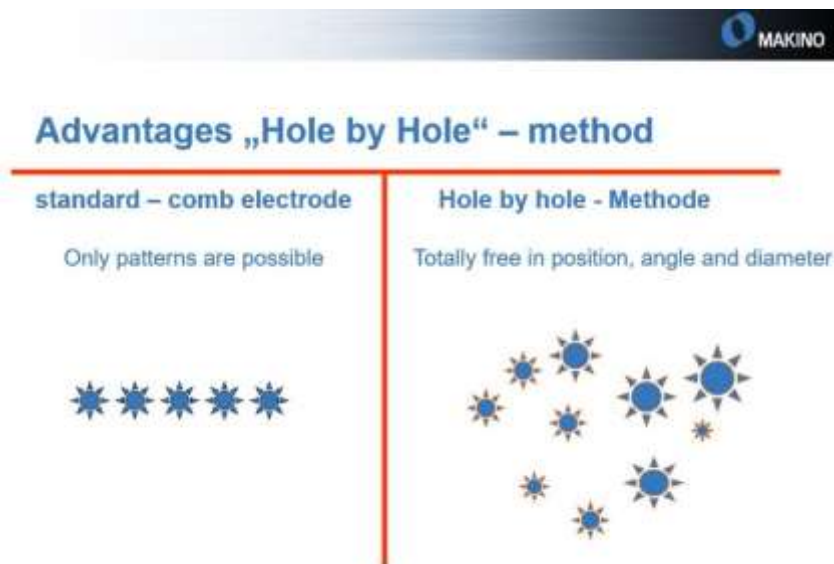
Najogólniej, w celach poglądowych, proces elektroerozji można porównać do wyładowania atmosferycznego, które powtarzane jest setki tysięcy razy w ciągu sekundy. W obszarze kontroli procesu najtrafniejsze wydaje się porównanie do wykonywania otworu w wosku rozgrzaną igłą. Jeżeli igła będzie zbyt gorąca albo będzie zanurzona w wosku zbyt długo nie otrzymamy zakładanego kształtu. Igła zbyt zimna lub wyjęta zbyt szybko nie pozwoli na uzyskanie oczekiwanego kształtu. W rzeczywistym procesie wysoka gęstość energii w obszarze roboczym oddziałuje na elektrodę, detal a także dielektryk wypełniający szczelinę gwałtownie podnosząc ich temperaturę. W łuku plazmowym dochodzi ona do kilkudziesięciu tysięcy stopni. Gwałtowny przepływ energii powoduje równie gwałtowne odparowanie dielektryka. Efektem tego jest gazowy bąbel powstający wokół łuku plazmy. Jednocześnie podgrzewany jest materiał elementu i elektrody- one także ulegają bądź to odparowaniu bądź stopieniu. Wraz z upływem czasu obszar ochładza się, gazowy bąbel ulega zapadnięciu a w rejonie wyładowania pozostają drobiny przetopionego materiału. Drobiny te mogą zmienić przewodność dielektryka, który pełniąc rolę izolatora kontroluje minimalne napięcie inicjujące wyładowanie, a co za tym idzie częstotliwość i moc wyładowań. Dlatego też tak istotne w procesie obróbki elektro erozyjnej jest zapewnienie odpowiedniego płukania obszaru roboczego. Wysoka czystość dielektryka przekłada się na stabilność pracy. Przykład wpływu zanieczyszczenia maszyny na proces oraz wpływ wydatku na stabilność badanego procesu zostanie omówiona w dalszej części pracy. Rozwijanym procesem, za pomocą którego wykonano otwory chłodzące jest drążenie elektroerozyjne (*ang. Electro Discharg Drilling- EDD lub Fast Hole Drill- FHD*). Urządzenia te pojawiły się na początku lat 80 ubiegłego wieku. Ich wykorzystanie umożliwiło zmianę technologii wykonywania otworów. Wcześniej używana obróbka elektrodą grzebieniową była bardzo wrażliwa na stan elektrody. Jakikolwiek uderzenie czy naciśnięcie na elektrodę powodowało zmianę w położeniu zębów elektrody co skutkowało niewłaściwym położeniem otworów na detalu. Dobrze obrazują to materiały firmy Makino pokazane na Rysunku 3-24 i 3-25.



Rysunek 3-24 Porównanie pracy elektrody grzebieniowej oraz elektrody rotującej.

(<https://www.makino.com/en-us/makino-expertise>, dostęp 10.03.2023)

Elektroda grzebieniowa pozwalała na wykonywanie kilku otworów na raz, jednak nie powodowało to przyspieszenia obróbki. Nierównomierne wypalanie pojedynczych końcówek elektrody wymuszało częste odświeżanie kształtu elektrody- co spowalnia cały proces. Ponadto drążenie taką elektrodą wymagało płukania zewnętrznego, co w przypadku wiotkich i cienkich elektrod miało pewne ograniczenia. Strumień dielektryka powodował drgania elektrody, a co za tym idzie, zmniejszenie dokładności wykonywanych kształtów. Drążenie elektrodą rurkową okazało się znacznie szybsze i precyzyjniejsze. Zniknęło jednocześnie ograniczenie położenia otworów na części. Przy drążeniu pojedynczą elektrodą położenie nie jest kontrolowane



Rysunek 3-25 Porównanie układów otworów możliwych do wykonania elektrodą grzebieniową i elektrodą rotującą.

(<https://www.makino.com/en-us/makino-expertise>, dostęp 10.03.2023)

poprzez kształt elektrody a przez kod i sterowanie numeryczne. Schematycznie pokazano to na Rysunku 3-25. Dodatkowo koszt mało skomplikowanej elektrody jest nieporównywalnie niższy. Obróbka EDD daje jeszcze jedną bardzo istotną możliwość. Pojedynczą elektrodę można wykorzystać w sposób analogiczny do freza palcowego i można nią usuwać materiał nie tylko drążąc, ale także przesuwając elektrodę nad materiałem. Taki sposób obróbki umożliwił nadanie otworom kształtów. Nowa metoda produkcji umożliwiła rozwój procesów produkcyjnych zwiększając ich wydajności. Zastosowanie EDD umożliwiło wyeliminowanie elektrod grzebieniowych oraz procesy STEM używającego szklane kapilary. Rozwój wierszowania zwiększył elastyczność procesu w obszarze wykonywanych geometrii otworów kształtowych.

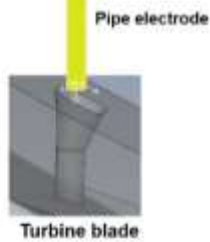
Diffuser Machining (current technology)

Make Electrode
→ Electrode is necessary



Orbiting

→ 3 axis direction
→ Efficiency is no good



Fan Shape (Flare Machining)



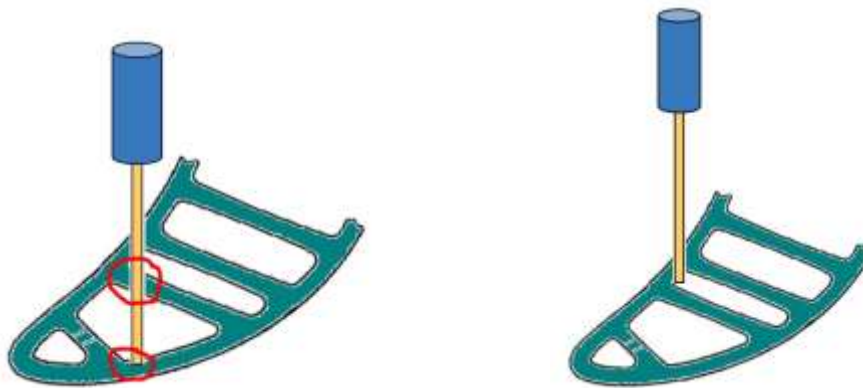
Possible by contouring program



Rysunek 3-26 Wykonanie otworów kształtowych elektrodą kształtową oraz techniką wierszowania elektrodą rotującą.

(<https://www.makino.com/en-us/makino-expertise>, dostęp 10.03.2023)

Proces EDD ma jeszcze jedną niezwykle istotną zaletę. Do wytworzenia na elementach chłodzonych filmu konieczne jest powietrze, które od wewnątrz musi dotrzeć do otworów. Schemat przepływu wewnątrz takiej części pokazano na Rysunku 3-8. Prawidłowe wykonanie otworu wymaga, aby zatrzymać elektrodę po przebiciu ścianki, w której wykonywany jest otwór tak aby nie uszkodzić ścianki naprzeciwległej. Sytuacje taką widać na Rysunku 3-27. Systemy wykrywające przebicie zostały opracowane i są elementem urządzeń do wykonywania otworów chłodzących. Producenci wraz z naukowcami opracowali kilka metod wykrywania przebicia, które bazują na różnych sygnałach. Informacją o przebiciu może być zmiana posuwu elektrody, częstotliwości wyładowań czy zmiana ciśnienia w kanale wewnętrznym.

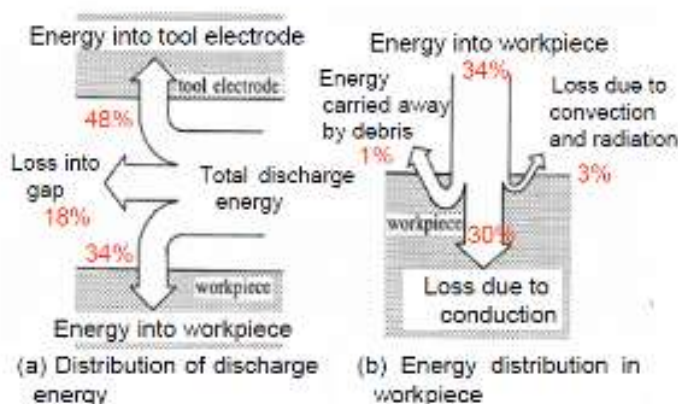


Rysunek 3-27 Po lewej- wykonanie otworu bez detekcji przebicia może spowodować uszkodzenie zarówno wewnętrznej struktury kanałów jak i przeciwległej ścianki. Po prawej- system detekcji przebicia zatrzymuje elektrodę po wykonaniu otworu.

(<https://www.makino.com/en-us/makino-expertise>, dostęp 10.03.2023)

Sprawny system wykrywający przebicie jest kluczowy dla zapewnienia wysokiej jakości procesu produkcyjnego. Bez niego produkcja zaawansowanych części chłodzonych nie byłaby możliwa.

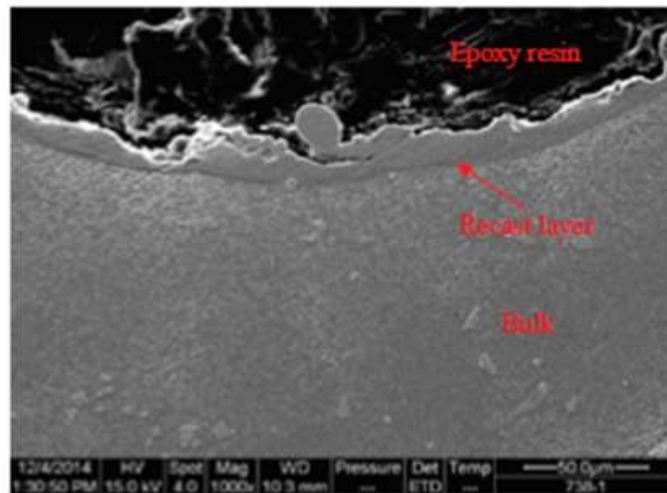
Elektro drążenie jest tak zwanym procesem niekonwencjonalnym. Skąd taka nazwa? W obróbce konwencjonalnej następuje kontakt narzędzia z przedmiotem obrabianym tak jak ma to miejsce przy frezowaniu. Dodatkowo w materiale obrabianym pod wpływem obróbki nie zachodzą zmiany struktury, składu chemicznego czy stanu powierzchni. Obróbka elektroerozyjna charakteryzuje się brakiem fizycznego kontaktu pomiędzy elektrodą a detalem. Przyjmuje się, iż siły pojawiające się jako wynik gwałtownego odparowania dielektryka są pomijalnie małe. W procesie materiał usuwany jest w wyniku wyładowania elektrycznego, które pojawia się pomiędzy elektrodą a materiałem obrabianym. Po zetknięciu z detalem energia wyładowania zamieniana jest w ciepło, które powoduje lokalne odparowanie i stopienie zarówno materiału elektrody jak i materiały poddawanego obróbce. Jednocześnie część energii przekazywana jest do wypełniającego szczelinę międzyelektrodową płynu. Szacunkowy rozdział strumienia energii cieplnej pokazany jest na Rysunku 3-28.



Rysunek 3-28 Podział strumieni energii w procesie elektro erozji (18).

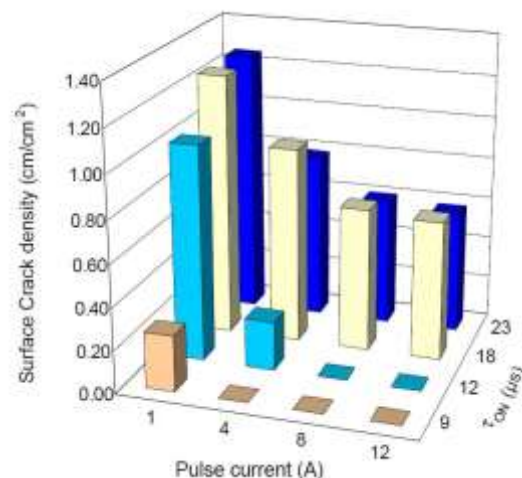
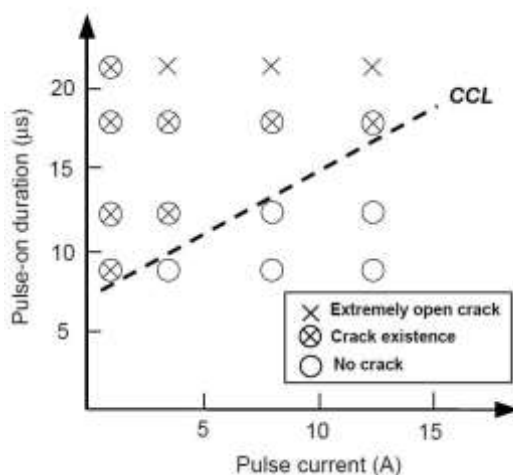
Każdy proces przemysłowy powinien być z jednej strony możliwie najkrótszy z drugiej zużywać jak najmniej narzędzia. Dodatkowo, specyficzną dla procesu elektrodrążenia metryką jest grubość tzw. warstwy zmienionej oraz występowanie mikropęknięć. Warstwa zmieniona pokazana na Rysunku 3-29 powstaje w wyniku stopienia materiału detalu jak i w zastygania na powierzchni drobin stopionego materiału. Pęknięcia generowane są przez dwa mechanizmy. Pierwszy odnosi się do różnych współczynników rozszerzalności cieplnej warstwy przetopionej oraz materiału elementu. Gwałtowne podgrzewanie a następnie ochładzanie powoduje powstawania mikropęknięć. Drugi mechanizm ma związek z mikrostrukturą stopów umacnianych wydzieleniowo węglkami na granicach ziaren. Ponieważ węgliki są materiałem dobrze przewodzącym, podczas obróbki elektroerozyjnej ulegają szybszemu niż materiał otaczający wypaleniu. Efekt interpretowany jest jako mikropęknięcie na granicy ziarna. Ze względu na

wysoką twardość, podatność na pękanie oraz niejednorodność dąży się do zminimalizowania grubości warstwy (22). Li wraz z zespołem (23) opisał wpływ takich parametrów jak czas pracy, czas przerwy, napięcie robocze, natężenie oraz ciśnienie dielektryka. Przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na wyselekcjonowanie zestawu parametrów które pozwoliły na zmniejszenie warstwy zmienionej z 10,472 μm do 2,416 μm .



Rysunek 3-29 Zdjęcie warstwy zmienionej wykonanej w technologii SEM (23).

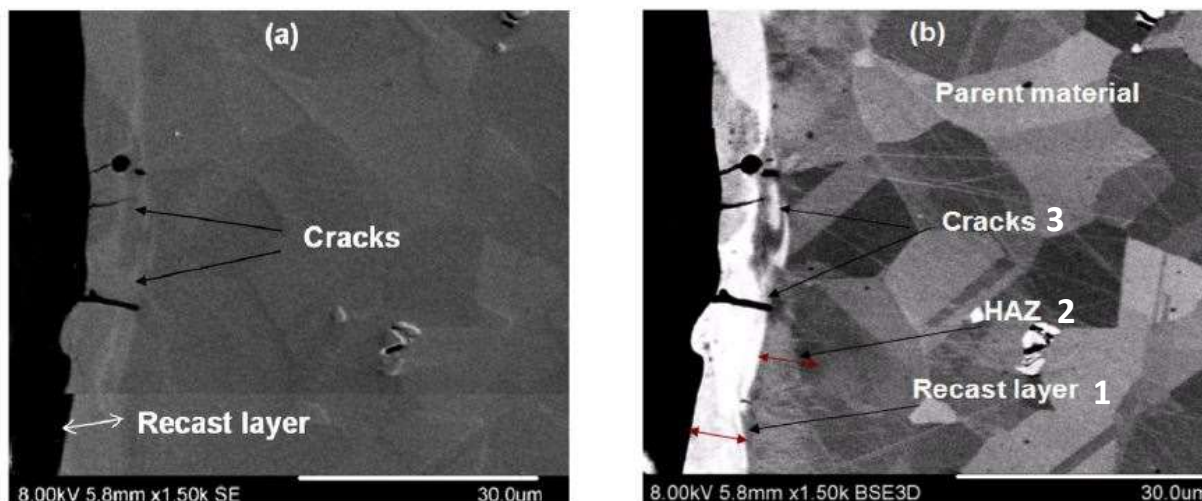
Świercz w swojej pracy (24) wskazał główne parametry wpływające na chropowatość powierzchni oraz grubość warstwy przetopionej. Decydujący wpływ zarówno na chropowatość jak i na grubość warstwy przetopionej mają: natężenie, czas pracy oraz czas płukania. Podobne, ale nieidentyczne wnioski wysnuł w swojej pracy H.T. Lee (25). Według Lee głównym czynnikiem wpływającym na grubość warstwy zmienionej jest czas pracy, natomiast natężenie wskazane jest



Rysunek 3-30 Wykresy obrazujące wpływ natężenia oraz czasu trwania impulsu na występowanie mikropęknięć. (25)

jako drugi w kolejności czynnik znaczący. W kolejnej publikacji (26) zweryfikowana zostaje możliwość doboru parametrów tak aby zredukować ilość mikropęknięć.

Warstwa przetopiona obok wysokiej chropowatości oraz podatności na pękanie wykazuje zwiększoną twardość. Analizę stanu warstwy wierzchniej oraz zmiany twardości przeprowadził w swojej pracy Irman (27).



Rysunek 3-31 Powierzchnia próbki wykonanej z IN718 po obróbce EDM, analiza a) SEI i b) BSE. Widoczna strefa przetopiona-1, zmieniona cieplnie- 2 oraz pęknięcia-3. (27)

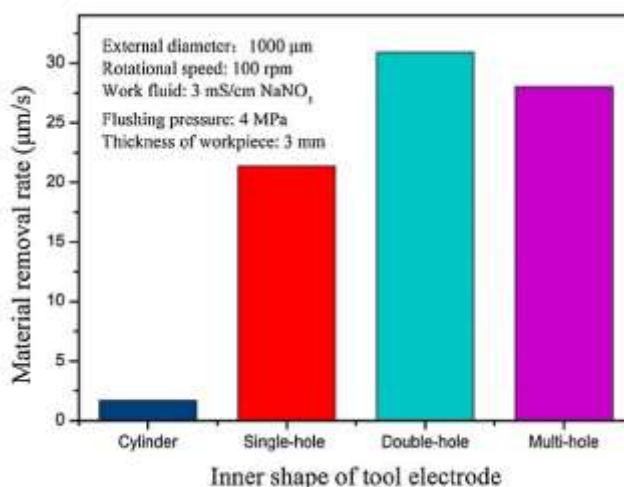
Na Rysunku 3-31 pokazano wszystkie trzy warstwy jakie są efektem obróbki elektro erozyjnej: 1) warstwa przetopiona (*ang. recast layer, RL*), 2) warstwa wpływu ciepła (HAZ) oraz 3) materiał rodzimy. Widać wyrażenie pęknięcia w warstwie przetopionej. Nie widać natomiast aby penetrowały one materiał rodzimy.

W procesie produkcji elementów chłodzonych równie ważne jak integralność powierzchni jest także geometria wykonywanych detali. Parametry procesowe mają wpływ nie tylko na stan powierzchni, ale także na kształt i dokładność wykonania otworów. Dwoma najczęściej weryfikowanymi współczynnikami są rozbieżność średnicy otworu oraz pochylenie ścianek. Machno w swojej pracy (11) wykazała, iż wraz ze zwiększeniem długości czasu trwania wyładowań zmniejsza się pochylenie. Jednocześnie Sarikaya i Yilmaz (28) wykazali, że zarówno średnica otworu jak i pochylenie ulega znacznemu zwiększeniu wraz ze wzrostem natężenia.

Dokładność wykonania, niska chropowatość czy brak mikrouszkodzeń to jednak dopiero połowa sukcesu w przypadku elementów pracujących w ekstremalnie korozyjnym środowisku jakim jest ścieżka gazów w silniku turbinowym. Bez odpowiedniego zabezpieczenia najlepiej wykonane elementy nie byłyby w stanie spełnić oczekiwań związanych z długotrwałością życia eksploatacyjnego oraz wysokiej niezawodności. Wiodącą linią obrony są tu szeroko wykorzystywane powłoki antykorozyjne.

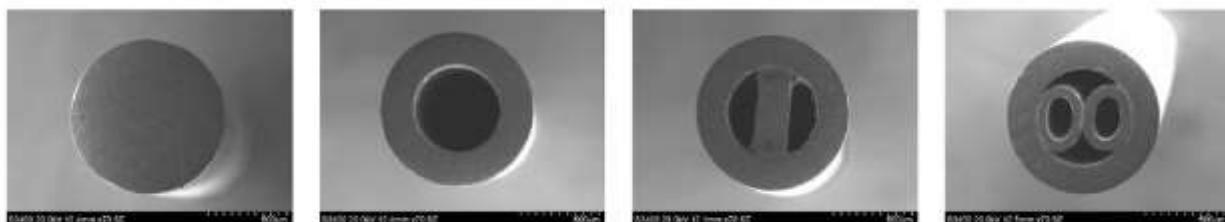
3.2.1. Drażnienie elektro erozyjne

Drażnienie elektro erozyjne wykorzystuje te same mechanizmy fizyczne co drażnienie wgłębne. Różnica polega na budowie mechanicznej urządzenia oraz użytej elektrodzie. Drażnienie realizuje się elektrodami, które mają kształt jedno lub wielokanałowej rurki. Wewnętrznym kanałem lub kanałami w przypadku elektrod wielokanałowych tłoczona jest woda dejonizowana. Ze względu na małe rozmiary wewnętrzne elektrod woda podawana jest pod wysokim ciśnieniem rzędu 0.5-50MPa (29). Wpływ geometrii wewnętrznej odgrywa również rolę- zwłaszcza dla elektrod o mniejszych średnicach. Wpływ płukania wewnętrznego na prędkość drażnienia elektro erozyjnego bardzo dobrze obrazuje wykres przedstawiony na Rysunku 3-32. Jest to część podsumowania efektów prac zrealizowanych przez Zhanga (30).



Rysunek 3-32 Wpływ wewnętrznego płukania oraz budowy elektrody na wydajność procesu elektro drażnienia. (30)

Zmienną o wiodącym znaczeniu jest płukanie obszaru roboczego, natomiast wewnętrzna struktura ma dużo mniej istotny wpływ na proces. Do wniosku takiego skłania wykres, który przedstawiono na Rysunku 3-32. Drażnienie elektrodą litą, która nie daje możliwości bezpośredniego płukania jest 10 krotnie wolniejsze w porównaniu do elektrod jedno i wielokanałowych. W tej grupie elektrod z kanałem wewnętrznym różnica wynosi do 30%. Różnica ta oprócz intensywności płukania wynikać może z czynników nie uwzględnionych w pracy Zhanga.

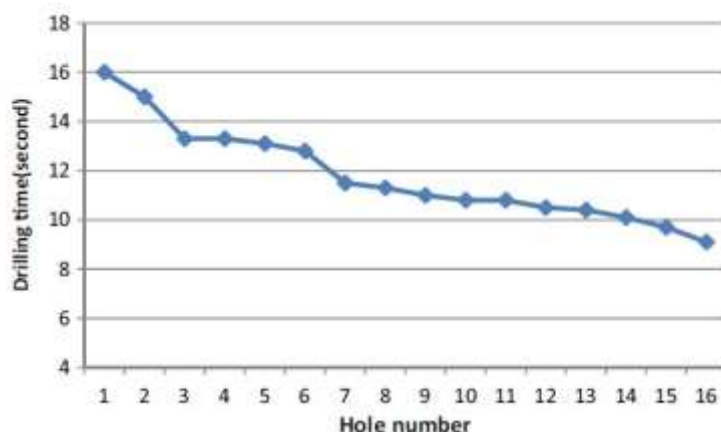


Rysunek 3-33 Kształt wewnętrznej geometrii elektrod wykorzystanych przez Zhanga. (30)

Czynnikami takimi są: skład materiałowy elektrod, pole przekroju materiału elektrody czy różnej długości elektrod. Istotnym elementem jest także chropowatość wewnętrzna elektrod. Zmienne te są trudne do uchwycenia i mogą zniekształcać wyniki. Niektóre z wymienionych czynników poddane zostały analizie i są opisane w dalszej części pracy. Wpływ długości elektrody na proces drążenia elektroerozyjnego został poruszony przez Skrabalaka (31) oraz Gao (32). Ten ostatni w swojej pracy nad otworami ukośnymi zauważył, iż wraz ze skracaniem elektrody znacząco spada czas drążenia. Hipoteza przyjęta przez Gao opierała się na założeniu, iż skrócenie procesy jest wynikiem skracania elektrody. Zgodnie z prawem Bernouliego, nielepka i nieściśliwa ciecz przepływa z wydatkiem Q przez kanał o średnicy D zgodnie z równaniem:

$$Q = y(x) + \frac{p(x)}{\rho g} + \frac{V(x)^2}{2g}$$

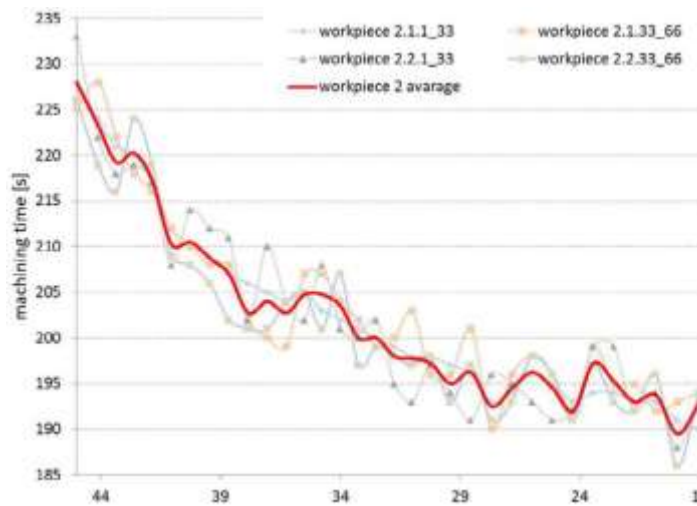
Wynika z niego, iż wraz ze skracaniem elektrody wzrośnie wydatek- co jak sugeruje autor wpłynie na redukcję czasu drążenia.



Rysunek 3-34 Zmiana czasu drążenia otworów elektrodą rurkową przez Gao. (32)

Jak pokazano na Rysunku 3-34 redukcja czasu drążenia jest znaczna i wynosi prawie 50%. Warto dodać informacje o tym, iż do badań użyto elektrody mosiężnej o średnicy zewnętrznej 0.3mm, średnicy wewnętrznej 0.12mm oraz długości 350mm. Woda dejonizowana podawana była do wrzeciona pod ciśnieniem 6.9 MPa.

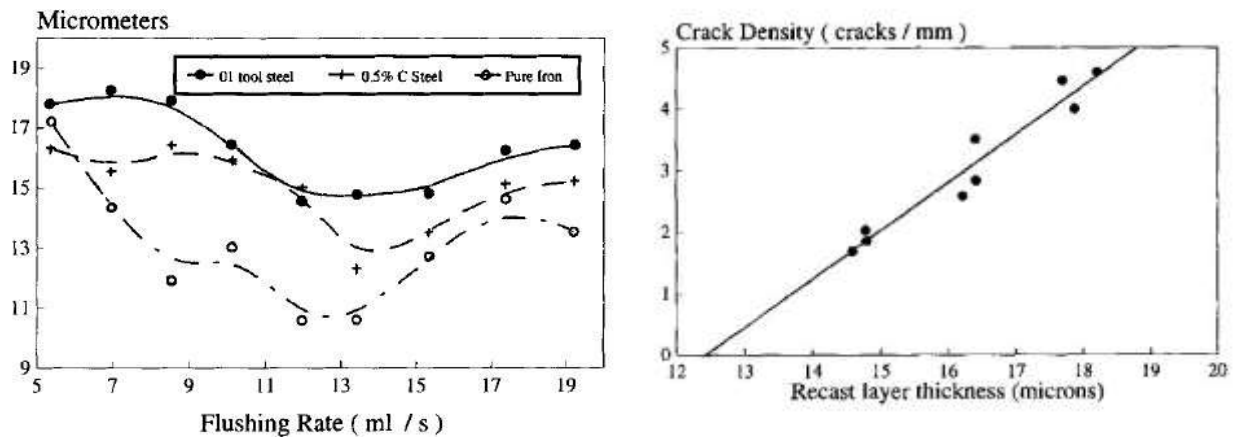
Jednocześnie we wspomnianej pracy Skrabalaka widzimy podobny wykres i podobne wnioski. Drążenia wykonane były na urządzeniu Sarix 100 HPM. Jako dielektryk użyty był płyn na bazie kerozyny- Hedma Oil. Elektroda wykonana była z węgla wolframu i miała średnicę zewnętrzną 0.1mm. Co jednak bardziej istotne- była elektrodą prętową bez płukania wewnętrznego. Czy zatem wnioski Gao są właściwe? Czy sama zmiana długości elektrody, a co za tym idzie jej oporności nie powoduje zmiany procesu? Wpływ przepływu dielektryka przez elektrodę analizował także Kliuev (33) (34) wraz z zespołem. W badaniu wykonano zarówno analizy numeryczne jak i pomiary. Autorzy zweryfikowali wartość kryterialnej liczby Reynoldsa aby odpowiednio dobrać równania oraz założenia co do typu przepływu (turbulentny vs. Laminarny). Dodatkowo za pomocą szybkiej kamery starano się zmierzyć prędkość przepływu cieczy wokół



Rysunek 3-35 Zmiana czasu drążenia otworów rurkową. (31)

elektrody. Badania wydają się ciekawe- jednak brakuje szczegółów wykorzystanych urządzeń pomiarowych. Nie ustalono także wartości prędkości przepływu analizowanego za pomocą szybkiej kamery. Model numeryczny opisany jest w sposób uproszczony. Nie omówiono wpływu siatki, jej jakości oraz przyjętych warunków brzegowych. Autorzy nie uwzględniają w analizie wpływu drobin czy bąbli gazowych powstałych w wyniku elektroerozji na tłumienie przepływu. Główne wnioski dotyczyły wpływu zmiany przepływu dla elektrody długiej (400 mm) i krótkiej (200 mm) na MRR, który uznano za niewielki. Zauważony był wpływ zmiany przepływu na grubość warstwy przetopionej.

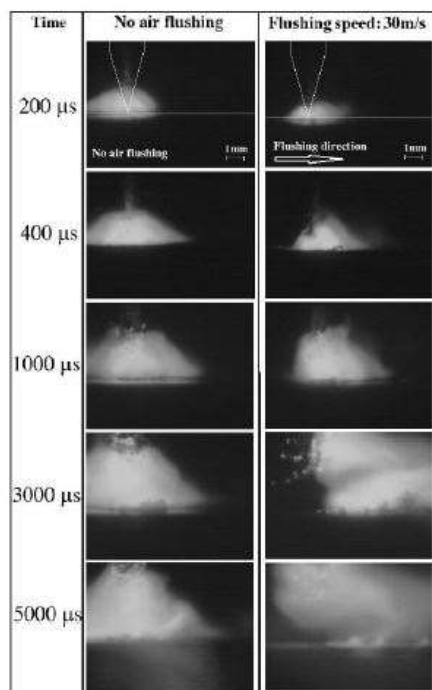
Do podobnych, chociaż nieidentycznych wniosków doszedł Wang (35). W swojej pracy uwagę zwrócił na zmienność warstwy przetopionej oraz ilość mikropęknięć.



Rysunek 3-36 Wykresy grubości warstwy zmienionej oraz zależności gęstości pęknięć od grubości warstwy przetopionej. (35)

Dwoma głównymi wnioskami z tej pracy jest istnienie optimum wartości przepływu- obniżenie lub jego podniesienie skutkuje pogorszeniem parametrów powierzchni. Wong zauważa także, iż dla warstwy przetopionej istnieje grubość, poniżej której nie występują mikropęknięcia. Jest to wniosek zbliżony ze wspomnianą wcześniej pracą Lee (26).

Badacze zajmujący się zjawiskiem elektroerozji dosyć jednomyślnie podzielają pogląd, iż płukanie obszaru roboczego jest kluczowe- niewiele jest badań pokazujących potencjalnie jego możliwy negatywny wpływ. Zhua (36) wskazuje w swojej pracy na degradujący kanał plazmowy wpływ przepływu dielektryka. Efekt taki może zmniejszyć wydajności procesu.



Rysunek 3-37 Porównanie iskry przy braku płukania szczeliny oraz z płukaniem. Widoczne zniekształcenie kanału plazmowego. (36)

Przepływ dielektryka powodował jednocześnie deformację krateru powstałego w wyniku przepływu prądu oraz nierównomierne zużycie elektrody.

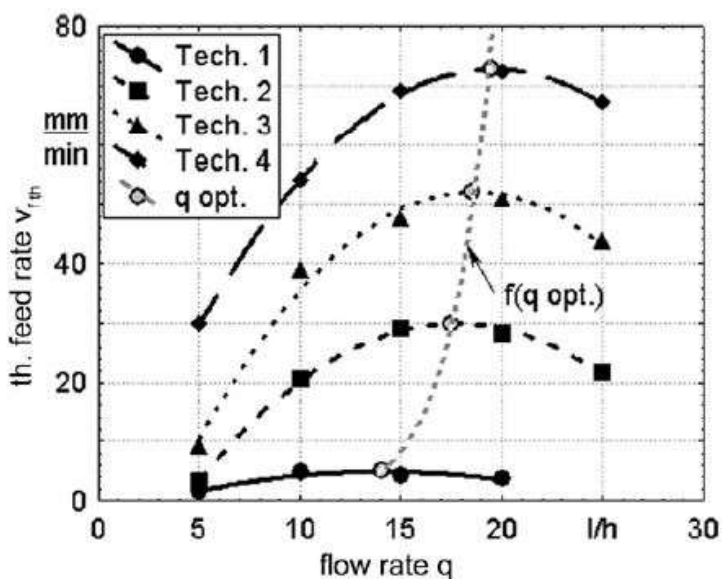


Rysunek 3-38 Deformacja krateru oraz elektrody w wyniku oczyszczania obszaru roboczego sprężonym powietrzem. (36)

Wnioski z pracy Zhua nie wskazują jednoznacznie na negatywny wpływ płukania obszaru roboczego- może to wynikać ze specyfiki badań. Autor skupił się na obserwacji pojedynczej iskry oraz wpływu przepływu powietrza na iskrę, przetopiony materiał oraz elektrodę. Testy nie odnosiły się do takich miar procesu jak MRR czy RLT. Ten wniosek pojawia się w publikacji Wonga.

Zhua pokazuje natomiast fizyczny wpływ płukania na iskrę bez przeniesienia tego wpływu na proces.

Kluczowe znaczenie płukania potwierdza w swojej pracy Munz (29). Na podstawie analiz przepływu dla różnych elektrod i parametrów wykazał, iż istnieje optymalna wartość przepływu, powyżej której następuje spadek wydajności procesu. Dzieje się tak prawdopodobnie w wyniku zakłócenia kanału plazmowego. Potwierdzałoby to wcześniej omówione wnioski Zhua (36). Na Rysunku 3-39 przedstawiono wpływ średnic wewnętrznych elektrod na przepływ oraz prędkość drążenia. W tym przypadku wyrażona jako prędkość posuwu elektrody.



Rysunek 3-39 Wpływ wydatku dielektryka płynącego wewnątrz elektrody na efektywność drążenia. (29)

Munz zweryfikował także, iż wraz ze wzrostem wydatku zwiększa się niestabilność przebiegu napięcia. Stanowi to mocny argument przemawiający za hipotezą, iż silny strumień medium płuczącego obszar roboczy zaburza kanał plazmowy.

Tematem płukania zajmował się także Tanjilul (37) który zaproponował podciśnieniowy system poprawiający ewaluację urobku z obszaru roboczego. Poprawiło to w mierzalny sposób czas drążenia i chropowatość powierzchni. Poprawa była widoczna tylko przy dużych głębokościach otworów, powyżej 100mm przy średnicy elektrody 3mm.

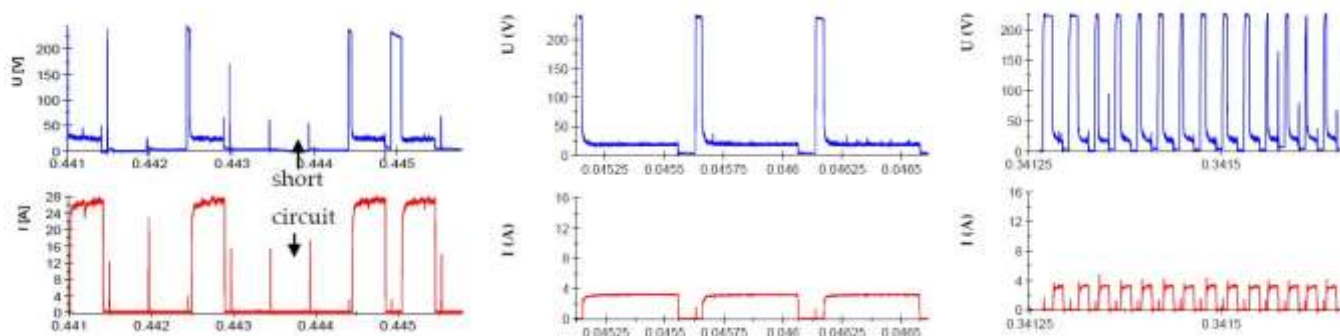
Od początku rozwoju procesy obróbki elektroerozyjnej kluczowymi miarami procesu do których odnoszą się badacze są wspomniane MRR, RLT, TWR oraz SR. Analizowana jest także geometria wykonanych otworów. Liczne publikacje prezentują metody użyte do optymalizacji procesu dla różnych par materiałowych elektroda materiał obrabiany. Większość komercyjnie dostępnych urządzeń EDM pozwala na wybór programu obróbkowego spełniającego jedno z kryteriów: chropowatość powierzchni, szybkość usuwania materiału lub minimalnego zużycie elektrody.

Świercz wraz z zespołem (24) skoncentrowali się na optymalizacji procesu EDM pod kątem jak najwyższej prędkości obróbki przy zachowaniu minimalnej grubości warstwy przetopionej. W procesie użyto elektrodę grafitową - materiał ten uznano za optymalny do obróbki próbek wykonanych ze stopu Inconel 718. Użyto podejścia statystycznego opartego na analizie wariancji ANOVA. Optymalizacja wykonana była za pomocą RSM oraz funkcji celu. Test bazował na planowanym eksperymencie pełno czynnikowym.

Tabela 3-2 Parametry i ich wartości w pracy (27).

EDM Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
discharge current I (A)	3	8.5	14
pulse time t_{on} (μs)	13	206	400
time interval t_{off} (μs)	9	80	150

Świercz zamieścił w swojej pracy wykresy napięcia i natężenia. Wykresy pokazano na Rysunku 3-41. Wykresy te bardzo dobrze pokazują możliwe przebiegi napięcia i natężenia.

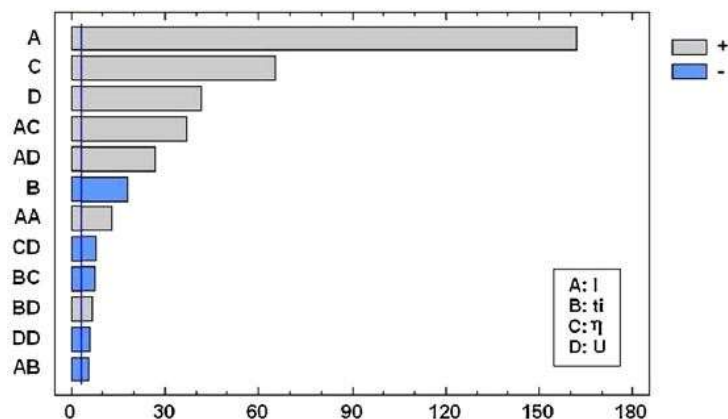


Rysunek 3-41 Przebiegi napięcia i natężenia dla parametrów wykorzystanych pacy (24).

Na Rysunku 3-41 pokazano także moment zwarcia (short circuit). Sytuacja taka ma miejsce, gdy elektroda dotknie element obrabiany bądź w szczelinę roboczą dostanie się wtrącenie metaliczne co spowoduje fizyczne zamknięcie obwodu.

Na podstawie wyników zbudowano równania regresji dla chropowatości powierzchni, grubości warstwy przetopionej oraz prędkości obróbki. Równania użyto do optymalizacji procesu przy użyciu metody RSM. Jest to sposób optymalizacji trzech zmiennych przy wykorzystaniu dwuwymiarowego wykresu konturowego. Metoda ta zaproponowana została przez George'a E. P. Box'a który dzięki tej prostej metodzie mógł przedstawić graficzną dwuwymiarową interpretację dla trzech zmiennych. Metoda RSM pozwala także odczytać zależności trzech zmiennych oraz określić punkty optymalne. Testy weryfikacyjne były zgodne w założonym 6% marginesie. Parametrami o największym wpływie na MRR są wg Świercza: natężenie (I), czas wyładowania (T_{on}) oraz czas płukania (T_{off}). Torres (38) przeprowadził optymalizację dla pary

Inconel 718- miedź. Zmiennymi wiodącymi były: natężenie (I) obciążenie cyklu (η), czas wyładowania (T_{on}) oraz napięcie przebicia (U).



Rysunek 3-42 Wykres Pareto będący podsumowaniem (38).

Wnioski są zbieżne z tymi zawartymi w pracy Świercza. Im wyższe natężenie prądu i im dłuższy czas oddziaływania wyładowań T_{on} tym szybszy proces usuwania materiału przy jednoczesnym pogorszeniu jakości powierzchni.

Opisane powyżej próby optymalizacji wykonane zostały dla procesu obróbki elektroerozyjnej wgłębną. Podobne opracowania zrealizowano dla procesu EDD.

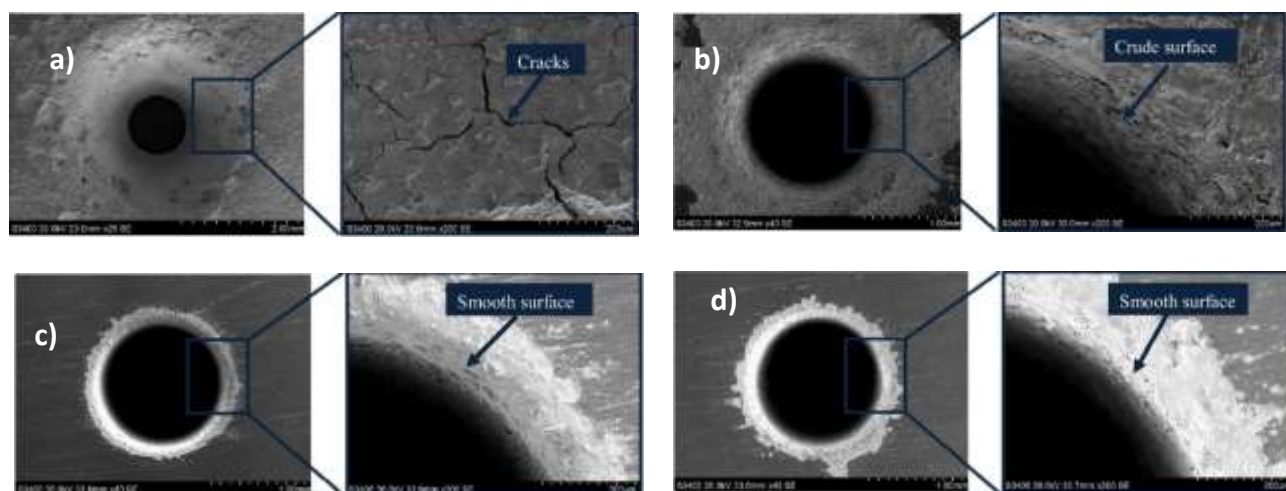
Kuppan (39) weryfikował wpływ natężenia impulsu, długość trwania oraz obciążenia cyklu i prędkości obrotowej na MRR oraz SR. W pracy wykorzystano eksperyment planowany bazujący na pełno czynnikowym centralnym planie kompozycyjnym (*ang. Central Composite Design*). Do optymalizacji wykorzystał równania regresji. Badania realizowane były z wykorzystaniem oleju. Główne wnioski to a) zdecydowanie największy wpływ na MRR ma natężenie prądu. Kolejną zmienną jest czas pracy T_{on} powiązany bezpośrednio z obciążeniem cyklu (czas płukania był stały). Prędkość obrotowa zwiększa swoje znaczenie wraz ze wzrostem natężenia impulsu. W doświadczeniu stwierdzono wpływu czasu wyładowania na chropowatość powierzchni. Ay (40) analizował wpływ natężenia impulsu oraz czasu pracy. Niestety w artykule nie podano informacji o przyjętym czasie płukania T_{off} co pozwoliłoby na lepszą interpretację wyników. Niemniej oba te czynniki w widoczny sposób wpływają na jakość otworu. Jak podkreśla autor, proces elektroerozji jest procesem termicznym. Oznacza to, że głównym czynnikiem decydującym o wydajności procesu jest ilość energii dostarczonej do obszaru. Biorąc pod uwagę, iż strumień energii zależy od czasu trwania iskry, czasu płukania, natężenia prądu oraz napięcia cytowany artykuł potwierdza tę zależność. Analizę trójparametrową dla pary materiałowej miedź- Inconel 718 przeprowadziła Machno (11). Zmiennymi były czas pracy T_{on} , natężenie wyładowania oraz napięcie. Parametrami wyjściowymi: zużycie narzędzia, pochylenie ścian otworu, prędkość drążenia oraz chropowatość powierzchni. Główne wnioski to wskazanie zależności natężenia prądu i pochylenia ścianki- im wartość natężenia jest wyższa, tym pochylenie jest mniejsze. Wykazano także, że podobny wpływ na zwiększenie czasu pracy T_{on} .

Interesującym artykułem jest analiza przeprowadzona przez Risto (41). W swojej pracy jako cele optymalizacji przyjmuje nie tylko zużycie elektrody (TW) czy wydajność procesu (MRR) ale także koncentruje się na optymalizacji procesu pod konkretne zastosowanie przemysłowe. Głównymi celami optymalizacji były geometria wykonanych otworów oraz koszt ich wykonania. O ile pierwszy jest dość powszechnie przyjmowanym kryterium, o tyle drugi jest rzadko spotykany w opracowaniach naukowych. Ciekawe są wnioski którymi dzielą się autorzy: dobór parametrów powinien uwzględniać także konstrukcję elektrody (jedna/ wielokanałowa) i średnicę elektrody.

Wpływem konstrukcji elektrody zajmował się tw swojej pracy Yilmaz (42). Analizie poddano drążenia wykonane równymi elektrodami- jedno i wielokanałowymi wykonanymi. Różny był także ich materiał: miedź oraz mosiądz. Drążenia wykonywane były w stopie Inconel 718 oraz w tytanie TiAl4V. Autor nie podaje średnicy zewnętrznej ani wewnętrznej elektrod. Do wszystkich

rażień testowych użyto jednakowych parametrów. Dla obu materiałów reprezentujących detale (Inconel oraz tytan) najbardziej efektywne wyniki otrzymano dla mosiężnej elektrody

jednokanałowej. Wpływem geometrii wewnętrznej elektrod rurkowych zajmował się także wspomniany wcześniej Zhang (30). Również te badania pokazały, iż najwydajniejszy proces uzyskano dla elektrody jednokanałowej. Eksperymenty opisane przez Zhanga są o tyle ciekawe, iż pozwalają na bezpośrednie porównanie efektów drążenia elektrodą prętową (bez płukania wewnętrznego) z elektrodami rurkowymi.



Rysunek 3-43 Otwory uzyskane przy drążeniu elektrodami mosiężnymi o różnych geometriach:
a) pręta b) jednokanałowa c) dwukanałowa d) wielokanałowa (30)

Doskonale widać jakościową zmianę w obróbce z wykorzystaniem elektrody z płukaniem wewnętrznym. Zarówno wydajność procesu jak i jego geometryczny efekt ulegają zasadniczej zmianie dla elektrody wykorzystującej wewnętrzny kanał do płukania obszaru roboczego.

Dodatkową zmienną poddaną analizom jest materiał elektrody. Kuppan (43) oraz Ahmed (44) do wykonywania otworów użyli odpowiednio miedź, miedzionikiel, grafit oraz mosiądz, miedź i miedziowolfram. Z analiz wyciągnięto podobne wnioski- najlepiej dopasowanym materiałem elektrody do obróbki stopu Inconel 718 jest miedź.

Różne wartości metryk elektrodrążenia MRR, LTW czy SR dla tego samego materiału detalu obrabianego elektrodami wykonanymi z różnych stopów wynikać mogą z wielu czynników. Jednym z nich jest indeks odporności erozyjnej E_R (*ang. erosion resistance index*). Przytacza go w swojej pracy Reynaerts (45). Współczynnik wyznacza się dla danego materiału ze wzoru:

$$C_m = \lambda * c * T_m$$

gdzie

λ - przewodność cieplna [$\text{WK}^{-1}\text{m}^{-1}$]

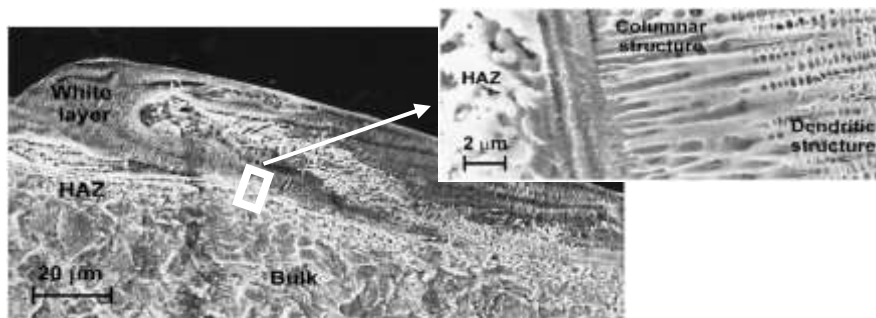
c - ciepło właściwe materiału [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]

T_m - temperatura topnienia [K]

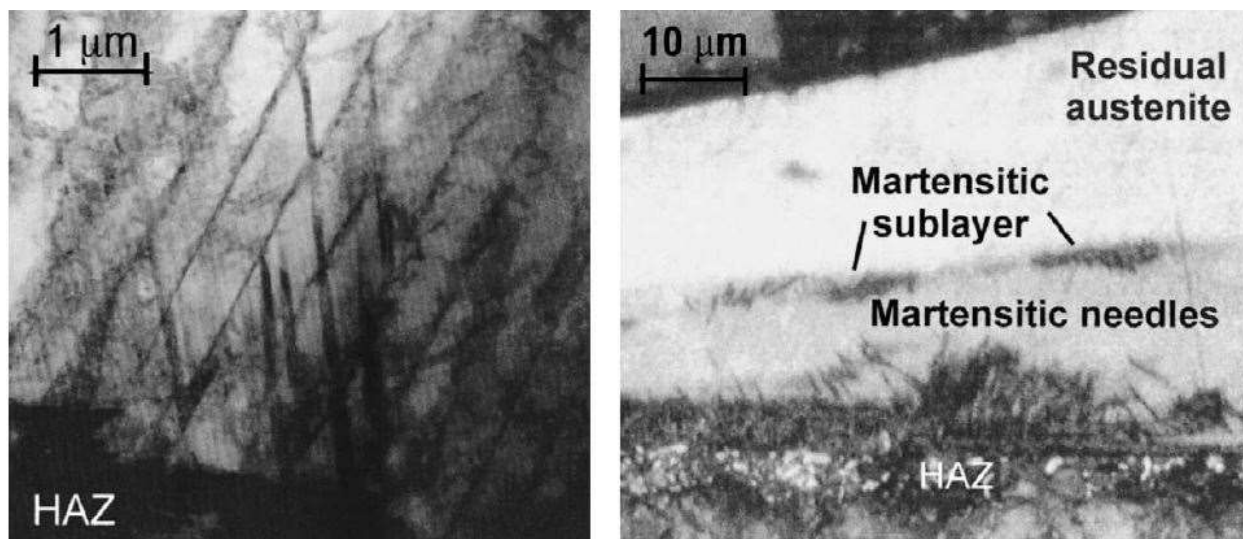
Dla prawidłowej pracy pary elektroda- materiał obrabiany elektroda powinna mieć wyższą wartość indeksu. Zależność ta została potwierdzona w publikacji (46).

Stan powierzchni, ze względu na negatywny wpływ na trwałość elementów jest jednym z najszerzej badanych obszarów obróbki EDM. Analizie poddawana jest chropowatość, grubość warstwy przetopionej oraz mikropęknięcia. Obok wydajności obróbki to właśnie temu zagadnieniu poświęcono najwięcej uwagi: (12), (22), (23), (24), (25), (27), (47), (48), (49).

Praca Cusanelliego (49) pozwala lepiej zrozumieć zmiany zachodzące w materiale z punktu widzenia metalurgii stopów. Przenalizował on zmiany jakie pojawiły się w strukturze stali X37CrMoV5-1 w obszarze obróbki elektroerozyjnej. Wykorzystany materiał jest stalą ferrytyczną używaną na formy wtryskowe, matryce do prasowania, a więc materiał jest często poddawany obróbce elektroerozyjnej. Strukturę warstwy zmienionej przedstawiono na poniższych rysunkach.

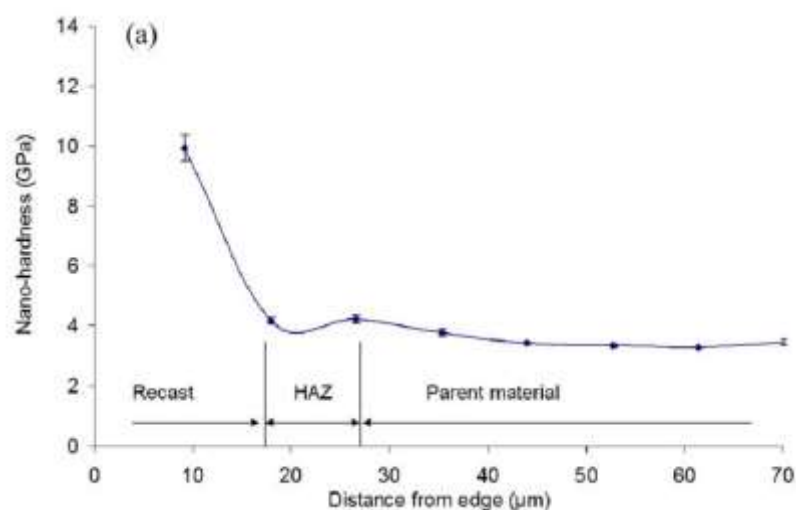


Rysunek 3-44 Widok typowy dla materiały po obróbce EDM. Widoczny materiał rodzimy, strefa przegrzana (HAZ), oraz strefa przetopiona (white layer) (49).



Rysunek 3-45 Widok struktury metalu a) analiza TEM- widoczne igły martenzytyczne przecinające kolumnową strukturę austenityczną, b) analiza optyczna powierzchni próbki (49)

Autorzy przeanalizowali mikrostrukturę w obszarze wpływu ciepła. Obszar ten składa się z wielu warstw o różnych elementach mikrostrukturalnych. Materiał przetopiony oraz strefa przegrzana zawierają igły martenzytyczne, które mogą być inicjatorami pęknięć. Obszar ten odznacza się wysoką twardością, która jest dwa razy wyższa od twardości materiału bazowego. Do takiego samego wyniku doszedł Irmann (27)

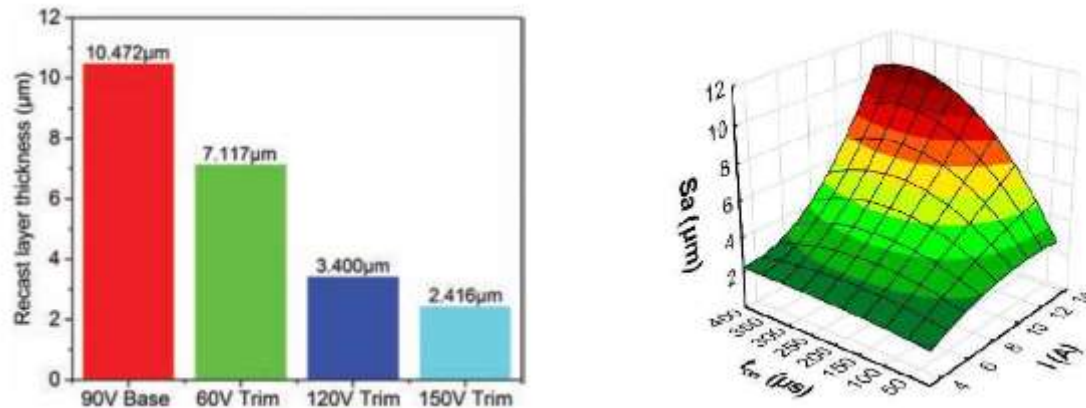


Rysunek 3-46 Wykres zmiany twardości materiału w funkcji odległości od obrabianej powierzchni. (27)

Zagadnienia stanu powierzchni można w dalszej kolejności podzielić na tematy nakierowane na następujące obszary:

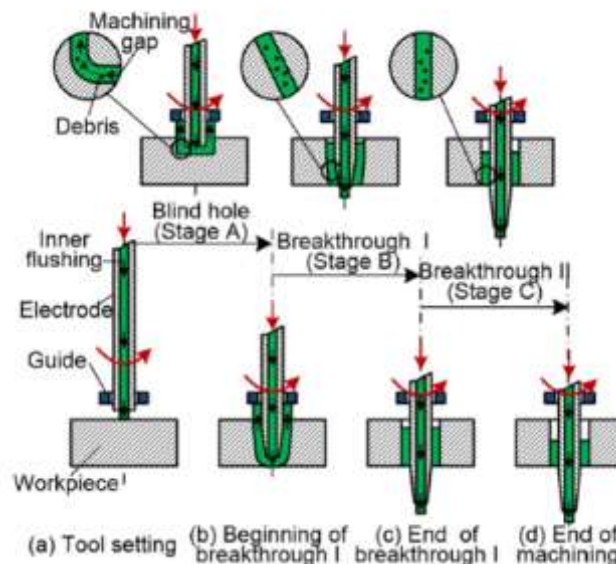
- chropowatość
- grubość warstwy zmienionej
- zmiany materiałowe w okolicy obróbki
- wpływ obróbki na własności zmęczeniowe materiały

Każdy z wymienionych czynników, jak pokazują wymienione prace, może być poddany optymalizacji w zależności od potrzeb i oczekiwań stawianych wobec procesu. Dobór parametrów umożliwia ograniczenie czy wręcz eliminację warstwy zmienionej.



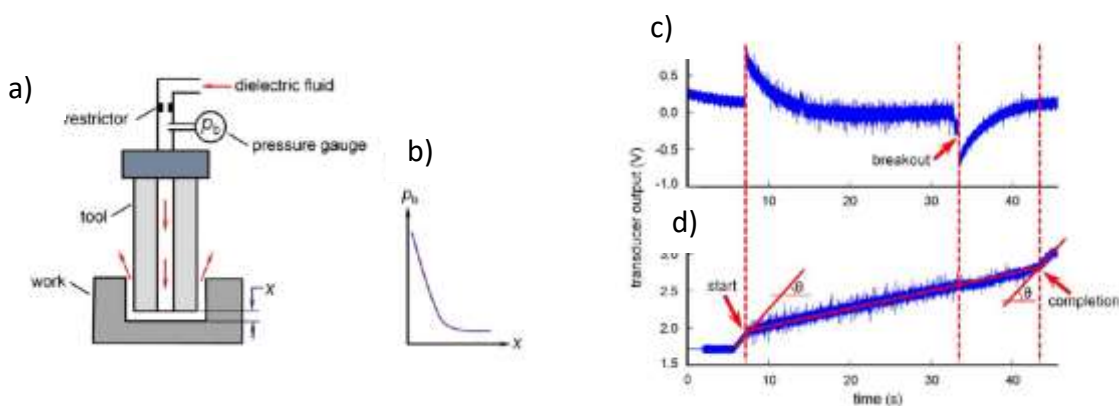
Rysunek 3-47 Wyniki optymalizacji dla a) grubości warstwy zmienionej (23) b) chropowatości powierzchni (24)

Niemniej poprawa wyników w jednym obszarze oznacza pogorszenie w innym. Wynika to z fizyki procesu oraz zależności między ilością energii użytej w procesie, prędkością usuwania materiału a stanem powierzchni- co przedstawiono na Rysunku 3-14.



Rysunek 3-48 Kolejne fazy wykonania otworu chłodzącego z zatrzymaniem elektrody po przebiciu ścianki. (40)

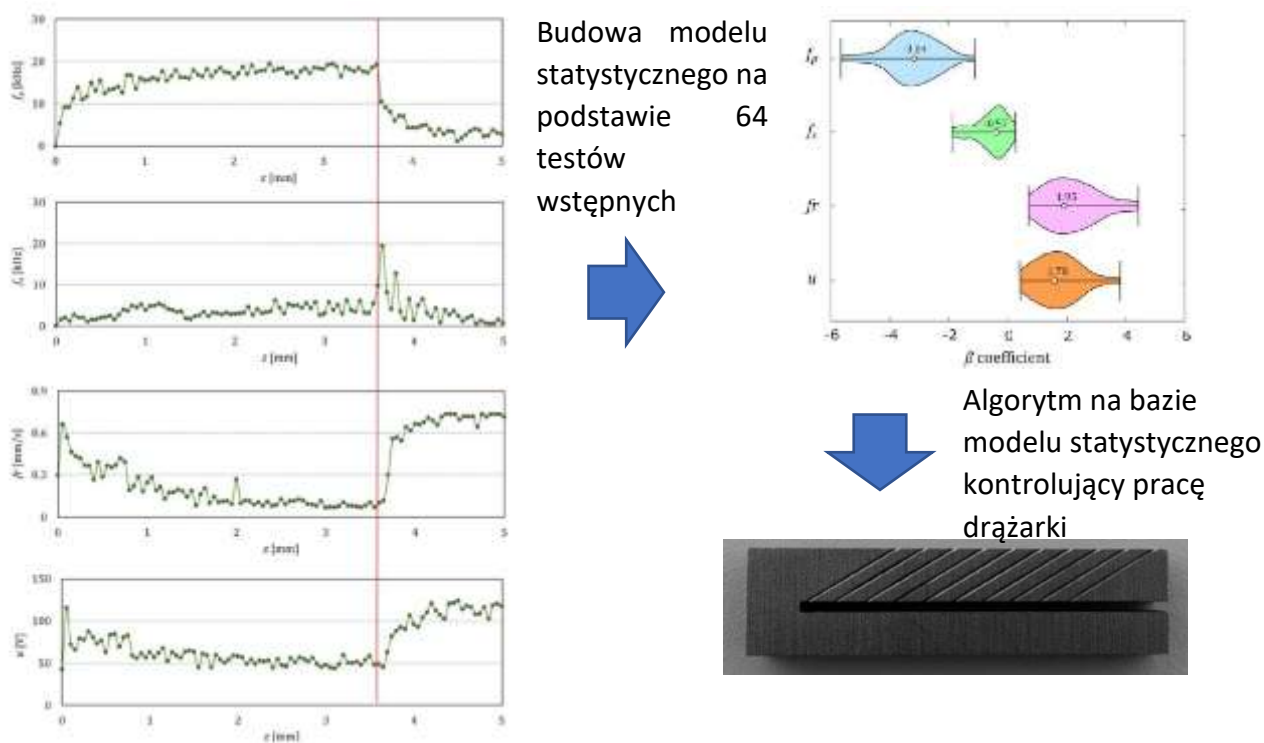
Oprócz akceptowanej struktury powierzchni czy czasu obróbki kluczowym elementem podczas wykonywania otworów chłodzących jest prawidłowe wykrycie przebicia. Wynika to co najmniej z dwóch powodów: po pierwsze zbyt głębokie wysunięcie elektrody może spowodować uszkodzenie przeciwległej ścianki, schemat tej sytuacji pokazany jest na Rysunku 3-27, po drugie zbyt długa praca elektrody spowoduje rozbięcie otworu a w efekcie nadmierny przepływ powietrza. Oba te defekty dyskwalifikują część czy to z powodu osłabienia struktury czy to poprzez niespełnienia wymagania przepływowego. Poszczególne etapy przebijania się elektrody pokazano na Rysunku 3-48. Nie dziwi więc duża ilość artykułów poświęconych rozwojowi tego obszaru: (50), (51), (52), (53), (54), (55), (56). Wymienione publikacje analizują dwa mechanizmy wykrycia przebicia. Koshy (52) prezentuje ciekawą koncepcję detekcji przebicia poprzez zmianę ciśnienia wewnątrz elektrody.



Rysunek 3-49 a) schemat ideowy stanowiska i sposobu pomiaru b) wykres obrazujący ciśnienie w elektrodzie jako funkcję wysokości szczeliny międzyelektrodowej c) sygnał z elektronicznego czujnika ciśnienia d) przemieszczenie elektrody (52)

Przebiegi ciśnienia oraz położenia elektrody pokazane na Rysunku 3-49-c i -d wskazują jednoznacznie, iż zmiana ciśnienia zachodzi wcześniej i ma bardziej jednoznaczny charakter porównując do zmiany położenia elektrody. Niestety autor nie podaje bardziej szczegółowych informacji na temat stanowiska. W artykule podano jedynie ciśnienie zasilania 1.7MPa oraz średnicę elektrody 0.3 mm. Nie jest znana długość elektrody, wpływ jej długości czy wpływ pulsacji ciśnienia wynikający z pracy pompy na dokładność pomiaru.

Bellotti (51) przeanalizował częstotliwość występowania impulsów normalnych, oraz wartości średnie ilości zwarć, napięcia szczelinowego oraz posuwu elektrody. Pomiary wykonano przed i po przebiciu. Wykorzystanie standaryzowanej różnicy średnich SSMD pozwoliło na zbudowanie modelu zmian impulsów elektrycznych, który pozwalał na zweryfikowanie zmienności dwóch populacji. Model został wykorzystany do zaprogramowania sterowania drążarki co pozwoliło na walidację metody.



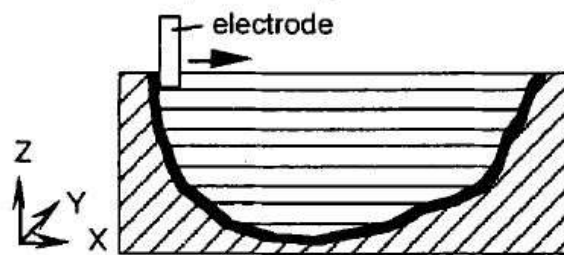
Rysunek 3-50 Schemat koncepcji detekcji przebicia w oparciu o SSMD a) przebiegi zmiennych podczas drążeń- pionowa linia oznacza moment przebicia b) model statystyczny c) testy weryfikacyjne (51)

W obszarze detekcji przebicia widać silny trend użycia narzędzi nauczania maszynowego. Opierają się one na tych samych danych, których użył Bellotti, jednak wykorzystują znacznie bardziej zaawansowany aparat matematyczny. Z jednej strony wydaje się to niepotrzebną komplikacją, gdyż model Bellottiego zadziałał poprawnie, z drugiej zadziałał on na wyidealizowanej próbce. W rzeczywistej konstrukcji ścianki nie są płaskie, grubość materiału ulega zmianie a po przebicciu elektroda może napotykać elementy struktury wewnętrznej części. W takich przypadkach modele bazujące na klasyfikatorach nadzorowanych takich jak Drzewo Decyzyjne (ang. Decision Tree) czy Maszyna Wektorów Nośnych (ang. Support Vector Machine) mają większe szanse zadziałać prawidłowo.

3.2.2. Frezowanie elektro erozyjne

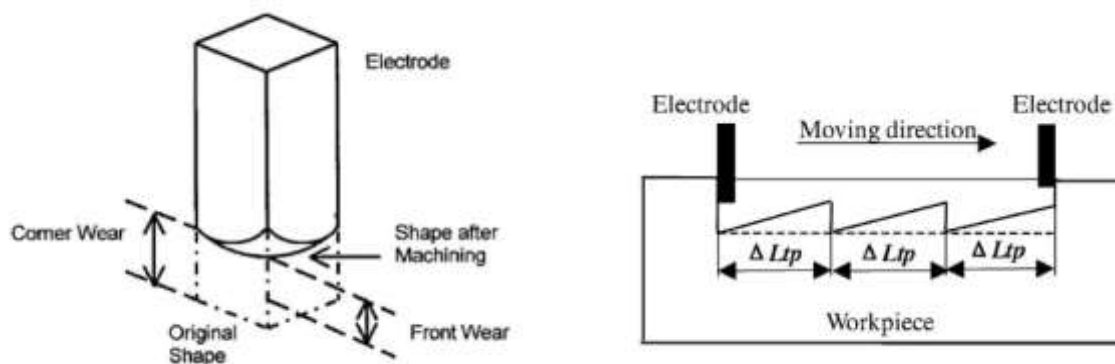
Otwory kształtowe pojawiły się w konstrukcjach elementów turbin w latach 80tych XX w. Do połowy lat 90 ubiegłego wieku do ich wykonania wykorzystywano pojedyncze elektrody kształtowe. Było mało efektywne głównie z powodu, iż kształt otworu odzwierciedlał elektrodę, która podczas obróbki traciła kształt. Jak pokazano na Rysunku3-26 wykonanie otworów kształtowych możliwe jest także poprzez obróbkę elektrodą rurkową. Początki tej technologii opisuje Masuzawa (57). W swojej pracy porusza tematykę usuwania materiały poprzez poziomy ruch elektrody. Omawia także nowe wyzwania jakie pojawiły się dla tej nowej technologii: dobór

ścieżki narzędzia, kontrola posuwu (w 3 osiach), modelowanie zużycia elektrody oraz uwzględnianie niezbędnej kompensacji wynikającej ze zużywania elektrody nie tylko na długości, ale także na średnicy



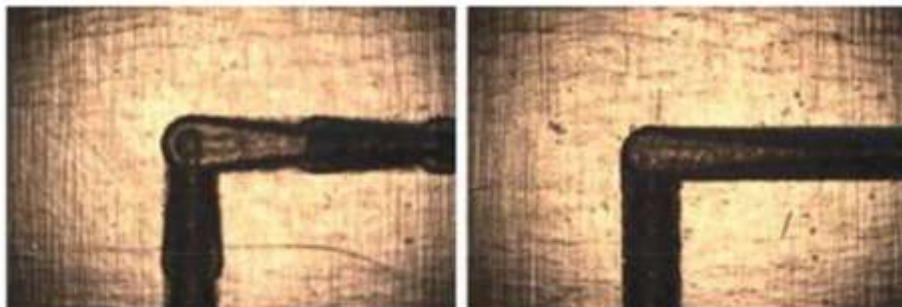
Rysunek 3-51 Schemat usuwania materiały poprzez wierszowanie (57).

Zagadnieniem kompensacji kształtu elektrody zajmowali się między innymi: Bleys (58), Kar (59), Narasimhan (60), Richard (61). Problem kompensacji dobrze wyjaśniają grafiki zaczerpnięte z pracy Kara a pokazane na Rysunku 3-52.



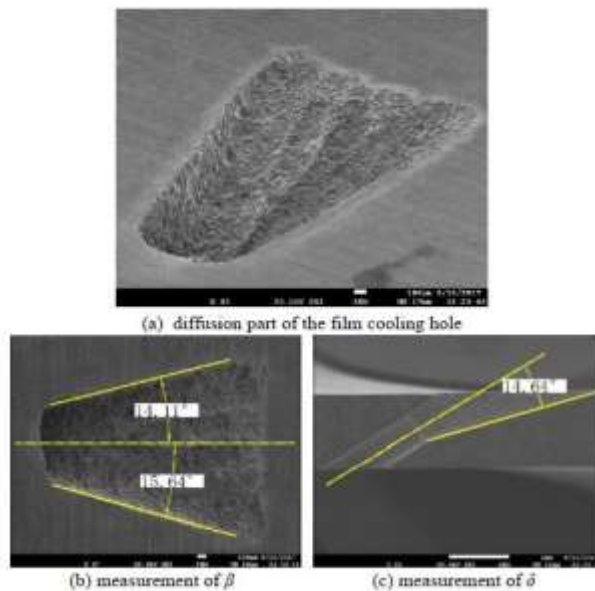
Rysunek 3-52 a) degradacja końcówki elektrody- kształt zmienia się wraz z czasem obróbki b) przy braku kompensacji zmienia się długość elektrody- bez kompensacji pojawiają się charakterystyczna „piła”. (59)

Kompensacja zużycia elektrody w obróbce jednokierunkowej następuje automatycznie o tyle brak kompensacji w wierszowaniu elektroerozyjnym które jest obróbką trzy osiową skutkuje brakiem ciągłości kształtu co widać na Rysunku 3-53.



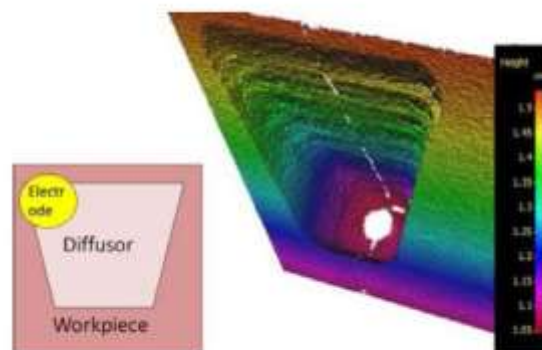
Rysunek 3-53 Przykład wierszowania elektro erozyjnego: a) bez kompensacji zużycia elektrody b) z kompensacją (59)

Kolejnym elementem jest zaplanowanie ścieżki elektrody tak, aby wykonany kształt spełniał wymagania. Zagadnieniem planowania ścieżki zajmowali się między innymi Narasimhan (60), W. Liang (62) oraz Kliuev (63). Sama ścieżka narzędzia jest o tyle istotna, iż wpływa na zużycie elektrody oraz dokładność wykonania powierzchni. W przypadku elementów zdefiniowanych przez model bądź rysunek ma kluczowe znaczenie. Przykłady wykonania otworów kształtowych pokazane są na Rysunku 3-54 oraz 3-55.



Rysunek 3-54 Widok otworu kształtowego z częścią dufuzora wykonaną techniką wierszowania (62).

Inny przykład pochodzi z pracy Kliueva- otwór kształtowy jest znacząco większy, ale także wykonany, jak w przypadku Lianga w Inconelu 718.

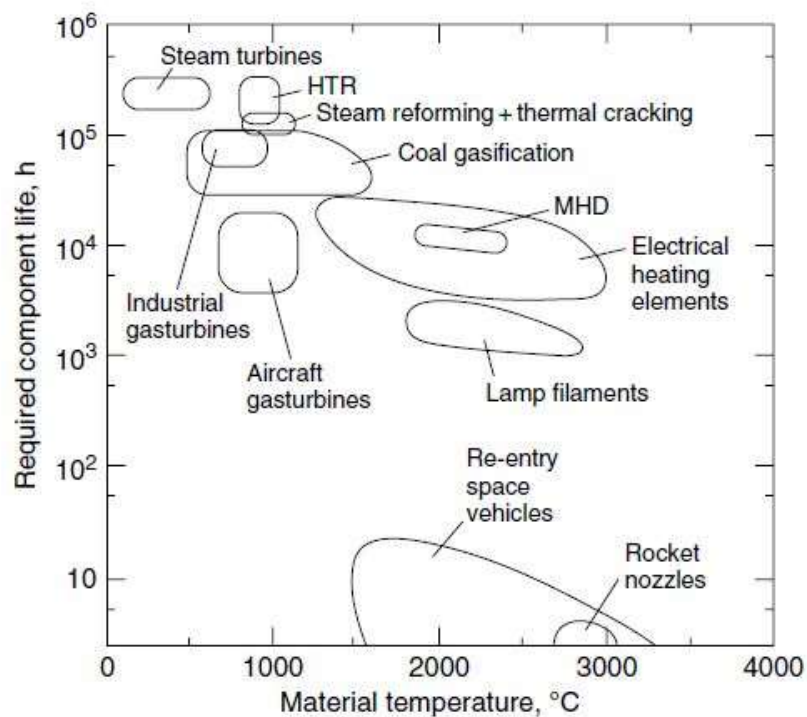


Rysunek 3-55 Otwór kształtowy wykonany w stopie Inconel 718 (63).

W obu przykładach widoczne są ślady narzędzia. Jaka strategia jest bardziej właściwa? Zależy to od przyjętych wymagań. Kliuev zoptymalizował proces pod kątem wydajności, nie ma jednak informacji o powtarzalności otrzymywanych geometrii oraz o czasie ich wykonywania.

3.3. Degradacja materiału i powłoki aluminidkowe.

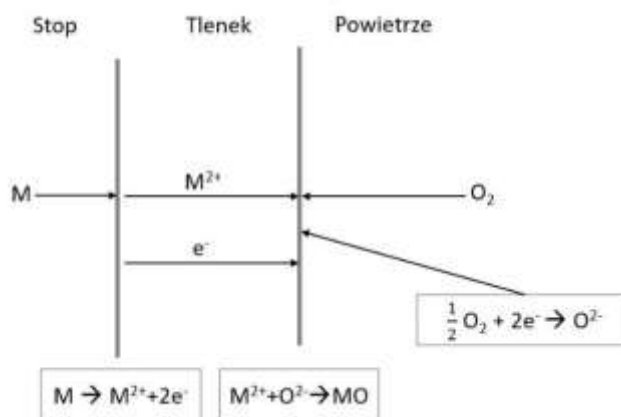
Jednym z głównych źródeł uszkodzeń silników turbinowych konstruowanych we wczesnych latach 50 ubiegłego wieku był wpływ agresywnego środowiska pracy na materiał elementów. Utlenianie oraz korozja wysokotemperaturowa (ang. *hot corrosion*) znacząco obniżają wytrzymałość części turbin. Niska żywotność pierwszych konstrukcji silników turboodrzutowych nie stanowiła dużego problemu dla użytkownika. Żywotność samolotów wyposażonych w te silniki była jeszcze mniejsza. Jednak zastosowania cywilne, które pojawiły się kilka lat później wymusiły postęp technologiczny pozwalający na wydłużenie życia konstrukcji. Niska trwałość przekłada się na wysokie koszt eksploatacji oraz niską gotowość silników. Dodatkowo niekontrolowane zjawisko degradacji mogło doprowadzić do katastroficznego zniszczenia konstrukcji. Problem był tym bardziej istotny, ponieważ dotyczył części najbardziej wytężonych zarówno pod względem termicznych jak i mechanicznych. Rozwiązaniem okazały się powłoki dyfuzyjne (3) (64). W latach 60 XX wieku zespoły eksperckie poddawały badaniom różne typy powłok. Dla stopów niklu najodpowiedniejszym okazało się powłoka aluminidkowa.



Rysunek 3-56 Porównanie wymaganej trwałości komponentów oraz temperatur w jakich pracują. Źródło: (64)

Na Rysunku 3-56 dla wybranych obszarów przemysłu zestawiono zakres temperatury pracy z wymaganiem trwałości. Turbiny gazowe pracują w temperaturach dochodzących do 1500 °C przy jednoczesnym wymaganiu żywotności części dochodzących do kilkudziesięciu tysięcy godzin. Zatem jakie materiały należy wykorzystywać w tak ekstremalnie obciążonych elementach maszyn? Z jednej strony podwyższona zawartość aluminium zwiększa odporność korozyjną stopów. Z drugiej elementy turbin, a zwłaszcza łopatki, poddane są bardzo wysokim obciążeniom mechanicznym. W tym również kontaktowym. Zamki łopatek obciążone są w sposób podobny do łożysk rolkowych a naprężenia przyjmują rozkład naprężeń Herza. Wymusza to możliwie najwyższą granicę plastyczności. To z kolei ogranicza zawartość glinu w jako składnika stopowego. Z pomocą przychodzą tu wspomniane powłoki aluminidkowe. Umożliwiają one odpowiednią modyfikację warstwy wierzchniej, przy ograniczonym wpływie na główną strukturę części. Degradacja materiałów w największym stopniu napędzana jest przez temperaturę w jakiej pracują elementy. Analiza termodynamiki procesów umożliwia określenie kierunku zmian oraz energii wymaganej do inicjacji i podtrzymania procesu. Rozważa się dwa główne mechanizmy degradacji elementów silnikowych: korozyjny oraz oksydacyjny.

Utlenianie nazywane także potocznie oksydacją jest jednym z głównych źródeł degradacji metali. Proces ten rozpoczyna się już podczas pierwszych etapów obróbki po odlewaniu półproduktów (65). Obróbka cieplna odlewów przeprowadzana jest przeważnie w piecach atmosferycznych co prowadzi do silnego utleniania i powstawania tzw. zendry, czyli grubej warstwy tlenów. W wyniku tego zjawiska w procesie obróbki stal utracie ulega 1-2% produkcji. W przypadku stopów niklowych zjawisko ma to mniej intensywny charakter ponadto dla zapewnienia jakości do obróbki cieplnej wykorzystywane są piece indukcyjne i atmosfery ochronne. Schemat procesu utleniania pokazany jest na Rysunku 3-57.



Rysunek 3-57 Reakcje i schemat dyfuzji prowadzące do powstania zgorzeliny tlenkowej na powierzchni metalicznej. (65)

W samym procesie wydzielić można kilka etapów:

- Transport utleniacza do powierzchni tlenku
- Wchłonięcie atomowego tlenu przez tlenek

- Transport reaktywnego metalu na powierzchnię tlenku
- Wchłonięcie metalu przez tlenek
- Przemieszczanie się tlenu/ metalu poprzez tlenek czego efektem jest nabudowywanie się tlenku

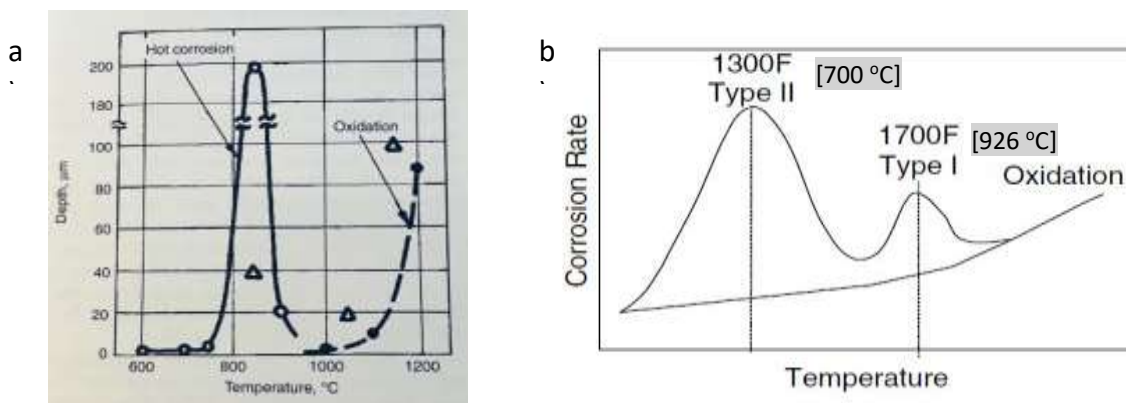
Podatność metali na utlenianie może różnić się znacząco co pokazują wyniki testu przedstawione w Tabeli 3-3. Tak duża różnica wynika z wielu czynników. Jednym z nich jest przepuszczalność tlenu przez tlenek, który pokrywa powierzchnię metalu. Struktura tlenku może być jednolita i zwarta jak ma to miejsce w przypadku glinu, lub może być luźna i porowata jak w przypadku żelaza.

Tabela 3-3 Grubość warstwy tlenku metalu (czas wygrzewania w powietrzu= 100h, ciśnienie 1atm, temperatura 800 °C) (65)

Metal	Grubość Tlenku [mm]
Fe	1,1
Ni	0,01
Cr	0,003
Al (Ni-50Al)	0,001

Różne są także metody poprawy i wydłużenia żywotności konstrukcji metalowych. Dodatkową zmienną wpływającą na trwałość detali jest cykliczność obciążeń termicznym. Są one, zwłaszcza w przypadku silników lotniczych, bardzo istotnym elementem degradującym powłoki.

Drugim wspomnianym wcześniej typem degradacji części silników lotniczych jest korozja siarkowa.

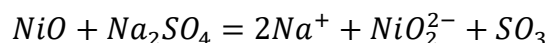


Rysunek 3-58 a) Głębokość korozji b) porównanie wpływu temperatury na prędkość degradacji stopów w wyniku korozji i oksydacji, (3), (64)

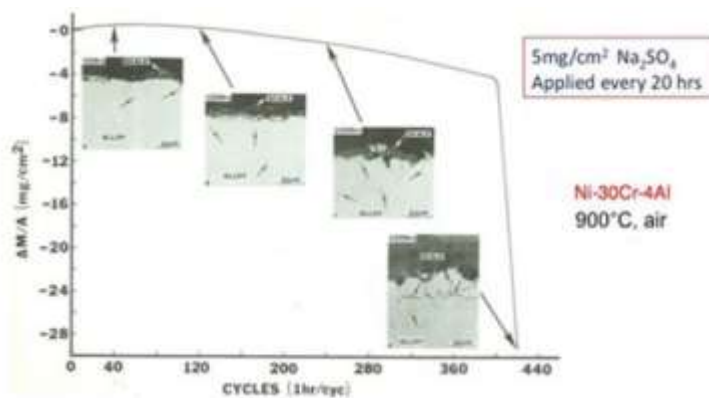
Na Rysunku 3-58 pokazano różnicę pomiędzy utlenianiem metali a korozją siarkową. Korozja siarkowa ma dużo bardziej destrukcyjny wpływ na materiał w porównaniu do utleniania. W odpowiednich warunkach może degradować materiał nawet 1000 razy szybciej od utleniania o czym pisze Young (65). Tematyka korozji siarkowej jest szeroko omawiana: Pettit (66), T. Carter (67), Salehnasab (68) oraz Kosieniak (69). Jest to tylko mała próbka artykułów i publikacji w których autorzy analizują to zjawisko. Pierwsze prace pojawiły się w latach 60 XX wieku, kiedy to dostrzeżono problem korozji siarkowej w elementach przepływowych silników odrzutowych. Jak pisze Pettit (66) zjawisko obserwowano już od lat 30- w wieżach rektyfikacyjnych, ale dopiero potrzeba poprawienia trwałości silników przyczyniła się do pogłębionych analiz zjawiska. Korozja obecna była na elementach turbin pracujących w temperaturach 850°C- 950°C. Silniki cieplne, zarówno tłokowe jak i turbinowe jako wykorzystują węglowodory kopalne. Efektem ich spalania są między innymi tlenki siarki. Przy jednoczesnej obecności soli i pary wodnej zachodzi reakcja



Temperatura topnienia Na_2SO_4 wynosi 884°C. Związki wanadu czy potasu takie jak K_2SO_4 czy V_2O_5 mogą wpływać na zmianę tej temperatury. Po rozpuszczeniu sole przekształcają się w rezerwuar jonów. Definiuje to elektrochemiczny typ reakcji z metalami. Tlenki takie jak Cr_2O_3 czy Al_2O_3 nie są odporne na działanie roztopionych soli. Z czasem tracą swoje własności ochronne. W płynnej soli następuje rozpuszczanie ochronnej warstwy tlenkowej zgodnie z równaniem:

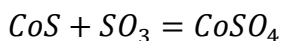


Powstały dwutlenek niklu jest porowaty i luźno związany z powierzchnią przez co nie chroni metalu przed korozją i utlenianiem. Rozpuszczenie warstwy tlenków, przy jednoczesnej obecności soli siarki i metali alkalicznych prowadzi do znaczącego przyspieszenia korozji. W obecności płynnej soli, metal reagując z tlenem tworzy porowate tlenki, które nie hamują korozji.

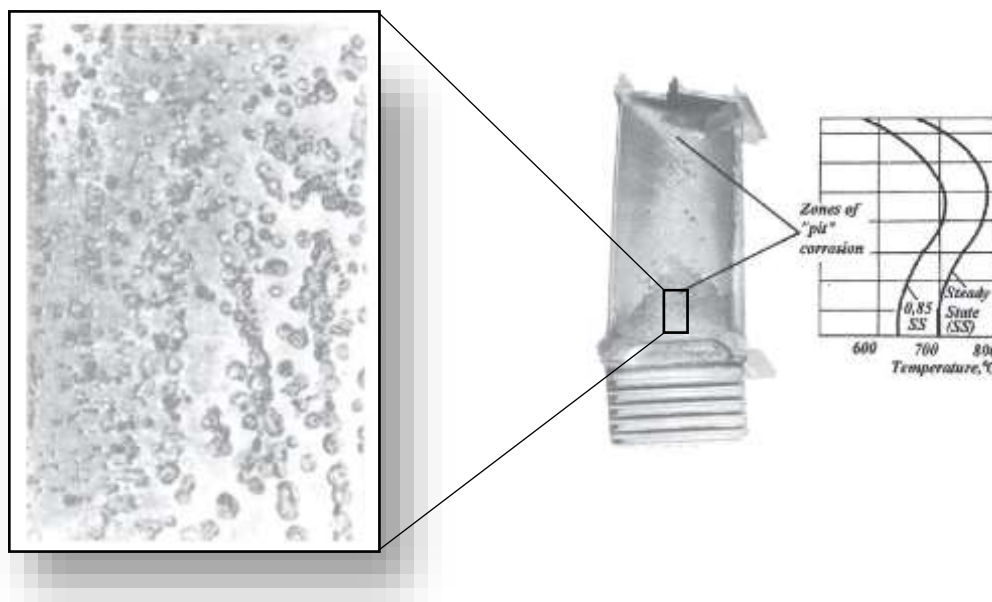


Rysunek 3-59 a) widok skorodowanej łopatki turbiny przemysłowej b) Korozja siarkowa wymaga okresu inkubacji po którym następuje gwałtowna czasem katastrofalna degradacja materiału. (68) (66)

W latach 70tych wieku XX turbiny gazowe zaczęły być stosowane jako źródła napędu w statkach morskich. W silnikach tych zaobserwowano nowy typ uszkodzeń korozyjnych. W odróżnieniu od znanej już korozji siarkowej nie była ona równomiernie rozwinięta na powierzchni elementów, ale miała wygląd wżerów. Ponadto pojawiła się na częściach pracujących w niższej temperaturze tj. 650°C- 800°C. Nowy typ korozji określony został jako korozja niskotemperaturowa, lub korozja typu drugiego. Analogicznie korozja występująca w wyższej temperaturze nazwana została korozją wysokotemperaturową lub korozją typu pierwszego. Proces korozji typu II wymaga utworzenia przez siarczki Na_2SO_4 oraz CoSO_4 lub NiSO_4 niskotopliwej mieszaniny (540°C). CoSO_4 powstaje w reakcji:



Źródłem SO_3 są spaliny, ale co ważniejsze ciśnienie cząstkowe wymagane do aktywowania reakcji jest niskie i porównywalne do ciśnienia tlenu. Przyjmuje się, iż wżerowa natura siarkowej korozji niskotemperaturowej ma związek z lokalnym rozkładem soli chloru, naprężeń i stanu powierzchni.



Rysunek 3-60 Łopatką turbiny z widocznymi wżerami korozyjnymi (3).

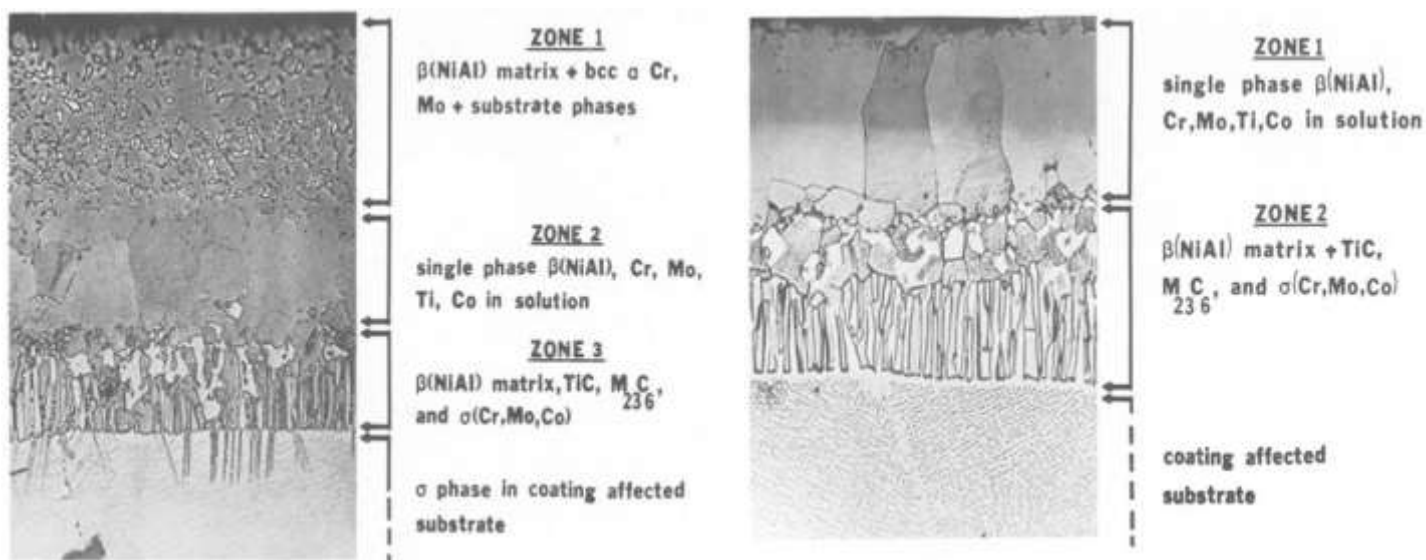
W badaniach materiałowych rozróżnienie modelu korozyjnego (I czy II) możliwe jest m.in. poprzez analizę produktów korozji. Charakterystyczna dla typu I jest większa zawartość siarczków niż tlenków.

Równolegle do analiz źródeł korozji prowadzone były poszukiwania powłok, które pozwoliłyby na wydłużenie eksploatacji części szczególnie narażonych na wysoka temperaturę oraz agresywne środowisko. Szczegółowy rozwój powłok dla elementów wykonanych z „superstopów”, ich technologię opisał Tamarin (3) oraz Sobiecki (70). Obecnie najczęściej stosowanymi są powłoki dyfuzyjne zawierające glin. Przesycenie wierzchniej warstwy detalu tym pierwiastkiem pozwala na uzyskanie na jego powierzchni zwartej warstwy tlenku glinu Al_2O_3 .

Dzięki dużej twardości i obojętności chemicznej skutecznie chroni on materiał przez agresywnym środowiskiem pracy.

Mechanizm wytwarzania powłok dyfuzyjnych z użyciem glinu opisują w swojej pracy Goward i Boone (71). W artykule opisane są dwa podstawowe dwa osadzania glinu: wysoko i nisko aktywny. Procesy różnią się nie tylko donorami aluminiowymi, ale także czasem trwania i mikrostrukturą otrzymanych powłok. Porównanie budowy powłok pokazano na Rysunku 3-61.

Odporność powłok aluminidkowych poddawana była badaniom dla różnych materiałów bazowych oraz różnych środowisk. Najczęściej stosowanym testem jest cykliczne utlenianie połączone z badaniem masy próbki. Wyniki takiego testu omawia w swojej pracy Zaguła-Yavorska (72). Jak pokazuje w swojej książce Tamarin (3) test utleniania cyklicznego odzwierciedla rzeczywiste obciążenia termiczne i mechaniczne generowane podczas pracy silnika. Te z każdą kolejną generacją są coraz wyższe.



Rysunek 3-61 a) mikrostruktura oraz opis faz dla procesu z dyfuzją wewnętrzną przy zastosowaniu procesu wysoko aktywnego b) mikrostruktura oraz opis faz dla procesu z dyfuzją wewnętrzną przy zastosowaniu procesu nisko aktywnego, w obu przypadkach materiałem bazowym był Udimet 700, (71)

W poszukiwaniu bardziej odpornych na takie oddziaływanie powłok poddano analizom różne sposoby ich wykonywania (72) oraz wpływ dodatków- przeważnie metali ziem rzadkich (73), (74). Coraz wyższe poziomy naprężeń powierzchniowych skutkują szybszym wykorzystaniem glinu, który odtwarzając powłokę tlenkową na powierzchni dyfunduje ku powierzchni. Wraz ze spadkiem zawartości glinu w warstwie przesyconej odbudowa ochronnej warstwy tlenku glinu spowalnia. Jednym ze sposobów ograniczenia naprężeń termicznych jest napylanie na części powłok ceramicznych, które poprzez zmniejszenie strumienia ciepła ograniczają naprężenia powierzchniowe. To z kolei zmniejsza naprężenia pomiędzy tlenkiem a podłożem, co wydłuża jego żywotność.

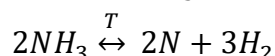
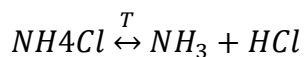
3.3.1. Wytwarzanie powłok zawierających glin z fazy gazowej.



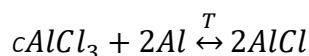
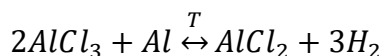
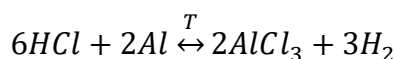
Rysunek 3-62 Piec próżniowy do wykonywania powłok w technologii VPA

(<https://byronproducts.com/vapor-phase-aluminide-coatings/>, dostęp 10.03.2023)

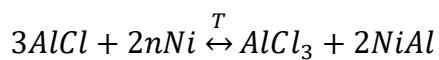
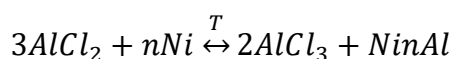
Jednym z najszerzej stosowanych procesów wytwarzania powłok zawierających glin jest osadzanie z fazy gazowej. Proces realizowany jest przy użyciu dedykowanej instalacji wyposażonej w piec próżniowy. Przykład takiego systemu pokazano na Rysunku 3-62. W piecu umieszcza się oczyszczone uprzednio elementy, granulaty metaliczny będący źródłem glinu oraz aktywator. Aktywatorem może być chlorek amonu (NH_4Cl , salmiak), który w wysokiej temperaturze ulega dysocjacji.



Produkty rozpadu aktywatora usuwają resztki powietrza z pieca oraz wspomagają oczyszczenie powierzchni metalicznych z tlenków. Chlorowódz reagując z glinem tworzy chlorki glinu.



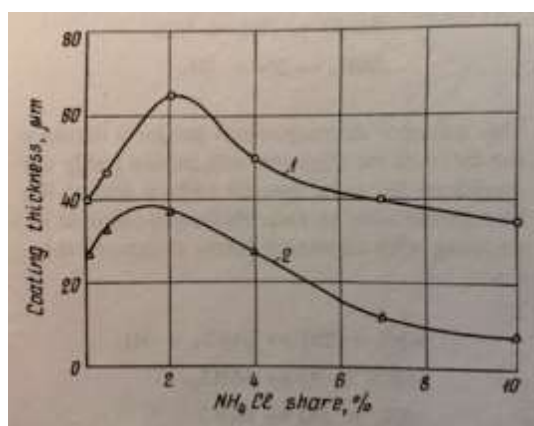
Chlorki glinu odpowiadają za transport oraz osadzanie atomów glinu na powierzchni, tworząc aluminidki.



Powstały w reakcji związek AlCl_3 "powraca" do złoża, gdzie ponownie wchodzi ponownie w reakcję z glinem. Jedną z cech charakterystycznych procesu jest brak zużywania czy degradacji aktywatora. W rzeczywistości, w celu zapewnienia lepszej kontroli procesu aktywator podlega okresowej wymianie.

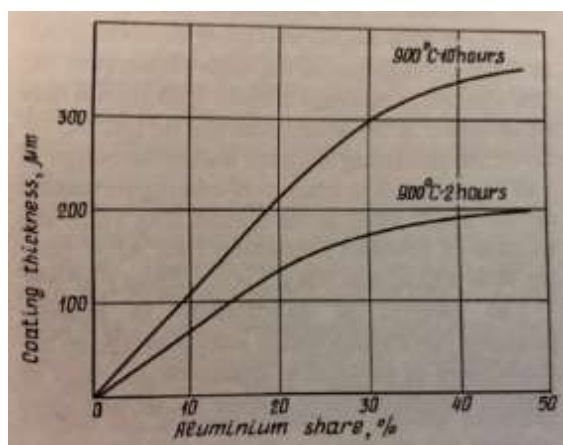
Mechanizmem napędzającym reakcje jest równowaga termodynamiczna- a raczej jej brak w wyniku pochłaniania atomów glinu przez materiał podłoża detalu, na którym wykonywana jest powłoka.

Szybkość procesu oraz grubość uzyskanej powłoki zależą od szeregu czynników. Głównie to udział procentowy glinu w stopie będącym źródłem glinu, ilość aktywatora oraz temperatura procesu.



Rysunek 3-63 Wpływ zawartości aktywatora NH_4Cl na grubość powłoki wytworzonej na stopie niklowym. (3)

W celu przyspieszenia procesu wykorzystać można sproszkowany glin w połączeniu z neutralnym wypełniaczem, którym może być np. Al_2O_3 . Podobnie jak zawartość aktywatora na efekt procesu ma wpływ także zawartość glinu w przygotowanym złożu.



Rysunek 3-64 Wpływ zawartości glinu w złożu na grubość powłoki. (3)

Ilość glinu w złożu, co pokazano na Rysunku 3-64 ma zasadniczy wpływ na grubość powłoki. Wydłużanie czasu osadzania nie pozwoli na uzyskaniu powłoki o oczekiwanej grubości, jeżeli w złożu będzie za mało glinu.

3.3.2. Chemiczne osadzanie z fazy gazowej.

Proces chemicznego osadzania z fazy gazowej podobnie jak proces VPA wykorzystuje reakcję chemiczną do transportu atomów glinu ze złoża do detalu. Podstawową różnicą jest miejsce ulokowania złoża- w procesie CVD znajdują się ono poza piecem.

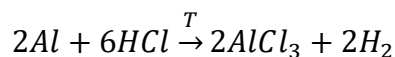
Proces CVD rozwijany jest od początku XX wieku (75). W latach 60tych XX w. został on szeroko wykorzystany do produkcji mikro-elektroniki. Umożliwiał uzyskanie warstw o ściśle kontrolowanym składzie i grubości. Jest to kluczowe w produkcji mikroprocesorów. Dodatkowo proces charakteryzuje się następującymi możliwościami:

- pokrywaniem skomplikowanych kształtów
- wnikaniami w szczeliny czy głębokie otwory
- wykorzystania szerokiej gamy prekursorów
- osadzaniem składników metalicznych znacznie poniżej ich temperatury topnienia (jest to możliwe dzięki reakcji chemicznej np.: $CH_3SiCl_3 + H_2 \xrightarrow{T} SiC + 3HCl + H_2$)
- - kontrola struktury krystalicznej, stechiometrii, morfologii czy orientacji wytworzonej powłoki
- - wprowadzanie dodatków

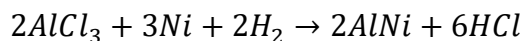
Oprócz oczywistych zalet proces ma także cechy, które sprawiają, iż jego zastosowanie staje się problematyczne. Do takich należą:

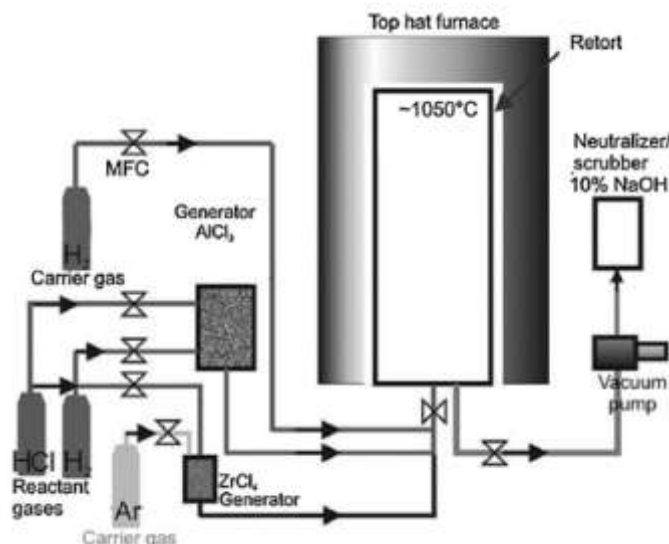
- konieczność wykorzystania związków chemicznych jako prekursorów, które mogą być toksyczne, łatwopalne a w szczególnych sytuacjach wybuchowe
- złożoność procesu oraz wielość parametrów wpływających na efekt końcowy

Proces wytwarzania powłok aluminidkowych w procesie CVD opisany został w pracy Zielińskiej (76). Chlorek glinu $AlCl_3$ powstaje w zewnętrznych reaktorze w temperaturze 330°C w wyniku reakcji:



Następnie $AlCl_3$ transportowany jest za pomocą strumienia wodoru do głównej komory pieca, gdzie zachodzi kolejna reakcja:



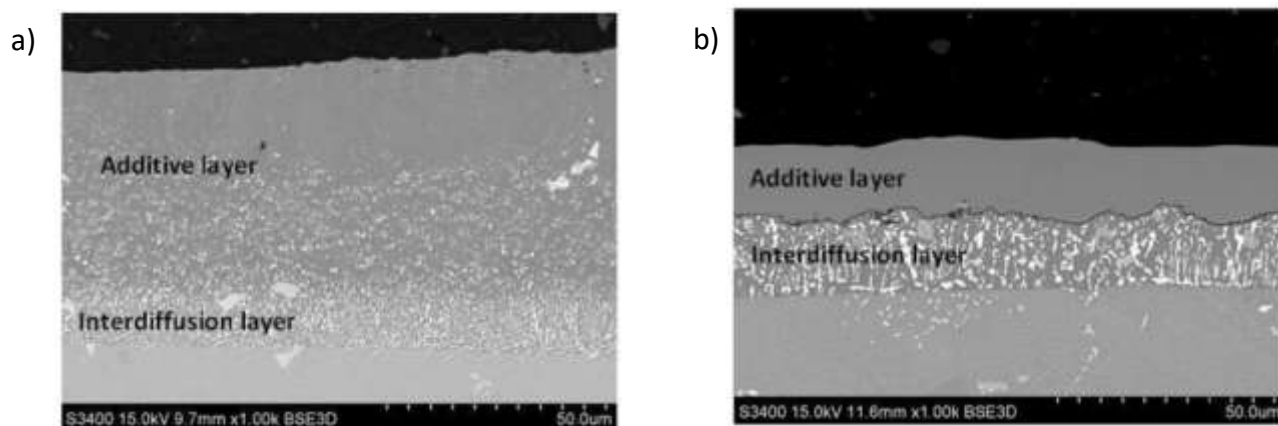


Rysunek 3-65 System do wytwarzania powłok w technologii CVD.

Na Rysunku 3-65 przedstawiono schemat systemu do wytwarzania powłok z fazy chemicznej. Do działania układ wymaga zasilania wodorem, kwasem chlorowodorowym oraz argonem. Po podgrzaniu przez generator (szary prostokąt) tłoczony jest jednocześnie wodór i chlorowódor. W generatorze zachodzi opisana wcześniej reakcja. Z dodatkowego generatora wprowadzić do pieca można domieszki. Wszystkie elementy transportowane są do pieca, gdzie zachodzi wytwarzanie powłoki. Po opuszczeniu pieca gazy zawierające wodór i chlorowódor muszą być zneutralizowane.

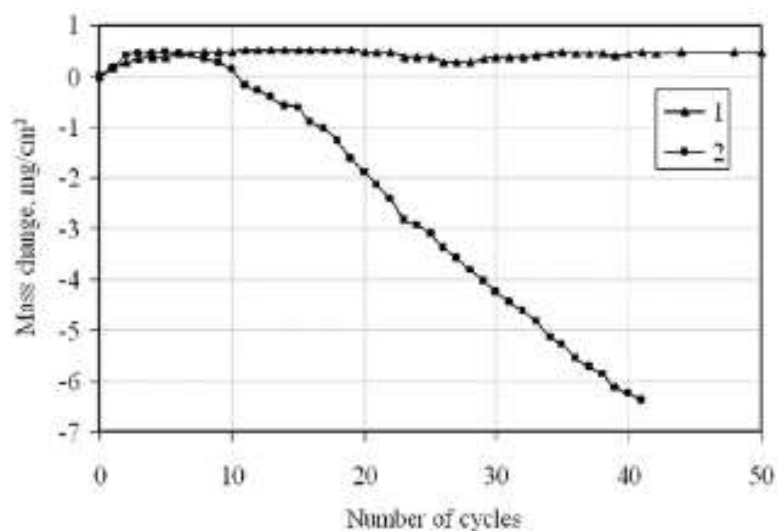
3.4. Odporność korozyjna powłok aluminidkowych

Własności ochronne powłok są tematem ciągłych badań naukowych. Podstawowymi tematami badań są mechanizmy degradacji powłok oraz metody podnoszenia ich żywotności. Planowana poprawa odporności powłok wymaga poznania mechanizmów, które spowalniają korozję. W przypadku powłok aluminidkowych jest to ograniczenie transportu tlenu w głąb materiału. Blokadę stanowi zwarta warstwa Al_2O_3 . Jest to zjawisko wspólne dla powłok aluminidkowych, bez względu na technologię wykonania. Badania koncentrują się na różnicach w budowie, składzie fazowym, czystości oraz dodatkach poprawiających żywotność powłok. Zagula wraz z zespołem (72) przebadła różnicę pomiędzy powłokami wykonanymi w technologii VPA oraz CVD. Obie powłoki składają się z dwóch warstw: nabudowanej i dyfuzyjnej. Wygląd warstw przedstawiono na Rysunku 3-66.



Rysunek 3-66 Powłoki aluminidkowe wytworzone przy pomocy procesu a) VPA, b) CVD. (72)

Powłoka wykonane w technologii VPA miało grubość całkowitą 65 μm podczas gdy po procesie CVD 34 μm . Analiza składu fazowego (XRD) zweryfikowała w powłoce wytworzonej metodą VPA węgliki. Nie stwierdzono natomiast ich obecności w powłoce wytworzonej w technologii CVD. Długotrwałe badania cyklicznego utlenianiu pokazały znaczącą różnicę w prędkości degradacji powłok. Testy realizowane były przez 1000 godzin. Cykl trwał 23 godziny a temperatura wynosiła 1100°C. Po tym czasie następowało chłodzenie i ważenie próbek.



Rysunek 3-67 Wykres zmiany masy próbek ze stopu ŻS6K 1) proces CVD, 2) VPA proces. (72)

Na Rysunku 3-67 pokazano wykres przedstawiający zmianę masy próbek w funkcji ilości cykli. Wyższa odporność powłoki wykonanej w technologii CVD jest bardzo wyraźna. Autorzy wykazali, iż głównym źródłem tak znaczącej różnicy w odporności powłok jest czystość powłoki. Cecha ta wpływa także na skład fazowy warstw powłoki. Warstwa nabudowana wytworzona w procesie VPA składała się głównie z $NiAl$ oraz węglików. W procesie CVD uzyskano jednorodną warstwę $NiAl$. W przypadku powłoki VPA zidentyfikowano na powierzchni miejsca bogate w HfO_2 . Zgodnie z przyjętym założeniem- miejsca te tworzyły „mostki” ułatwiające transport atomów tlenu w głąb powłoki, co skutkowało szybszym i nierównomiernym tworzeniem się tlenków Al_2O_3 . Ponadto, redukująca tlenki atmosfera wodorowa, która wykorzystywana jest w procesie CVD usuwa z powierzchni pokrywanych detali zanieczyszczenia tlenkowe. Zabieg ten poprawia czystość powłoki. Dodatkowo, wpływ na parametry powłoki ma nie tylko proces, ale także skład chemiczny materiału poddawanego obróbce. Jak pokazano w pracy (10) powłoka aluminidkowa ma zauważalnie różne własności w zależności od składu chemicznego podłoża. Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu różnych stopów Inconel.

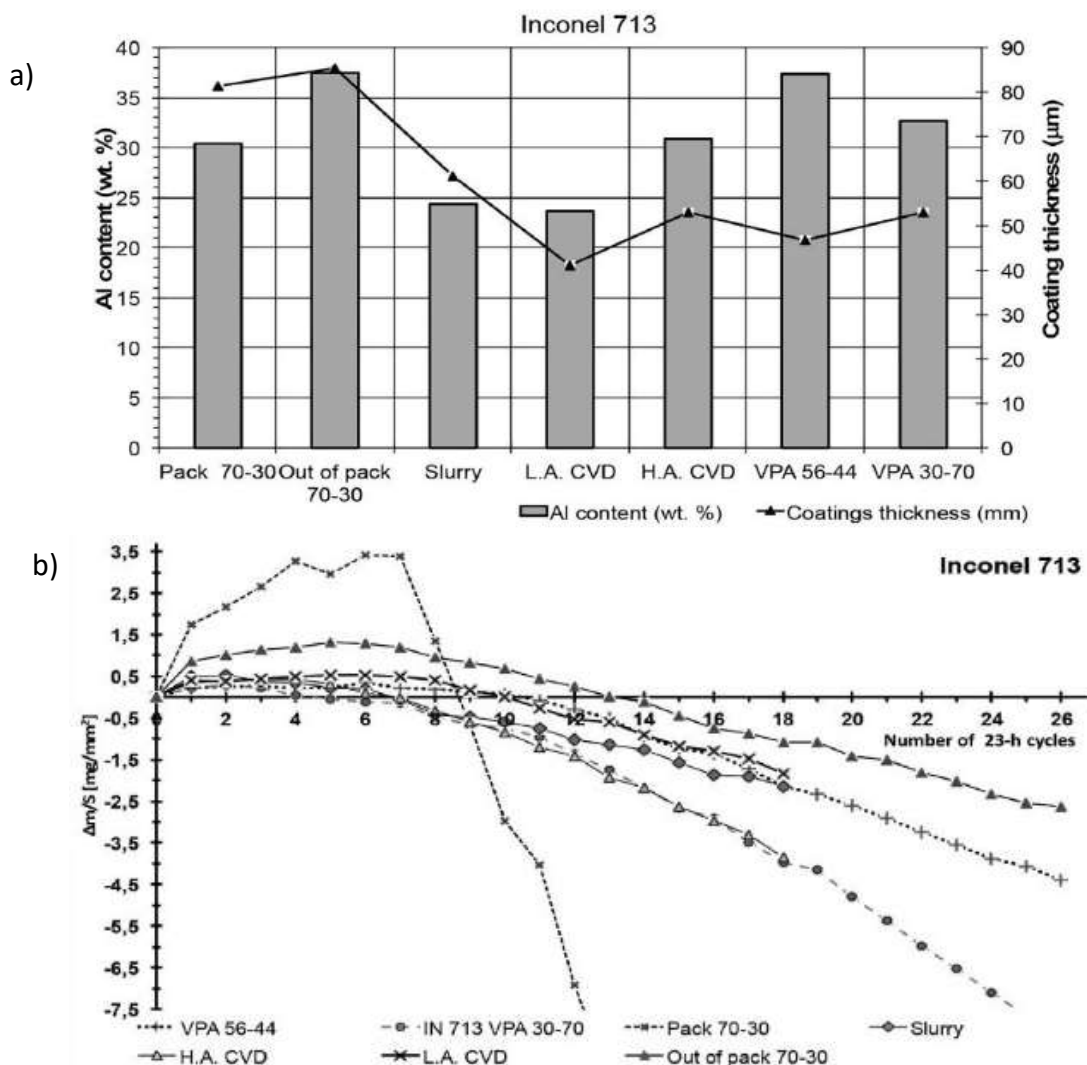
Superalloy	Thickness, μm		
	Inner layer	Outer layer	Total layers
Inconel 713LC	21.4	23.8	45.2
Inconel 625	11.7	20.6	32.3
Inconel 738LC	17.5	18.4	35.9
Inconel 100	23.1	21.2	44.5
Inconel 718	11.1	16.5	28.4

Rysunek 3-68 Zestawienie grubości warstw powłoki aluminidkowej wykonanej na różnych stopach Inconel. (10)

Autorzy nie precyzują jakie składniki stopowe mają najsilniejszy wpływ na grubość warstw oraz grubość całkowitą powłoki. Nie wykonano także badań oksydacyjnych, które umożliwiłyby sprawdzenie wpływu składu chemicznego na odporność korozyjną.

Jednym z głównych kierunków badań nad powłokami aluminidkowymi jest modyfikacja metalami ziem rzadkich oraz nanoszenie nowymi technikami. Swadźba z zespołem (77) przeprowadzili badania wykorzystując do wytworzenia powłoki technikę arc-PVD która pozwala na wprowadzenie do powłoki takich pierwiastków Hf. Inną technikę zaprezentował Muboyadzhyan (78) który użył metody jonowo- plazmowej. Technologia ta odznacza się wg autora mniejszym zanieczyszczeniem środowiska oraz lepszymi parametrami powłoki, takimi jak jednorodność i struktura fazowa. Nie zaprezentował jednak wyników badań eksperymentalnych potwierdzających tezę o wyższej odporności uzyskanej powłoki na wysoko temperaturowe utlenianie cykliczne. Różne techniki analizował Góral (79). W pracy zweryfikowano wpływ

sposobów wytwarzania powłoki na jej parametry oraz odporność na utlenianie cykliczne. Wyniki pomiarów grubości powłoki pokazano na Rysunku 3-69-a.



Rysunek 3-69 a) grubość oraz zawartość AL w powłokach otrzymanych przez Górala b) wyniki testów cyklicznych (79)

Wyniki testów cyklicznego utleniania zaprezentowane są na Rysunku 3-69-b. Na próbce wykonanej ze stopu Inconel 713, która traciła najmniej masy w trakcie testu wytworzono powłokę w technologii out-of-pack. Z kolei dla stopu Inconel 100 zdecydowanie najlepszy wynik otrzymano dla procesu wysokoaktywnego osadzania z fazy chemicznej.

Vialas (80) poddała analizom wpływ długości cyklu na prędkość korozji. Próbki poddane były zarówno standardowym cykлом 23 godzinowym (23h/1050°C godzina chłodzenia, pomiar), jak i długim cyklem trwającym 300 godzin. W badaniu użyto dwóch powłok: Pt-Al oraz NiCoCrAlYTa.

Wszystkie próbki poddane było próbom trwającym łącznie 1800 godzin. Badanie dylatometryczne wykazało lepszą odporność korozyjną powłoki NiCoCrAlYTa. Nie stwierdzono także znaczących różnic w mikrostrukturze pomiędzy próbkami. Natomiast na powłokę dyfuzyjną, modyfikowaną platyną silniejszy wpływ miało sześć cykli 300stu godzinnych niż 1800 jednogodzinnych.

Wpływem pierwiastków reakcyjnych Hf oraz Y zajmował się w swojej pracy Fisher (81). Do modyfikacji powłoki Pt-Al użył implantacji jonowej. Analiza nie dała jednoznacznych wniosków. Wszystkie typy powłok- niemodyfikowane, implementowane Hf oraz Y wykazały podobną odporność korozyjną.

4. Wnioski z analizy literatury

4.1. Proces obróbki elektro erozyjnej

Publikowane prace poruszają szerokie spektrum zagadnień związanych z optymalizacją, poprawą procesu, określeniem zależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi a danymi wyjściowymi. Co zwraca uwagę to brak kompleksowych analiz uwzględniających wszystkie zmienne znaczące. Najczęściej badane są główne zmienne takie jak w przypadku impulsu: napięcie (U), natężenie (I), czas płukania (T_{off}), czas pracy (T_{on}). Wielu autorów porusza kwestię związaną z materiałem i kształtem elektrody czy ciśnieniem dielektryka wewnątrz elektrody. Mało jest natomiast opracowań poruszających na przykład wpływ wydatku dielektryka płynącego przez elektrodę czy wpływu pojemności włączonej w układzie generatora. Zakresy parametrów wykorzystywanych w badaniach są bardzo różne. Powoduje to rozbieżność wyników i różne wnioski oraz zalecenia bazujące na rezultatach optymalizacji. W ograniczonym stopniu autorzy poddają analizie wpływ własności fizykochemicznych na proces. Brak jest złożonego modelowania numerycznego procesu z uwzględnieniem wymiany energii, wielofazowości płynu poza obszarem roboczym (bąble gazu, drobiny metaliczne, ciecz). Warunki brzegowe są niepełne bądź odbiegają od rzeczywistości a uproszczone modele nie odzwierciedlają pełnego zjawiska. Nieuwzględnienie drobin materiału zmienia pęd cieczy oraz jej temperaturę. Zastosowanie warunku brzegowego w postaci wydatku cieczy pomija wpływ chropowatości ścian wewnętrznych elektrody na końcowy wydatek. Dużym uproszczeniem jest także analizowanie procesu drążenia elektroerozyjnego bez uwzględnienia złożonego zjawiska wymiany ciepła w obszarze wyładowań. Oczywiście nie jest możliwe wykonanie modelu zjawiska w 100% odpowiadającego rzeczywistości. Nie na tym polega modelowanie. Jednak współczesne programy MES/MOS umożliwiają łączenie zjawisk termicznych, przemian fazowych i elektrycznych.

Nie są powszechne badania wpływu parametrów elektrody na proces drążenia. Brak jest analiz wpływu składu chemicznego czy wewnętrznej struktury elektrody. Nie analizowany jest wpływ proporcji geometrycznych elektrody. Średnice wykorzystywanych w dostępnych badaniach elektrod rurkowych są zazwyczaj w zakresie 0.3-1mm. Elektrody o mniejszych średnicach wprowadzają do procesu niespotykane wcześniej problemy jego stabilności.

Prezentowane prace nie poruszają zagadnień związanych z długotrwałą stabilnością procesu. Wpływ zanieczyszczenia dielektryka, czystości oprzyrządowania, zmiany źródła elektrod nie były przedmiotem weryfikacji. Realizowane testy opierają się na kilkudziesięciu- maksymalnie kilkuset drążeniach. Można zatem uznać, iż warunki są niezmiennie. Przy długotrwałej eksploatacji pojawiają się problemy nieuwzględniane w publikacjach naukowych, takie jak pojawienie się glonów w wodzie dejonizowanej czy zwiększona ilość mikrocząsteczek.

Wraz z upowszechnieniem się algorytmów nauczania maszynowego pojawiły się próby zaprzęgnięcia ich do poprawy procesu. Ze względu na mnogość parametrów mających istotny wpływ na proces EDD stanowi on doskonały obszar dla tego typu zastosowań.

Zaproponowane metody modyfikacji procesu są często rozwiązaniami czysto laboratoryjnymi. O ile wprowadzenie obróbki hybrydowej, polegającej dodaniu do wody dejonizowanej dodatków w postaci soli lub kwasów, pod wpływem których, dielektryk staje się elektrolitem wydaje się być rozwiązaniem możliwym do przemysłowego użycia, o tyle odsysanie próżniowe czy dodatki drobin metalicznych są zagadnieniami czysto teoretycznymi.

Koncepcja izolowania elektrod zaproponowana przez Ferrarisa (82) nie została szerzej podjęta. Co ciekawe koncepcja wydaje się remedium na wiele negatywnych elementów EDD. Ograniczenie przebieg na powierzchni bocznej powinno ograniczyć nierównomierne zużycie elektrody, rozbić średnicę otworu, nieprecyzyjne wykrycie przebicia.

Obszar płukania przerwy międzyelektrodowej jest obecny w tematach prac. Jednak nieliczne weryfikują istnienie punktów optymalnych wydatku dielektryka tłoczonego przez elektrodę. Wskazana jest poprawa bez weryfikacji czy zastosowane parametry są optymalne.

4.2. Korozja i powłoki dyfuzyjne

Historia badań nad korozyjnym zniszczeniem elementów silników lotniczych ma historię porównywalną z rozwojem samych silników. Z czasem poznawano mechanizmy przyczyniające się do degradacji materiału oraz rozwijano sposoby temu zapobiegające. Technologia, najszerzej dziś stosowana- pack cementation i over pack – czyli VPA (Vapour Phase Aluminiding) rozwijana jest od lat 50 ubiegłego wieku. Poznano i opisano mechanizmy rządzące dyfuzją aluminium, wpływem procesu na strukturę fazową. Dalsze badania powiązały własności warstw z odpornością na różne typy korozji oraz utlenianie. Wdrożone do produkcji zostały powłoki ceramiczne, których jednym z celów jest zmniejszenie powierzchniowych gradientów temperatur. Ogranicza to szybkość łuszczenia tlenków Al_2O_3 z powierzchni detali. Jednym z mechanizmów napędowych tego zjawiska jest różnica współczynników rozszerzalności cieplnej stopu oraz tlenku. Gradient temperaturowy na jaki wystawiana jest dana część przekłada się na wydłużenie lub skrócenie jej życia. Poprawę trwałości powłok osiągnąć można także przez podniesienie czystości stopów- rozwiązanie dalekie jest od zastosowania przemysłowego. Faktem jest, że korozja oraz jej efekty nie zostały wyeliminowane. Zgodnie z prawami fizyki i termodynamiki wyeliminowanie zjawisk korozji i utleniania podzespołów nie jest możliwe. Należy zatem szukać rozwiązań podnoszących ich trwałość. Wydłużenie życia elementów można osiągnąć podnosząc zawartość glinu w wytworzonej warstwie. Jednak nadmierny poziom glinu prowadzi do kruchości materiału, co z kolei obniża trwałość zmęczeniową materiału. Podobnie z odpornością na pękanie, którą dodatek glinu obniża. Domieszkowanie powłok atomami takich pierwiastków jak Hf, Zr, Y, Re czy Pt wpłynęło pozytywnie na czas ich życia. Mechanizmy stojące

za zmianami są poddawane badaniom. Platyna stosowana jest od lat 80 jako warstwa stabilizująca i pozwalająca na wydłużenie trwałości ceramicznych powłok termicznych.

Pojawiają się także nowe rozwiązania, gdzie w miejsce technik dyfuzyjnych stosuje się osadzanie mechaniczne za pomocą strumienia plazmy wykorzystując procesy HVOF czy LPPS. Pojawiają się próby wspomagania ich wyładowaniami jarzeniowymi. Inną technologią dająca podobne rezultaty wyniki jest osadzanie z fazy gazowej. Dzięki zdefiniowanemu i kontrolowanemu składowi chemicznemu pozwala ona na uzyskanie jednorodnej pod względem budowy warstwy ochronnej. Jak pokazują badania, warstwa taka unika zanieczyszczenia pierwiastkami stopowymi takimi jak S, Ti, Ta które negatywnie wpływają na trwałość korozyjną powłok.

Celem badań w obszarze pokryć antykorozyjnych jest stworzenie na powierzchni detali rezerwuaru glinu, który w trakcie eksploatacji pozwoli na odtworzenie ochronnej bariery Al_2O_3 w jak najdłuższym czasie. Weryfikowane są różne są warianty i modyfikacje istniejących technologii.

5. Cel i zakres pracy badawczej

Na odporność powłoki aluminidkowej, co wykazał przegląd literatury, ma wpływ wiele czynników. Są to zarówno parametry procesu, ale też skład chemiczny, jak i struktura fazowa powierzchni detalu, które podlegają modyfikacji podczas obróbki elektroerozyjnej. W pracy skoncentrowano się na następujących zagadnieniach:

- 1) Opracowanie parametrów wykonywania otworów chłodzących, które zapewniają stabilne działanie przy jednoczesnej wysokiej powtarzalności geometrycznej procesu
- 2) Wpływ modyfikacji powierzchni spowodowany obróbką elektroerozyjną na trwałość powłok aluminidkowych przy zastosowaniu różnych technik wytwarzania powłok (CVD oraz VPA)
- 3) Modyfikacja procesu elektrodrążenia wpływająca pozytywnie na powłokę antykorozyjną naniesioną na obszarze objętym obróbką iskrową

Badania realizowane były w ramach rozwoju technologii wykonywania elementów turbin chłodzonych wykorzystujących zaawansowany system chłodzenia.

5.1. Zakres prac realizowanych w ramach projektu rozwojowego firmy General Electric Company Polska.

Projektowanie nowego silnika firma General Electric Aerospace ulokowała w Europie. Jednym z kilku zespołów, które pracowały nad tą konstrukcją był ten zatrudniony przez General Electric Company Polska. Prace badawczo rozwojowe obejmowały kompletny proces produkcyjny otworów chłodzących w łopatkach, aparatach kierujących oraz bandażach silnika Catalyst. Jest to pierwszy silnik całkowicie zaprojektowany w Europie. Nad projektem pracowały zespoły z Polski, Niemiec, Czech, Włoch i Turcji. Przekrój silnika pokazany jest na Rysunku 5-1. Po etapie projektowania następuje etap wdrożenia produkcyjnego, co wymaga określenia dostawców posiadających odpowiednie kompetencje bądź wewnętrznego ich rozwinięcia, co w dalszej kolejności umożliwi rozpoczęcie produkcji. Technologia wykonywania małych otworów chłodzących jest objęta przez rząd Stanów Zjednoczonych ograniczeniami eksportowymi, co przy braku licencji uniemożliwia zespołom europejskim opracowanie wytycznych projektowych dla tej technologii. Rozwój wiedzy w tym obszarze w obrębie krajów europejskich umożliwi usystematyzowanie praktyk projektowych.



Rysunek 5-1 Przekrój silnika Catalyst

(<https://www.geaerospace.com/propulsion/regional-business/catalyst>, dostęp 10.03.2023)

Technologia produkcyjna obejmuje cały szereg elementów takich jak:

- dobór parametrów procesu
- wytyczne jakościowe do procesu (np. sposób pomiaru otworów)
- wytyczne technologiczne (np. sposób tworzenia kodów sterujących obrabiarką, sposób ich przekazywania na obrabiarkę)
- narzędzia i przyrządy mocujące części w obrabiarce
- system nadzorujący proces

Przed przystąpieniem do realizacji prac naszkicowano sposób i główne elementy projektu. Główny podział zakładał rozwój dwóch obszarów:

- narzędzi cyfrowych pozwalających na zarządzanie procesem, akwizycję danych oraz pozwalających na optymalizację procesu
- samego procesu elektrodrążenia oraz analizy wpływu na powłoki

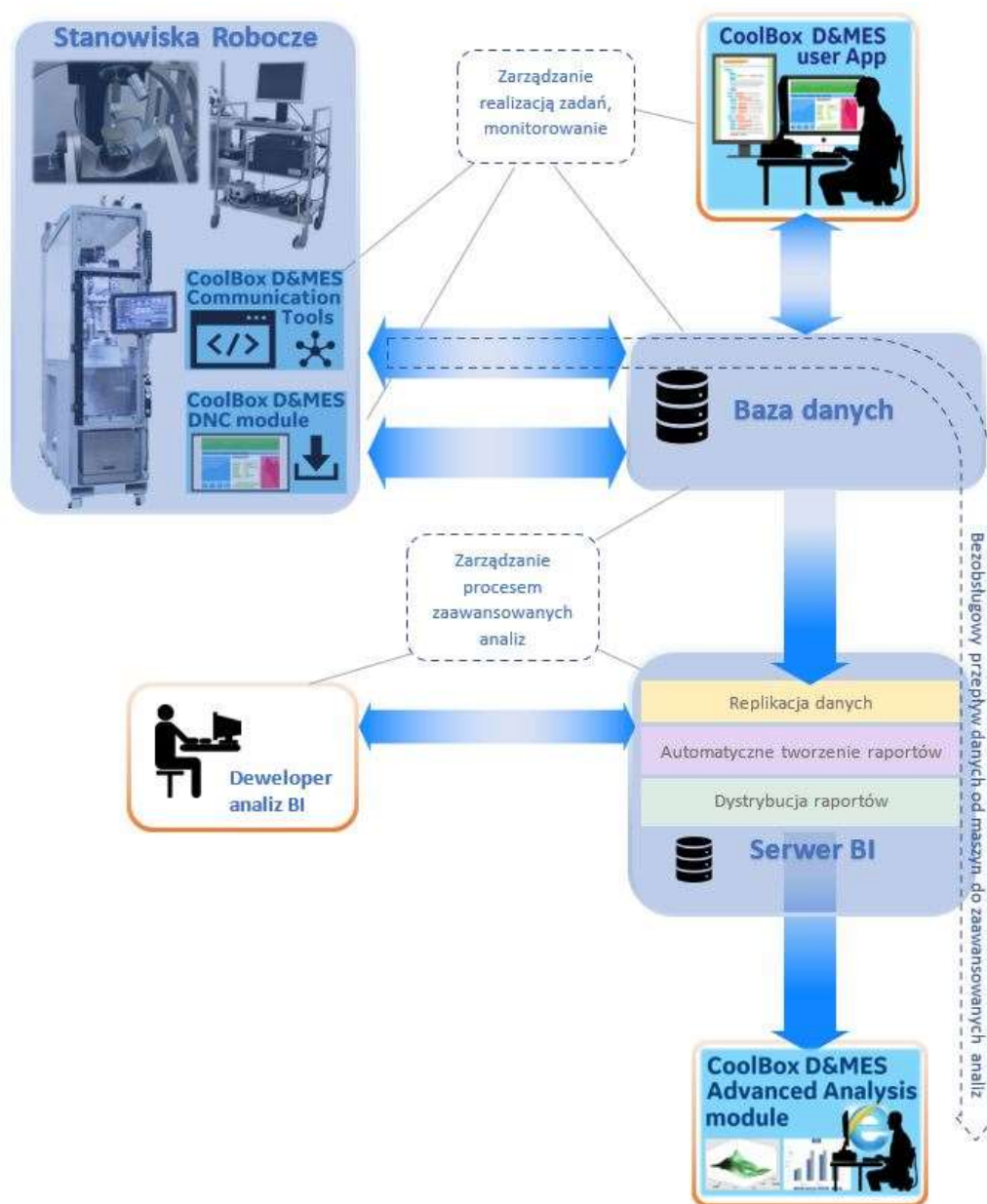
Wszystkie te elementy rozwijane są przez zespół Centrum Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych, który działa w ramach biura EDC. Biuro to jest wspólnym przedsięwzięciem General Electric Company Polska oraz Sieć Badawcza Łukasiewicz- Instytut Lotnictwa w Warszawie.

5.1.1. Narzędzia cyfrowe- przemysł 4.0

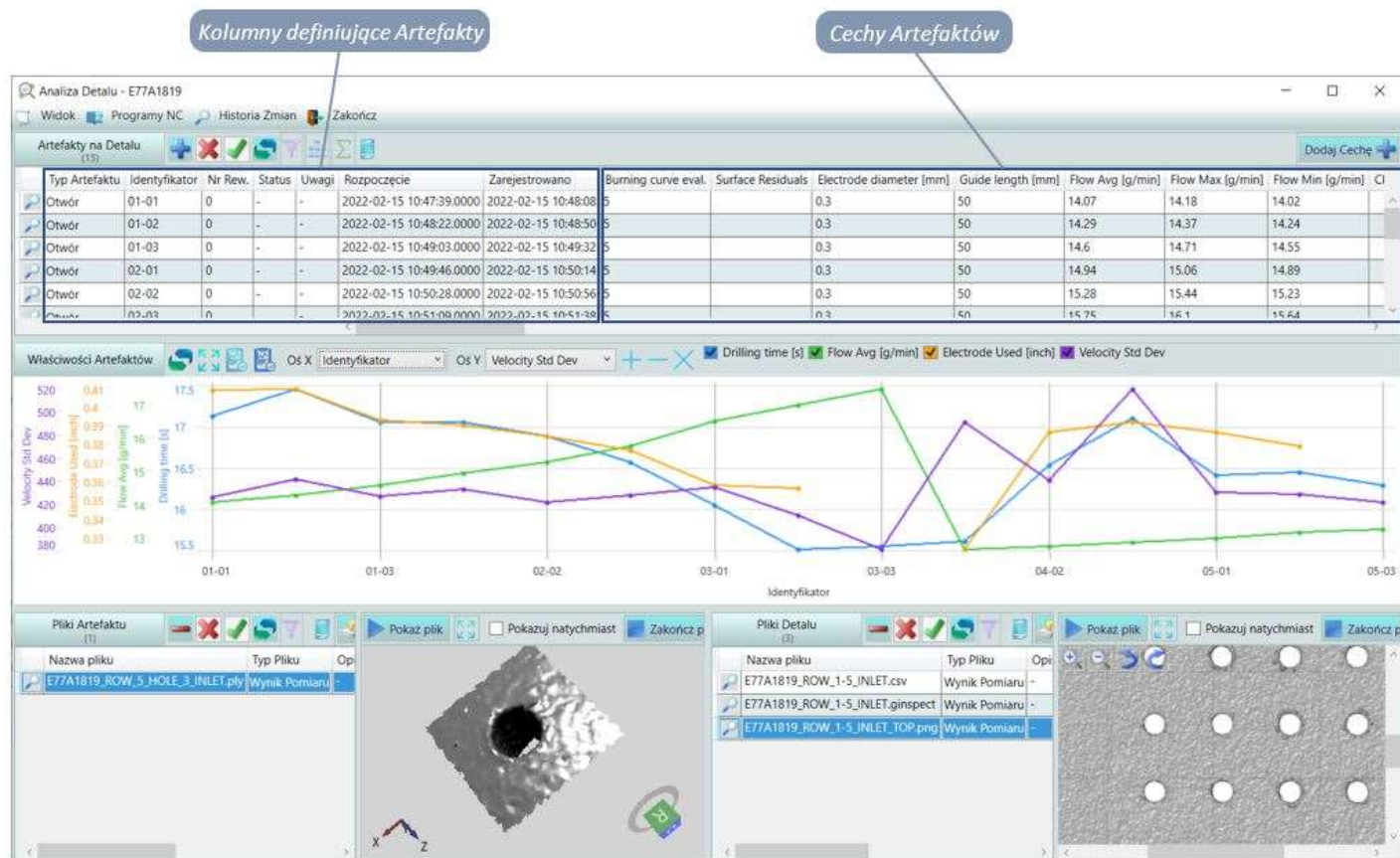
Analiza dużej liczby danych generowanych podczas drążeń, wymagała stworzenia systemu informatycznego umożliwiającego rejestrację a następnie obróbkę danych w sposób uporządkowany i planowany. Po zapoznaniu się z wymaganiami, ilością i charakterem danych podjęto działania prace nad projektem funkcjonalnym systemu bazodanowego *CoolBox-Development and Manufacturing Execution System*. Schemat ideowy przepływu danych przedstawiono na Rysunku 5-2. System oparty został na bazie danych Oracle. Pierwszym krokiem było opracowanie definicji systemu- tzw. projektu funkcjonalnego. Systematyzował on cel, funkcje, role poszczególnych użytkowników oraz sposoby komunikacji z urządzeniami. Dla uproszczenia pracy zautomatyzowano transfer danych zarówno z elektro drążarki jak i z urządzenia pomiarowego oraz mikroskopu SEM Jeol. Wyeliminowało to jednocześnie możliwości błędu przy ręcznym kopiowaniu danych. W celu zapewnienia spójności opisu zespół przyjął następującą nomenklaturę: artefakt- element obrabianego przedmiotu (np. wydrążony otwór), cechy artefaktu- zbór powtarzalnych cech opisujących dany artefakt (np. średnica, średni wydatek płynu chłodzącego, średnie napięcie, itp.).

Na Rysunku 5-4 przedstawiano widok detalu w aplikacji CB-DMES- kolejne wiersze reprezentują wykonane artefakty a kolumny ich cechy. Okno wykresów pozwala na graficzne przedstawienie wartości cech dla wykonanych artefaktów. Dolne okna pokazują pliki powiązane z detalem oraz poszczególnymi artefaktami. Elastyczność systemu pozwoliła na import danych tekstowych będących wynikiem analizy EDS składu chemicznego próbek.

Wykorzystanie systemu bazodanowego umożliwiło użycie do analizy danych narzędzia SpotFire firmy Tibco. System BI umożliwia szybką i szczegółową ewaluację dużej ilości danych. Pozwala także na tworzenie schematów raportów, które stanowią podstawę do analizy kolejnych eksperymentów. Taka automatyzacja znacząco przyspiesza proces rozwojowy, a także eliminuje błędy, które są nieodzownym elementem analiz przeprowadzanych indywidualnie przy użyciu takich narzędzi jak aplikacja Excel.



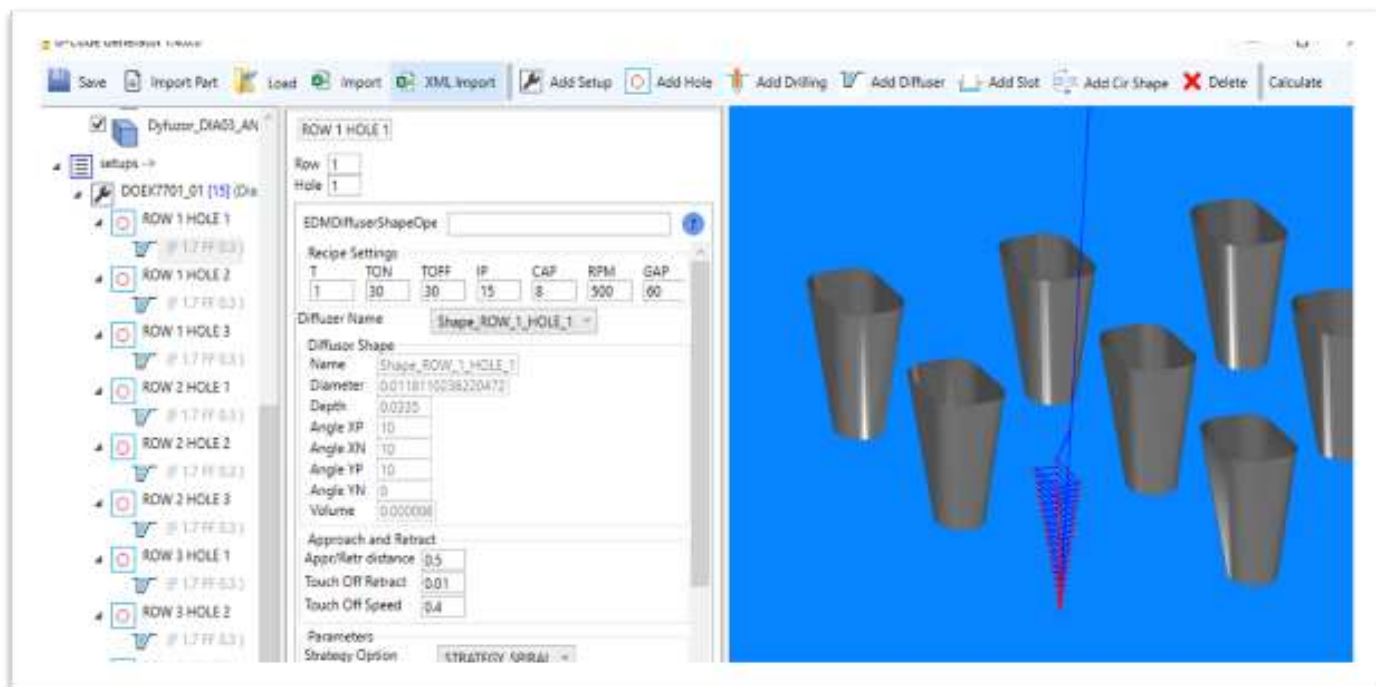
Rysunek 5-2 Schemat przepływu danych rejestrowanych w systemie CoolBox DMES



Rysunek 5-3 Okno danych dla wykonanej części testowej

Modyfikacje procesu, wynikające z przeprowadzonych badań oraz analizy ich realizowane były przy pomocy autorskiego oprogramowania CoolBox G-Code. Aplikacja ta umożliwia automatyczne tworzenie programu sterującego pracą obrabiarki. Rozwój modułu postępował wraz z poszerzaniem wiedzy o procesie elektro drążenia.

W pierwszej fazie rozwoju tego narzędzia założono, iż generowanie kodu definiującego ścieżkę narzędzia dla otworów kształtowych opierać się będzie na zdefiniowanych figurach geometrycznych (kwadrat, prostokąt, okrąg) odpowiadających wykonywanym otworom. Drugim etapem, była modyfikacja programu w kierunku wykorzystania modeli przestrzennych. Po odpowiednim przygotowaniu modelu, aplikacja sama rozpoznaje otwory chłodzące oraz planuje optymalną ścieżkę narzędzia. Na Rysunku 5-4 pokazano widok planowania parametrów i ścieżki narzędzia dla otworu kształtowego.



Rysunek 5-4 Widok okna aplikacji CoolBox G-Code po wprowadzeniu opcji importu modeli 3D oraz widok otworów kształtowych wraz z widoczną ścieżką narzędzia.

Aplikacja umożliwia pracę z wieloma typami plików definiujących geometrię. Parametry drążenia można ustawiać dla grup lub wybranych otworów. Możliwa jest wizualizacja ścieżki narzędzia.

6. Opracowanie technologii drążenia elektroerozyjnego

Do testów wykorzystano obrabiarkę numeryczną zaprojektowaną do wykonywania małych i bardzo małych otworów. Nie posiadała ona zdefiniowanych bibliotek czy instrukcji technologicznych opisujących proces wykonywania drążenia. Wykonanie poprawnych drążeń wymagało zatem zdobycia kompletnej wiedzy technologicznej w tym obszarze. Zespół przyjął następujące kryteria:

- parametry procesu muszą umożliwiać wykonanie części zgodnej z rysunkiem, tzn. położenie, kształt i głębokość otworu muszą być zgodne z wymaganiami rysunkowymi
- elementy procesu takie jak parametry, użyte przyrządy czy wykorzystane elektrody muszą być rejestrowane w bazie danych
- w dalszej perspektywie proces należy poddać optymalizacji pod kątem wydajności i kosztu

Główne wymagania koncentrują się na poprawnie wykonanej części. Optymalizacja i poprawa procesu może nastąpić, jeżeli wykazana zostanie jego przydatność produkcyjna. Zespół nie tylko analizował wpływ poszczególnych zmiennych na proces, ale także weryfikował jego stabilność. Stabilność oznacza powtarzalność otrzymanych geometrii, ale także powtarzalność detekcji

przebiecia. Błędne działanie układu wykrywającego przebiecie prowadzi może do uszkodzenia części.

Analizie poddano następujące parametry procesu:

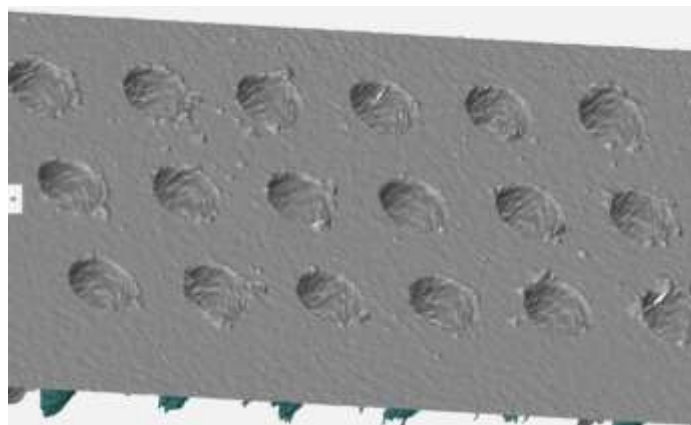
- napięcie (I)
- natężenie (A)
- czas wyładowania (T_{on})
- czas płukania (T_{off})
- pojemność (C)
- wydatek wody przepływającej przez elektrodę
- posuw elektrody
- prędkość obrotowa elektrody

Prace nad technologią drążenia podzielono na rozwój drążenia otworów oraz na rozwój techniki wierszowania umożliwiające wykonanie otworów kształtowych.

6.1. Materiały i metody

Do badań drążenia elektroerozyjnego wykorzystano drążarkę sterowaną numerycznie. Urządzenie zapewnia płynne sterowanie w 5ciu osiach, co umożliwia wykonywanie skomplikowanych kształtów przy zastosowaniu obróbki wierszowania. Napięciem i natężeniem pracy sterować można w przedziale: 0-100V oraz 0-50A. Czas pracy (T_{on}) oraz czas płukania (T_{off}) regulowany może być w przedziale 0-999ms. Obroty wrzeciona mogą być regulowane w zakresie 0-500 obr/min. Funkcję dielektryka pełni woda dejonizowana o kontrolowanym i stałym poziomie konduktywności. Jest ona dostarczana do urządzenia przez jednostkę filtracyjno- pompową. Urządzenie jest wyposażone w filtry $5\mu m$ oraz zapewnia stały poziom konduktywności na poziomie 10mS/cm. System filtrujący wyposażony jest w pompę wysokiego ciśnienia, która zasila wrzeciono elektrody. Układ sterujący drążarki rejestruje zmiany napięcia i natężenia co 0.006s.

Weryfikacja geometryczna wykonanych otworów prowadzona była przy pomocy systemu Alicona G5 IFC200. System ma możliwość wykonywania skanów detali pod kilkoma kątami a następnie scalania skanów w jeden całościowy obraz elementu.



Rysunek 6-1 System Alicona G5 IFC200 oraz skany otworów wykonanych w płytce testowej.

System bazuje na zasadzie zmiennego ogniskowania co pozwala, na podstawie wyostrzonych punktów zbudować mapę powierzchni. Po zeskanowaniu dedykowany program analizował średnicę każdego otworu a wartość przypisywał do numeru identyfikacyjnego płytki i otworu. Urządzenie ma także możliwość badania chropowatości. Badania metalograficzne optyczne wykonywano na mikroskopie Keyence VHX-7000.

Podstawowym materiałem użytym do testów były płytki wykonane ze stopu Inconel 718 o wymiarach 25x50x3mm. Wybór ten podyktowany był dostępnością materiału oraz szerokim jego wykorzystaniem w badaniach procesu drążenia elektroerozyjnego. Płytki z IN718 dostarczyła firm TW Metals z Rzeszowa.

Tabela 6-1 Porównanie składów chemicznych próbek wykonanych z IN718 oraz Rene N5.

	Typ	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu	C	Si/Mn	Fe	Re	W	Ta	Hf
Inco 718	EQ	58	21.5	3.6	9	0.4	0.4	1	0.3	0.1	0.35	5				
Rene N515	SX	63	7				6.2	8					1.5	5	7	0.2

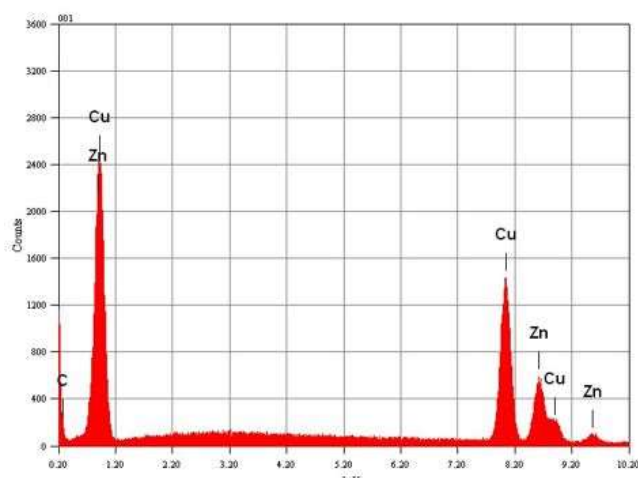
Do walidacji opracowanych przy użyciu płytek ze stopu Inconel 718 parametrów użyto płytek odlanych kierunkowo ze stopu Rene N515. Po odlaniu materiał poddany został obróbce cieplnej, tak aby dokładnie odzwierciedlać materiał z jakiego wykonane są części HPT sinika Catalyst. Odlewy zostały zamówione i wykonane w odlewni Howmet Whitehall, USA, Mi.

Zastosowano elektrody o różnych średnicach od 0.1mm do 1m. Wszystkie wykonane były z mosiądzu. Skład materiały nie jest podawany ani przez producentów ani tym bardziej

pośredników. W Tabeli 6-2 przedstawiono skład chemiczny jednej z użytych elektrod. Aby lepiej zrozumieć wpływ czynników, których za zwyczaj nie poddaje się kontroli w laboratorium wdrożono test składu materiałowego. Jedna elektroda z każdej dostawy badana jest pod kątem składu. Informacja zapisywana jest w bazie danych.

Tabela 6-2 Skład materiałowy elektrody mosiężnej.

Element	keV	Mass%	Error %
Cu	8.04	68.67	1.53
Zn	8.63	31.33	1.96
Total		100	



Rysunek 6-2 Wynik analizy EDS materiału elektrody

W badaniach nad wpływem własności fizykochemicznych materiałów na parametry procesu elektrodrężenia użyto węgiel wolframu (VHM), stal AISI 1045, stop miedzi CuCrZr oraz aluminium AW2017A. Skład chemiczny tych materiałów przedstawiony jest w Tabeli 6-3.

Tabela 6-3 Skład chemiczny materiałów użytych do badań nad wpływem własności fizykochemicznych na proces elektrodrężenia.

	Al	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Re	Si	Ta	Ti	W	Zn
VHM	0.77	-	6.04	0.79	-	0.61	-	-	-	-	-	4.48	-	0.91	-	86.4	-
Inconel 718	0.57		0.1	18.4	0.08	16.81	-	-	3.16	5.37	53.63	-	0.34	-	0.96	0.06	-
AISI 1045	-	0.43	-	0.05	0.07	98.47	-	0.71	<0.01	-	0.04	-	0.03	-	-	-	-
CuCr1Zr	-	-	-	0.6	99.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AW-2017A	91.89	-	-	0.08	4.45	0.72	0.76	0.92	-	-	-	-	0.63	-	0.17	-	0.23

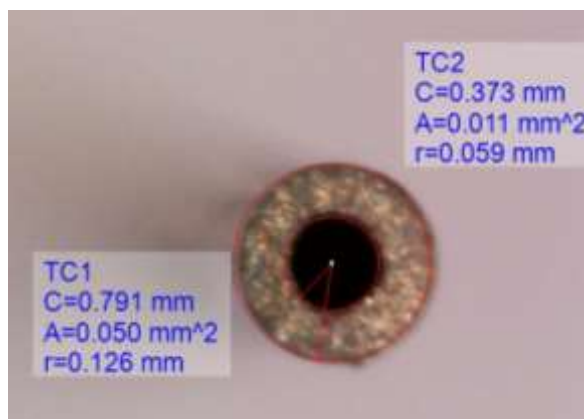
Własności fizykochemiczne podsumowane są w Tabeli 6-4.

Tabela 6-4 Własności termofizyczne materiałów obrabianych oraz elektrody.

Parametr [jednostka]	Materiał obrabiany					Materiał elektrody
	VHM	Inconel 718	AISI 1045	CuCr1Zr	AW-2017A	Mosiądz
Gęstość [g/cm ³]	15.0	8.19	7.82	8.94	2.75	8.55
Temp. topnienia [K]	2,273	1,570	1,793	1,347	913	1,263
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	87.9	11.4	48.1	401	134	159
Ciepło właściwe [J/(kg · K)]	150-350	435	570	385	873	385

6.2. Technologia drążenia otworów okrągłych

Drążenia wykonywane były elektrodami mosiężnymi o średnicach 0.1-1mm. Przeważnie były to elektrody jednokanałowe. Długość elektrod różniła się w zależności od producenta- im większa średnica tym dostępne są elektrody o większej długości- np. dla średnicy 0.7mm długość 600mm natomiast dla średnicy 0.1mm już tylko 250-300 mm. Na Rysunku 6-3 pokazano czoło nowej elektrody 0.25 mm wykonanej z mosiądzu.

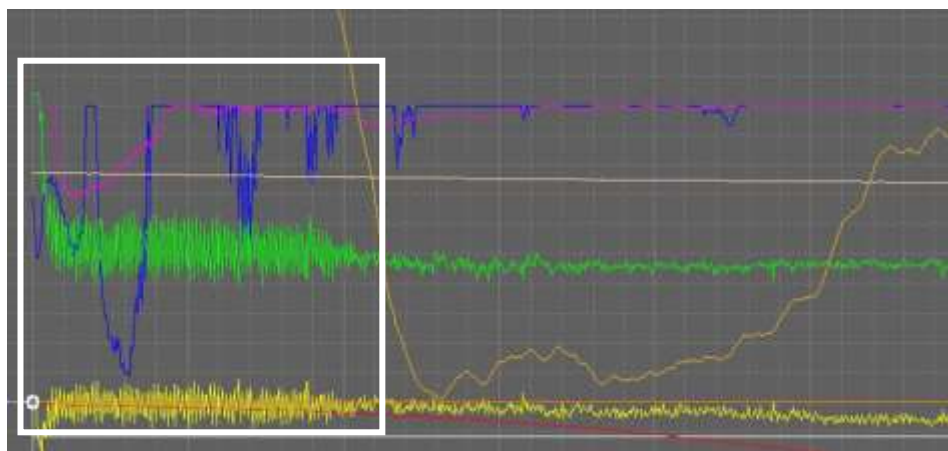


Rysunek 6-3 Widok na czoło elektrody o średnicy zewnętrznej 0.25mm

W pracy opisane zostały wybrane zagadnienia, które są kluczowe dla prawidłowego drążenia jak też wierszowania elektro erozyjnego.

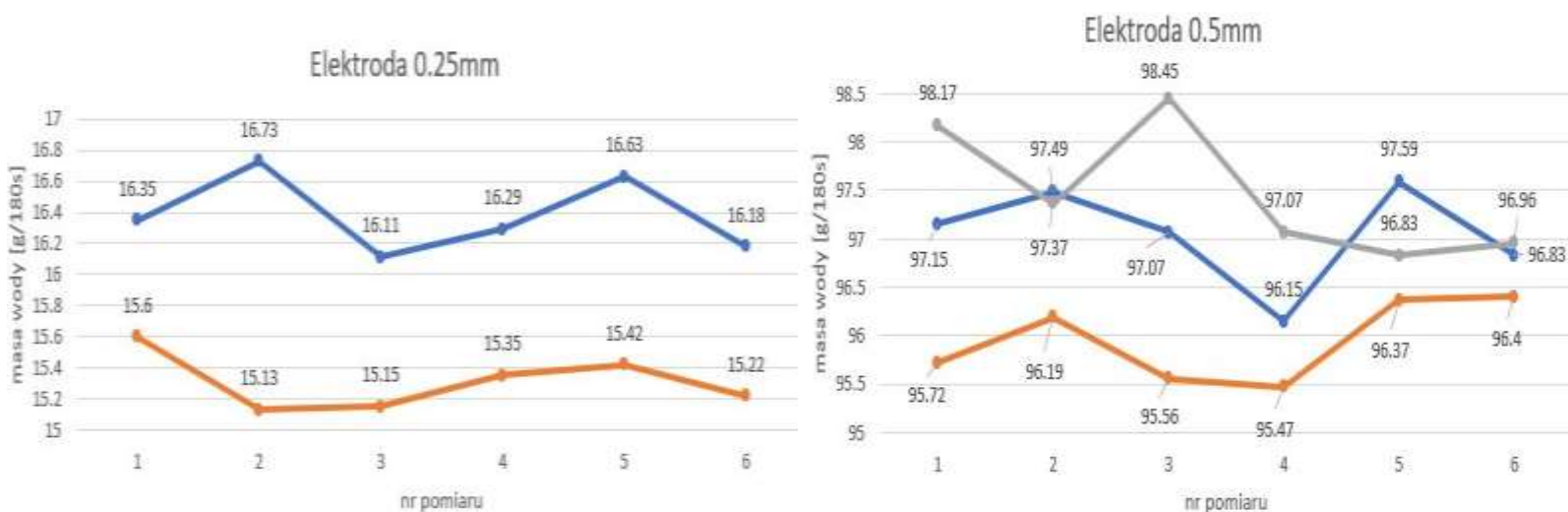
6.3. Płukanie obszaru roboczego

W początkowej fazie realizacji testów zidentyfikowano otwory, których drążenie znacząco odbiegało od pozostałych- praca elektrody nie była stabilna, a czas drążenia widocznie wydłużony. Jednocześnie w trakcie drążenia obserwowano dużą ilość zwarć, które po pewnym czasie samoczynnie ustępowały. Przykład takiego wykresy przedstawiono na Rysunku 6-4.



Rysunek 6-4 Zapis parametrów w procesie drążenia jednego otworu. Białym kwadratem zaznaczony jest obszar niestabilnej pracy elektrody.

Podczas analizy zjawiska zwrócono uwagę na kontrolę przepływu wody przez elektrodę. System wyposażony był w czujnik ciśnienia- jednak już nie w przepływomierz. Jako standardową procedurę wdrożono weryfikację wydatku- po zainstalowaniu elektrody włączano na 30 sekund przepływ po czym ważono pojemnik z wodą. Pomiaru pozwoliły na określenie limitu prawidłowego wydatku. Wyniki pomiarów pokazano na Rysunku 6-5.



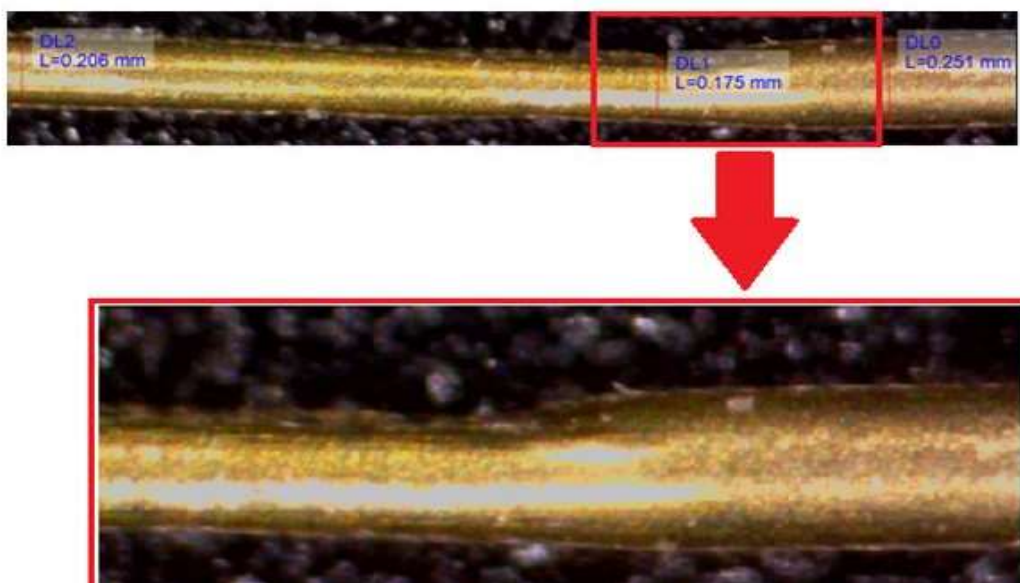
Rysunek 6-5. Pomiary wydatków dla elektrod o średnicach 0.25mm oraz 0.5mm

Na podstawie serii pomiarów oraz analizy niepewności systemu pomiarowego wyznaczono limity minimalnego przepływu. Procedura pozwoliła na wyeliminowanie elektrod o zbyt małym przepływie.

Tabela 6-5 Wstępne limity minimalnego wydatku wody płynącej przez elektrodę.

rozmiar elektrody - stan	masa wody [g/min]
0.25mm - nowa	5
0.3mm - nowa	12
0.4mm - nowa	11
0.5mm nowa	32
0.6mm - nowa	36

Wykonywane rutynowo pomiary wydatku umożliwiły obserwację, iż samo mocowanie elektrod w uchwycie wrzeciona, zwłaszcza o średnicach poniżej 0.3mm może prowadzić do ich uszkodzenia. Zgnieciona elektroda pokazana jest na Rysunku 6-6.



Rysunek 6-6 Widok uszkodzonej elektrody - w wyniku zgniecenia obniżony został wydatek wody płynącej kanałem wewnętrznym.

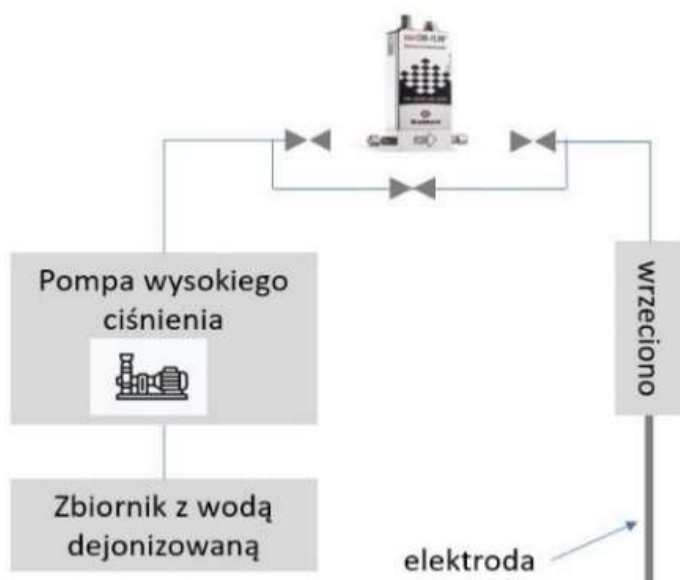
Uszkodzenia wyeliminowano poprzez dodanie w układzie pneumatycznym zacisku regulatora ciśnienia, dzięki temu siła zacisku uchwytu elektrod została odpowiednio obniżona.

Chęć lepszego zrozumienia fizyki zjawiska przepływu dielektryka przez elektrodę skierowała prace w trzech kierunkach:

- do układu hydraulicznego drążarki dodano mikro przepływomierz, który w czasie rzeczywistym dokonywał pomiaru
- przeprowadzono badania struktury wewnętrznej elektrod

-rozpoczęto budowę numerycznego modelu procesu elektroerozyjnego.

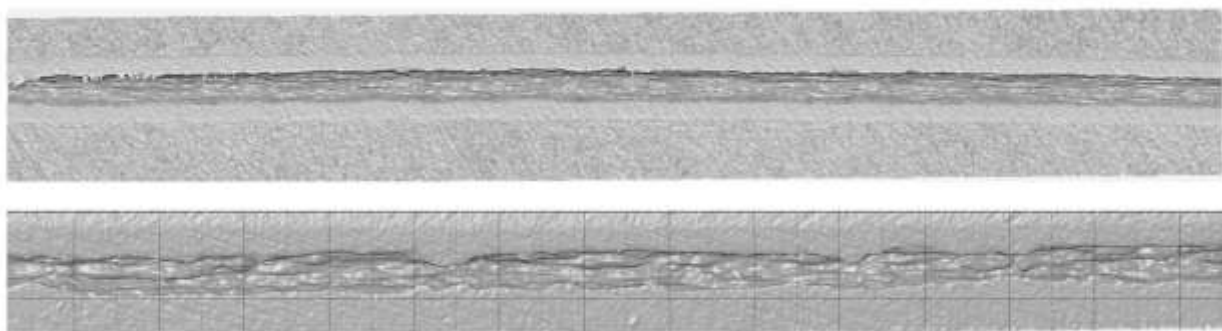
System pomiaru przepływu oparto o mikro przepływomierz MicroCori Flow M-14 firmy Bronkhorst. Jego parametry pomiarowe umożliwiły precyzyjny pomiar w spodziewanym zakresie przepływów dla elektrod o małych średnicach.



Rysunek 6-7 Schemat podłączenia mikro przepływomierza.

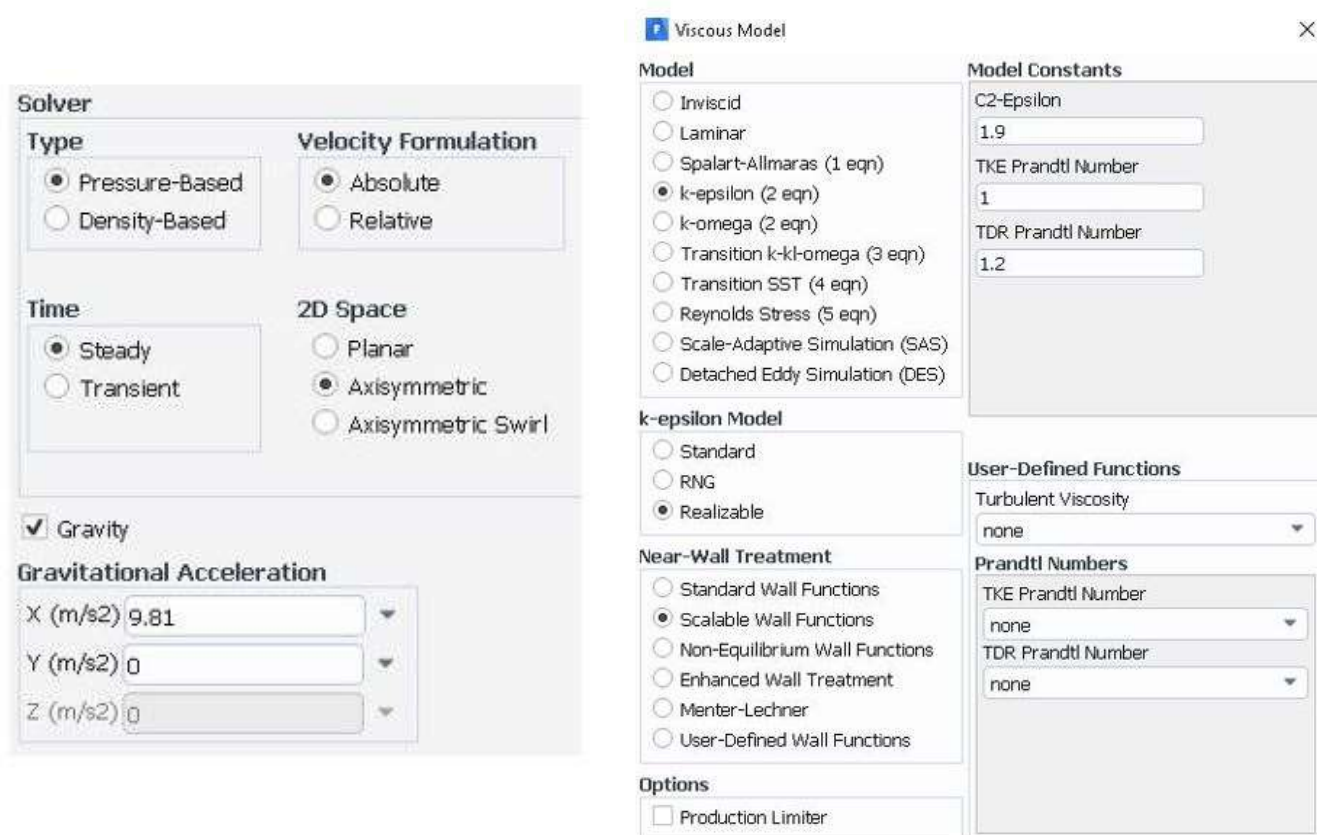
Przepływomierz M-14 umożliwia pomiar wydatku płynu przy ciśnieniu do 200 bar. Szeroki zakres pomiarowy: od 30 do 30 000 g/h z błędem mniejszym od 0.2% pomiaru umożliwia bardzo dokładną analizę przepływu. W przypadku użycia elektrod o większych średnic dla których przepływ przekracza zakres pomiarowy, przepływomierz jest odcinany a woda podawana jest obejściem pokazanym na Rysunku 6-7. Pozyskane dane mogą być użyte w przyszłości do prac nad poprawą niektórych elementów procesu drążenia elektroerozyjnego. Mikro przepływomierz został w pełni zintegrowany ze sterowaniem PLC drążarki.

Analiza geometrii wewnętrznej wadliwych elektrod była zaskoczeniem dla zespołu. Wewnętrzny kanał okazał się niezwykle nieregularny. Na przekroju widoczne były znaczne przewężenia.



Rysunek 6-8 Widok górny- wewnętrzny kanał elektrody 0.3mm o prawidłowym przepływie, widok dolny- elektroda wadliwa o małym przepływie.

Porównanie kształtu kanału wewnętrznego elektrody dobrej oraz wadliwej pokazano na Rysunku 6-8. Struktura wewnętrzna elektrody o małym przepływnie nie daje możliwości na wykonanie prawidłowego drążenia co spowodowane jest zbytnią nieregularnością kanału. Taka geometria dławi przepływ dielektryka. Instalacja przepływomierza pozwoliła całkowicie wyeliminować uszkodzone elektrody z procesu, a przez to usunąć jedna niekontrolowaną.



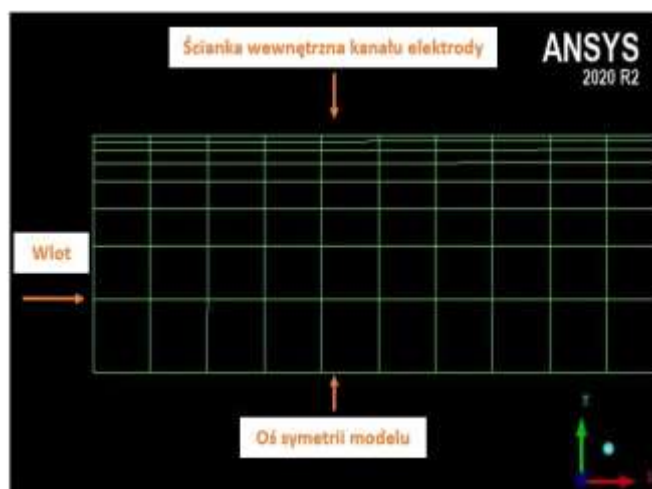
Rysunek 6-9 Ustawienia solwera (o prawej) i modelu lepkości (po lewej) użytych w modelu elektrody swobodnej.

Trzecim podjętym działaniem było zamodelowanie procesu elektroerozyjnego metodą objętości skończonych. Model wykonywano w programie Ansys Fluent. Analizy rozpoczęto od prostego modelu stopniowo podnosząc jego skomplikowanie. Na wstępie zamodelowano elektrodę swobodną o wymiarach geometrycznych odpowiadających nowej elektrodzie. Zastosowano wyłącznie ciśnieniowe warunki brzegowe. Celem tego etapu było takie dobranie parametrów elementów symulujących chropowatość, aby uzyskać zgodność z pomiarami. Wszystkie następne modele wykonywano dla takich samych ustawień solwera i modelu lepkości jak pokazano na Rysunku 6-9.

Uzyskano zgodność wyników analiz z rzeczywistymi pomiarami dla modeli poprawnych elektrod o średnicach 0.5mm, 0.4mm oraz 0.3mm. Nie udało się dopasować modelu tak aby uzyskać przepływ identyczny jak dla elektrody wadliwej. Użyto następujących warunków brzegowych:

- wlot- ciśnienie odpowiadające ciśnieniu używanemu podczas drążeń
- wylot- ciśnienie atmosferyczne
- model symetryczny

Szczegóły modelu oraz uzyskane wyniki przedstawione są na Rysunku 6-10.

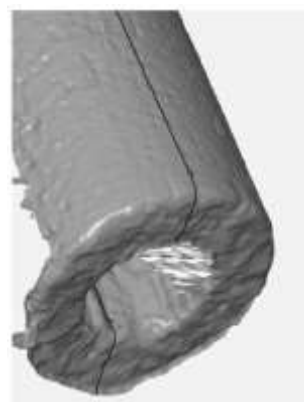


EL 0.5				
Roughness setup for model compatibility in Ansys Fluent:	K _s [m]	C _s [-]	Radius [m]	Relative error of mass flow
	1.055E-05	0.5	1.10E-04	0%
EL 0.4				
Roughness setup for model compatibility in Ansys Fluent:	K _s [m]	C _s [-]	Radius [m]	Relative error of mass flow
	8.55E-06	0.5	6.63E-05	0%
EL 0.3 HIGH FLOW				
Roughness setup for model compatibility in Ansys Fluent:	K _s [m]	C _s [-]	Radius [m]	Relative error of mass flow
	5.45E-06	0.5	7.23E-05	0%
EL 0.3 LOW FLOW				
Roughness setup for model compatibility in Ansys Fluent:	K _s [m]	C _s [-]	Radius [m]	Relative error of mass flow
	0.00E+00	0.5	4.89E-05	0.385%

gdzie K_s – teoretyczna wysokość chropowatości, C_s – stała chropowatości

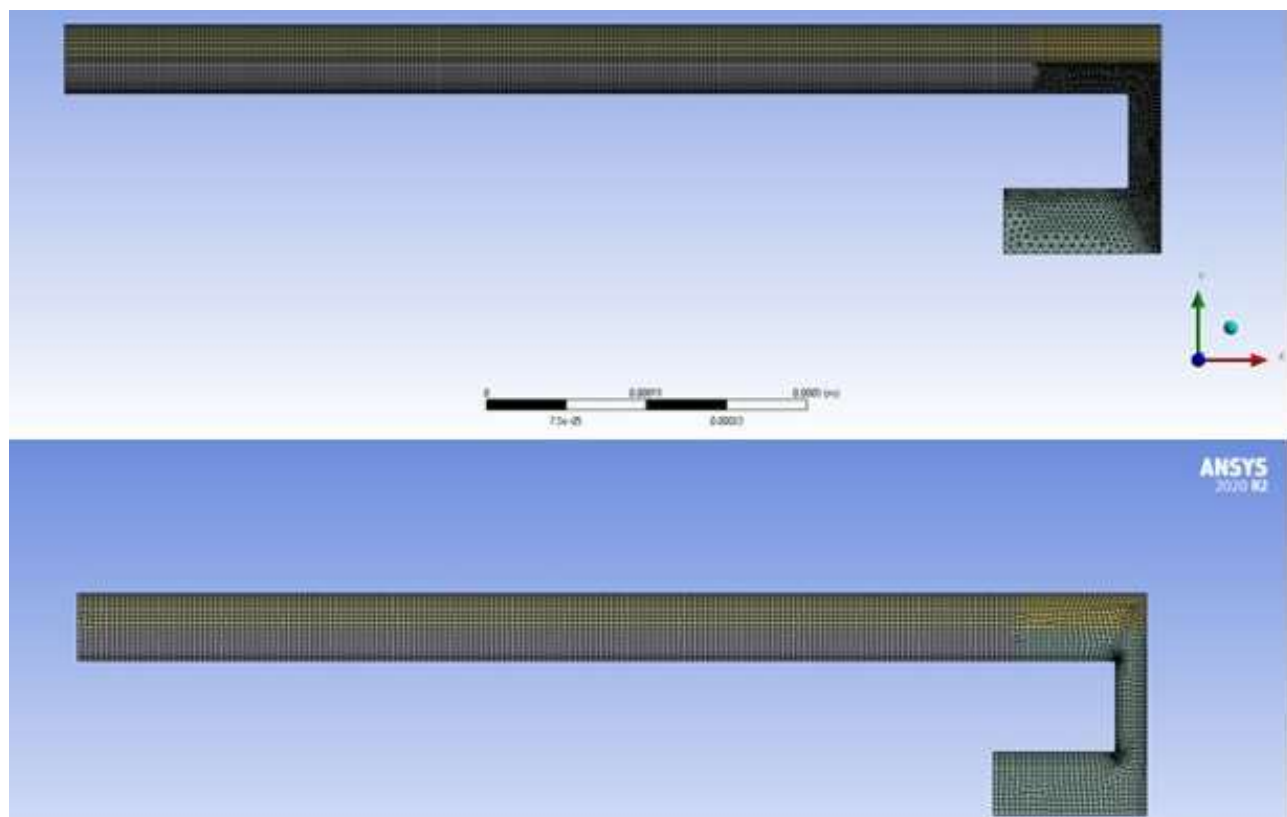
Rysunek 6-10 a) widok siatki oraz warunków brzegowych b) zgodność modeli z pomiarami

Zamodelowano przepływ w elektrodzie o długości 400mm i średnicy zewnętrznej 0.3mm. Wewnętrzna średnica wynosi (dla tego producenta) 0.1mm. Pomiar średnicy oraz skan wierzchołka nowej elektrody pokazane są na Rysunku 6-11.



Rysunek 6-11 Skan średnicy wewnętrznej elektrody oraz jej wierzchołka.

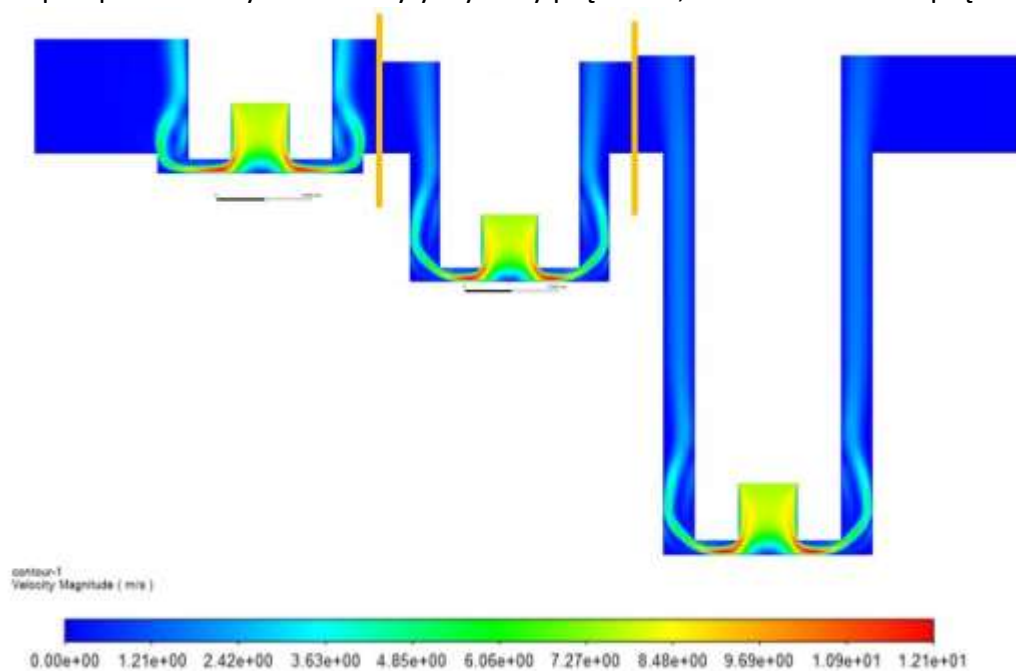
Doświadczenia zdobyte przy realizacji modelu elektrody swobodnej pozwoliły na dalszy rozwój symulacji. Kolejnym etapem była symulacja zagłębiania się elektrody w obrabiany materiał. Jako wynik prac na tym etapie założono wizualizację rozkładu prędkości płynu oraz weryfikację czy takie parametry jak prędkości obrotowa elektrody oraz chropowatości ścianek otworu i elektrody wpływają na rozkład prędkości.



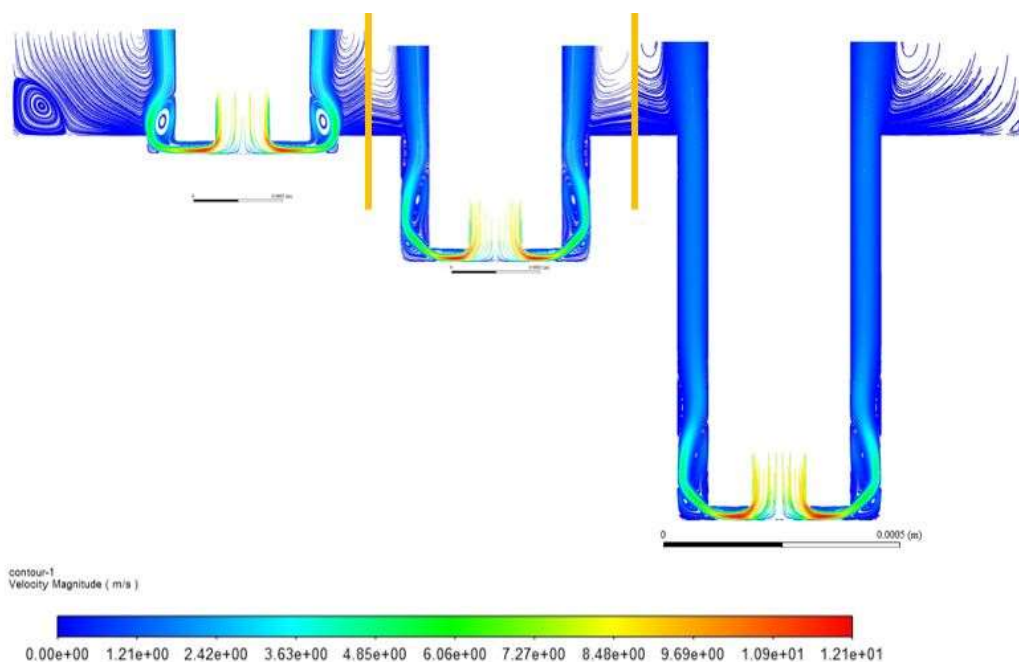
Rysunek 6-12 Siatki użyte do modelowania przepływu w szczelnie: górny rysunek- siatka hybrydowa, dolny- siatka standardowa.

Podobnie jak w przypadku analizy elektrody swobodnej model zakładał osiową symetrię zagadnienia z ciśnieniowymi warunkami brzegowymi. Szczeliny: wierzchołkową i boczną zamodelowano na podstawie pomiarów rzeczywistych otworów. Założono nominalną geometrię elektrody. Sprawdzeniu poddano jakość siatki oraz wpływ siatki - przy zbyt małej gęstości lub zbyt zdeformowanych elementach wyniki mogą nie być miarodajne. Typ siatki objętości skończonych nie miał wpływu na wyniki. Przedstawia użyte siatki.

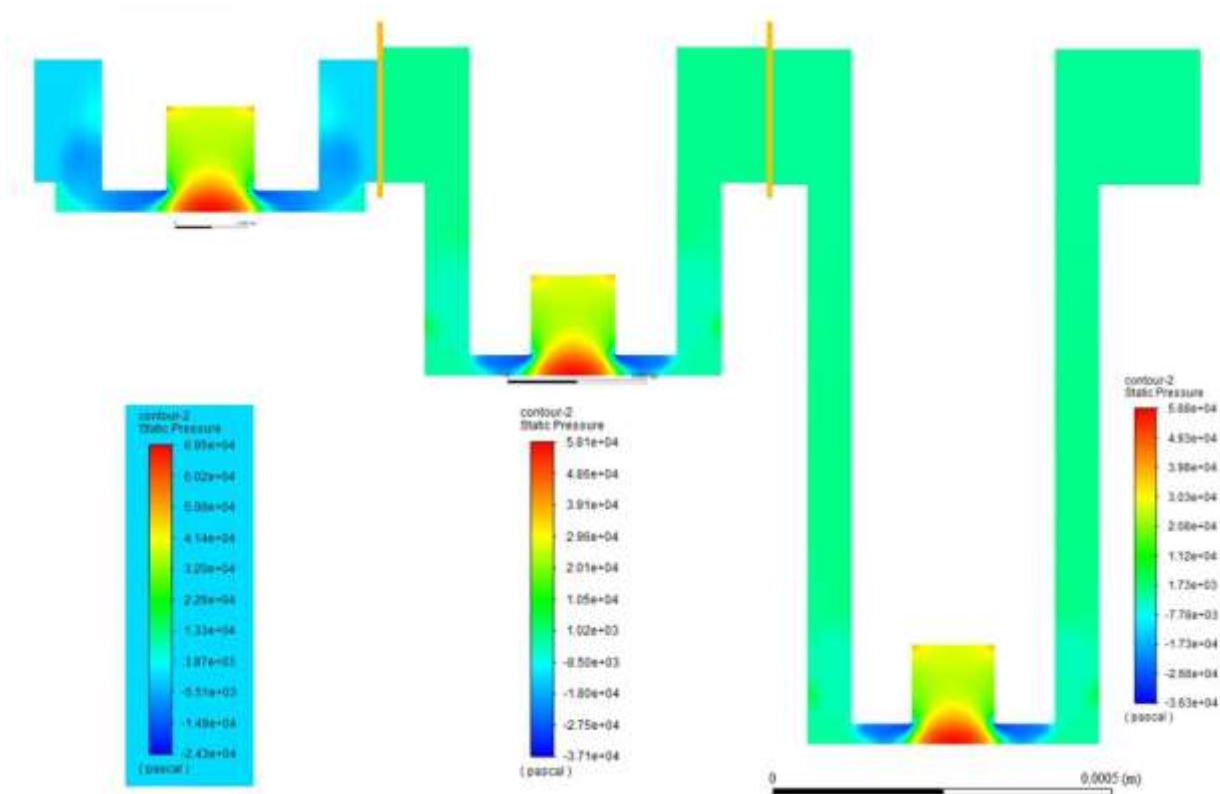
Wynikiem przeprowadzonych analiz były wykresy prędkości, ciśnienia oraz linii prądu.



Rysunek 6-13 Rozkład prędkości płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.

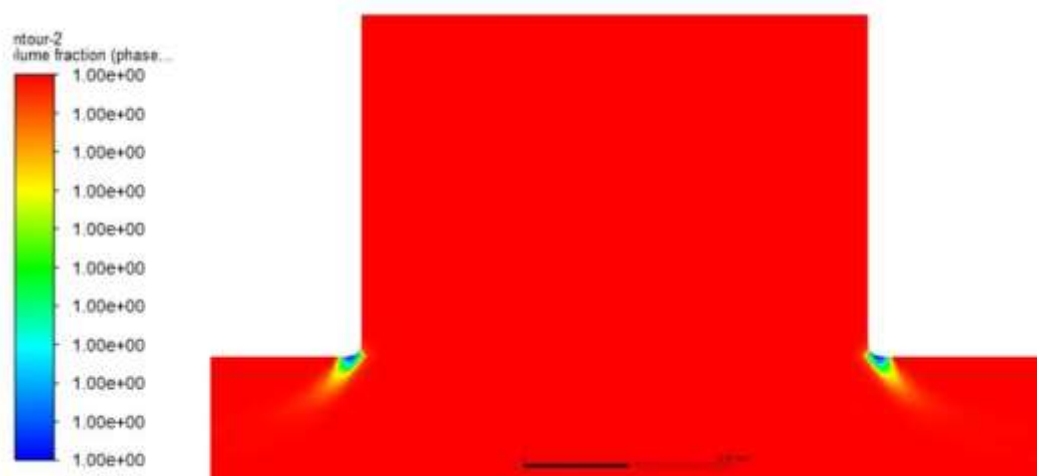


Rysunek 6-14 Rozkład prędkości płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.



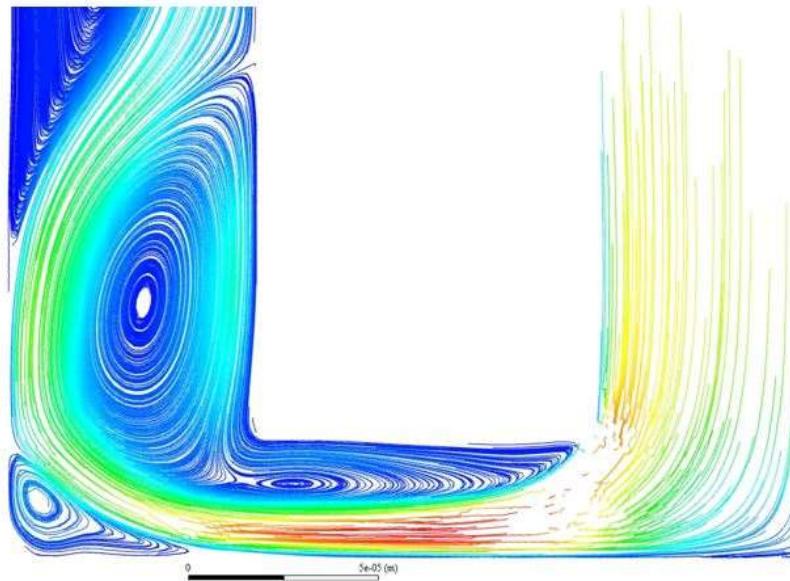
Rysunek 6-15 Rozkład ciśnienia statycznego płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.

Niezależnie od zagłębienia elektrody w materiał tuż po opuszczeniu elektrody płyn przyspiesza z około $6 \frac{m}{s}$ do $12 \frac{m}{s}$. Powoduje to spadek ciśnienia pod ściankami elektrody, natomiast w punkcie centralnym, ciśnienie wzrasta. Po głębszej analizie modelu zauważono pojawienie się kawitacji na krawędziach wewnętrznych elektrody.



Rysunek 6-16 Widok zmiany fazowej w wewnętrznym narożu elektrody. Zmiana fazy- odparowanie płynu wynika z obniżonego ciśnienia, które w konsekwencji powoduje kawitację.

Biorąc pod uwagę wpływ ilości cząstek będących efektem procesu elektro erozyjnego warto się także przyjrzeć liniom prądu szczególnie w obszarze wierzchołka elektrody.



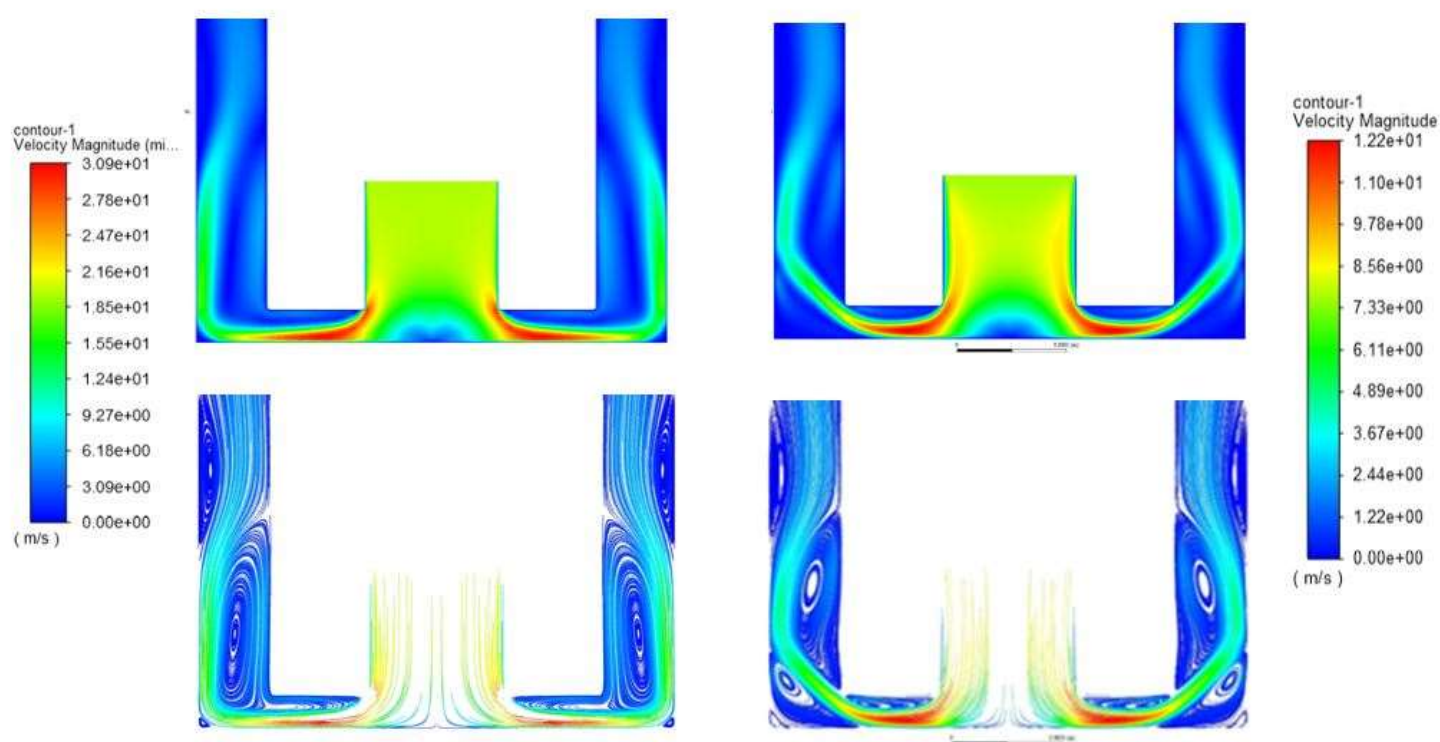
Rysunek 6-17 Linie prądu w okolicy wierzchołka elektrody.

Dla nowej geometrii elektrody w obszarze zewnętrznego naroża elektrody oraz w narożu otworu pojawiają się trzy silne obszary wirowe.

Kolejną modyfikacją modelu było uwzględnienie stanu powierzchni. Chropowatość zmierzono oddzielnie dla:

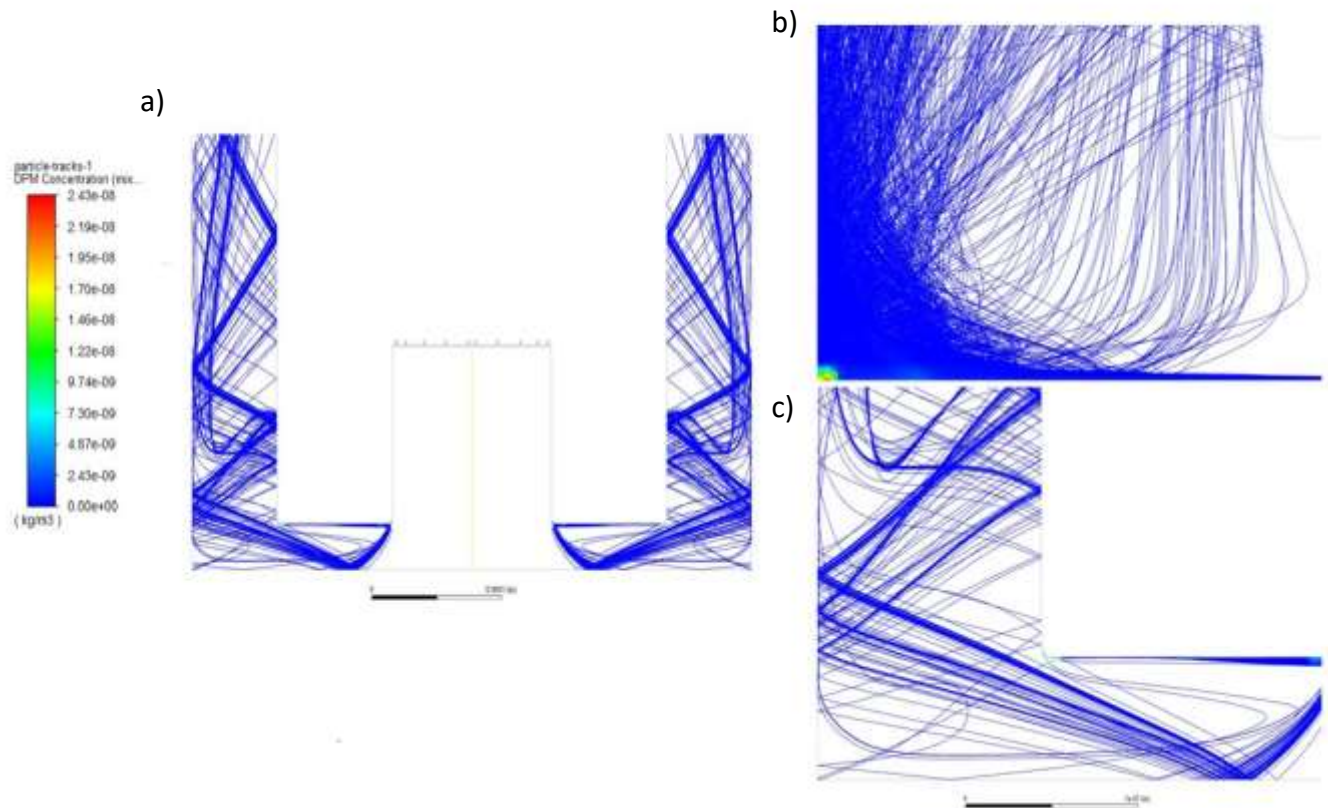
- ścianek wewnętrznych elektrody: $R_a = 1.69 \times 10^{-6} \text{ mm}$
- ścianek zewnętrznych elektrody: $R_a = 9.45 \times 10^{-8} \text{ mm}$
- ścianek przedmiotu obrabianego: $R_a = 3.28 \times 10^{-6} \text{ mm}$

Dla każdej z wymienionych powierzchni obliczono K_s - numeryczny współczynnik chropowatości.



Rysunek 6-18 Porównanie przepływów: a) model uwzględniający chropowatość, b) model z powierzchniami gładkimi.

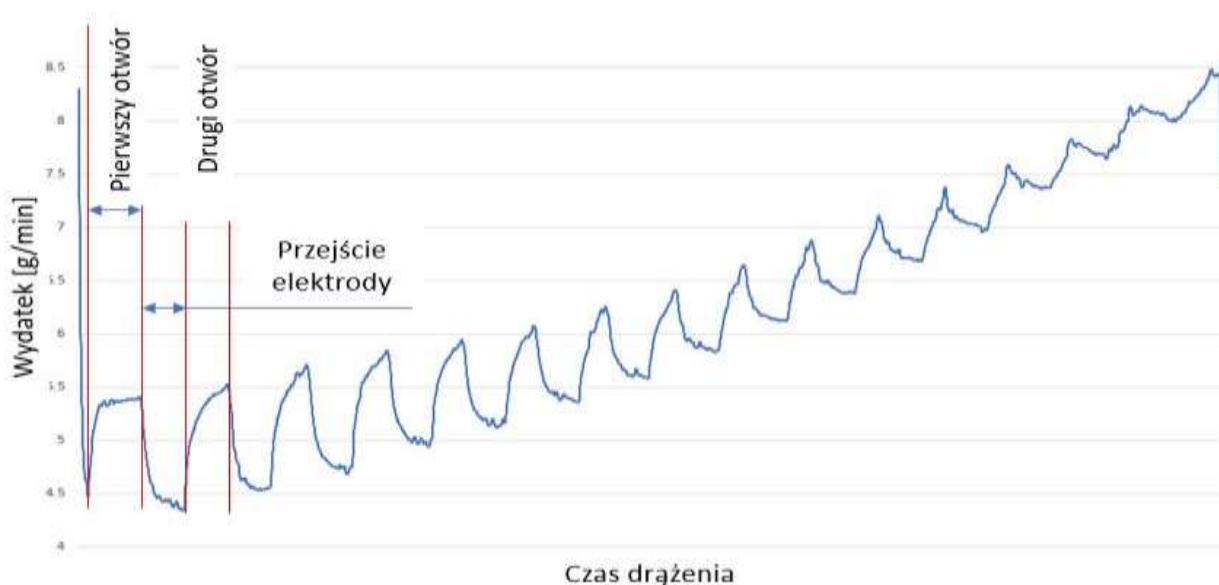
Dodatkowe tarcie wywołane oporami na ścianach spowodowało z jednej strony „przyklejenie” głównego przepływu do ścianki z drugiej znaczne przyspieszenie płynu. Dla modelu bez chropowatości maksymalna prędkość wynosiła $12 \frac{m}{s}$ podczas gdy w modelu uwzględniającym tarcie jest to $30 \frac{m}{s}$. Jednocześnie powiększył się wir usytuowany w pionowym kanale tuż za krawędzią elektrody. Na koniec model uzupełniono o symulację cząstek stałych, będących odpowiednikiem materiału usuwanego w trakcie obróbki. Za źródło cząstek przyjęto dolną powierzchnię elektrody.



Rysunek 6-19 Linie przemieszczania się drobin fazy stałej. Na grafikach b i c widoczne punkty koncentracji.

Analiza przepływu z zawartością drobin, które symulują materiał wyerodowany podczas obróbki elektroerozyjnej pokazuje, iż w obszarze wokół wierzchołka elektrody znajduje się kilka miejsc koncentracji. Jednym z nich jest zewnętrzne naroże elektrody, gdzie znajduje się obszar stagnacji otoczony jest przez dwa wiry. Cząstki wyrzucane są na ściankę otworu od której odbijają się podążając ku wylotowi otworu. Drugim, silnym miejscem stagnacji drobin jest naroże otworu. Rejony, w których dochodzi do zatrzymania drobin odznaczają się większą przewodności elektryczną, co z kolei prowadzi do zwiększonej lokalnie erozji oraz niestabilnej pracy.

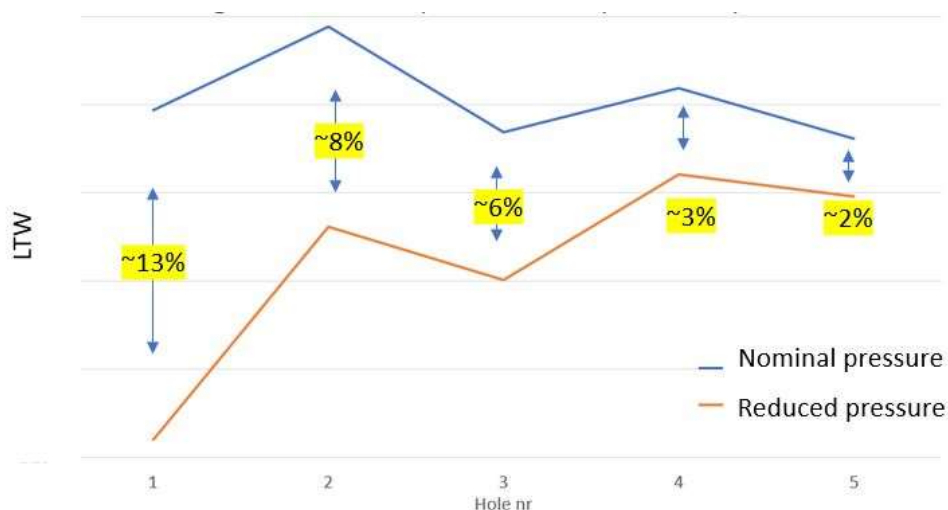
Rozbudowa drążarki o mikro przepływomierz pozwoliła na ścisłą kontrolę przepływu. Umożliwiła także jego dokładną analizę. Dla elektrod o małych średnicach zauważano zmienność przepływu zgodną ze schematem omawianym w literaturze. Wraz ze skracaniem elektrody wzrasta wydatek przepływający przez nią. Taki charakter zjawiska jest logiczny z punktu mechaniki płynów. Krótszy kanał jakim jest elektroda zużyta straty będą mniejsze a wydatek wyższy. Jednak pomiary dla elektrody o średnicy 0.25mm odbiegały w pewnym zakresie od tego trendu.



Rysunek 6-20 Wydatek wody płynącej wewnętrznym kanałem elektrody o średnicy zewnętrznej 0.25mm w procesie drążenia.

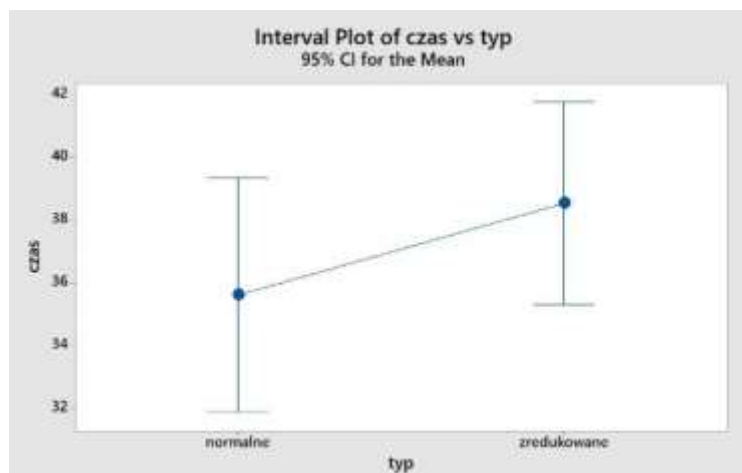
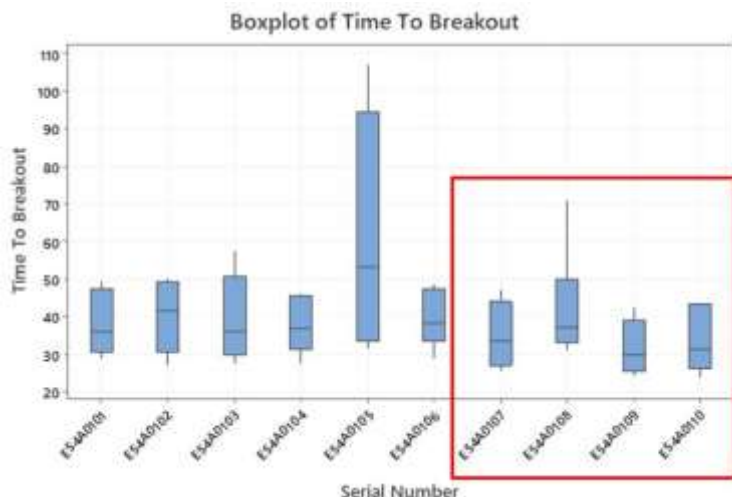
Po rozpoczęciu drążenia elektrodą o średnicy zewnętrznej 0.25 mm wydatek wzrasta o prawie 20%. Zjawisko to pokazane jest na Rysunku 6-25. Po zakończeniu drążenia wydatek spada pomimo działającej pompy wysokiego ciśnienia. Przedstawiony wykres odpowiada jednocześnie opisanemu w literaturze trendowi: wraz ze skracaniem elektrody wzrasta średni wydatek wody przepływającej elektrodą. Jednak przyczyna chwilowego zwiększenia przepływu pozostaje niejasna. Nie wspomina o niej żaden artykuł, a ponieważ nie wpływa to negatywnie na proces- fenomen ten nie był poddany dalszym analizom.

Przeprowadzono także test drążeń przy obniżonym ciśnieniu. Wartość ciśnienia obniżono o ~20% co przełożyło się na zmianę średniego wydatku z 5.9 g/min 4.8 g/min. Obniżony przepływ miał widoczny wpływ na zużycie elektrody (LTW) co pokazano na Rysunku 6-21.



Rysunek 6-21 Wpływ zredukowanego ciśnienia na zużycie elektrody 0.25mm w procesie drążenia.

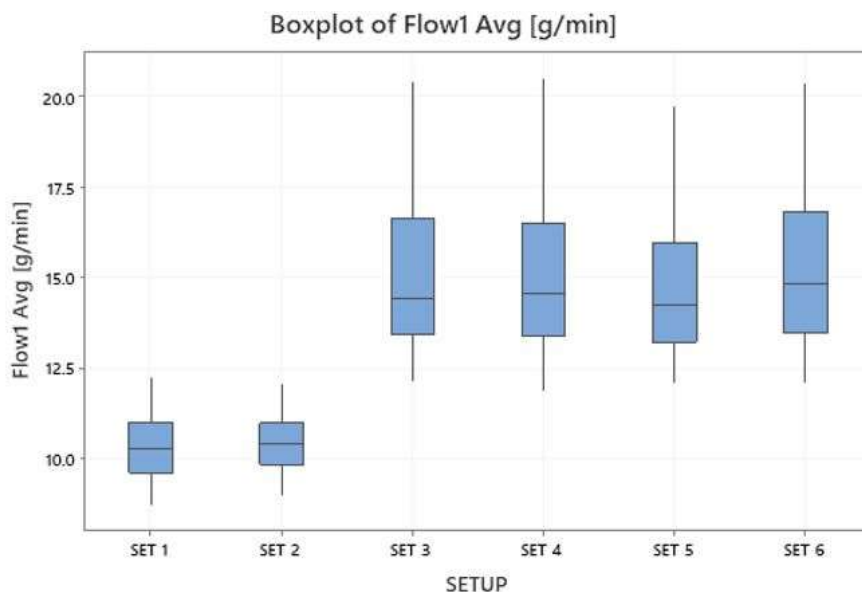
Jednocześnie nie stwierdzono znaczącego wpływu zmniejszenia wydatku na długość czasu drążenia. Widać to zarówno na wykresie pokazanym na Rysunku 6-22.



Rysunek 6-22 Od lewej: wyniki czasu drążenia dla kolejnych próbek (próbka E54A0105 nie jest brana pod uwagę), analiza statystyczna średnich populacji dla drążenia normalnego oraz zredukowanego, porównanie graficzne.

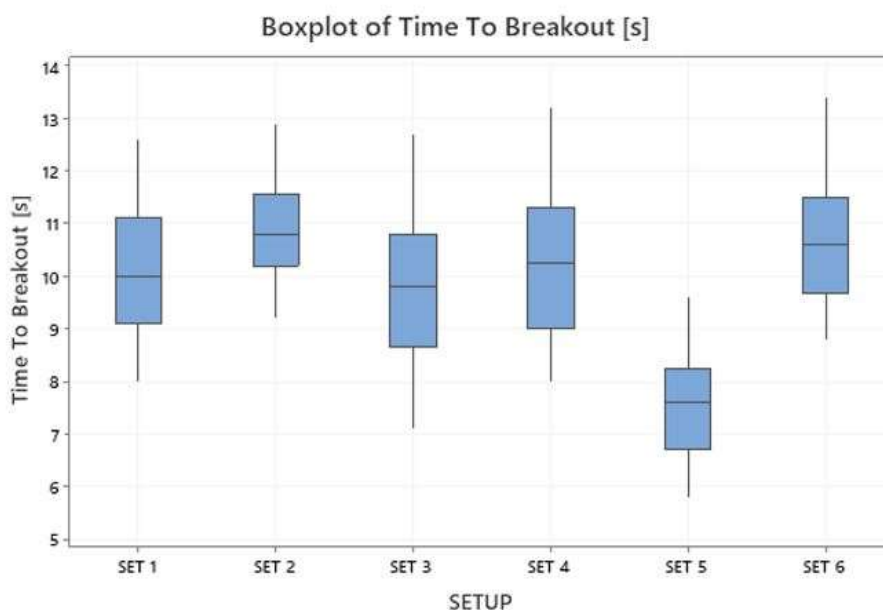
Również analiza statystyczna średnich pokazała, że populacje nie różnią się między sobą.

Podobne wnioski wyciągnięto z analizy wyników testu, w którym użyto elektrody pochodzące z dwóch różnych źródeł.



Rysunek 6-23 Porównanie wydatków płynących przez elektrody z różnych źródeł: zestaw 1 i 2- dostawca A. zestaw 3-6 dostawca B.

Porównanie rozkładów wydatku dla grup 1-6 przedstawionych na Rysunku 6-23 jednoznacznie pokazuje, iż grupy 1 i 2 oraz 4-6 reprezentują elektrody o innych parametrach przepływowych.



Rysunek 6-24 Czasu drążeń (przy tych samych parametrach) - nie jest widoczna różnica pomiędzy grupami 1 i 2 (dostawca A) a 3-6 (dostawca B).

Podobnie jak we wcześniej omawianym przypadku, gdzie obniżony wydatek wody wynikał ze zmniejszenia ciśnienia, także różnice w wydatkach pomiędzy producentami elektrod nie powodują negatywnego wpływu na czas drążenia co przedstawiono na Rysunku 6-24. Różnice w elektrodach pochodzących z różnych źródeł omówione są szczegółowo w dedykowanym podrozdziale.

6.4. Wpływ posuwu elektrody na stabilność procesu drążenia.

Wykorzystywane do opracowania technologii urządzenie wymagało wprowadzenia dla każdego otworu „recepty” zawierającej pełną definicję procesu elektrodrążenia. Obejmuje ona takie parametry jak napięcie, natężenie, czas pracy, czas płukania, ale także posuw elektrody. Posuw rekompensuje zużycie elektrody. Jest to element charakterystyczny dla technologii wykorzystującej elektrody o małych średnicach. Nie występuje w tej postaci ani w cięciu elektroerozyjnym, gdzie posuw elektrody oznacza prędkość przesuwania drutu, ani w obrabiarkach wgłębnych, gdzie elektroda nie ulega szybkiemu zużyciu. Jednocześnie, sterowanie PLC drążarki ma możliwość w momencie drążenia zwiększenia posuwu chwilowego tak aby utrzymane było zadane napięcie wierzchołkowe. Konieczność doboru posuwu jest element unikalny dla użytej do badań drążarki. Komercyjnie dostępne urządzenia mają zaprogramowaną pełną logikę pracy- w tym posuw. Dlatego też w pracach naukowych nie pojawia się temat doboru czy optymalizacji posuwu elektrody.

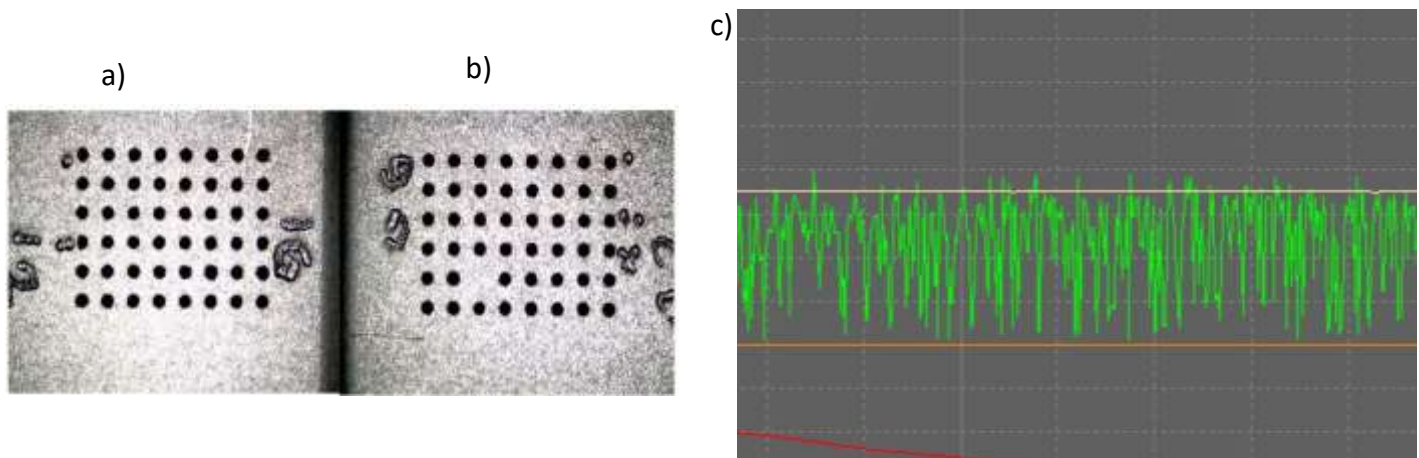
Posuw (F) okazał się, obok napięcia (U), natężenia (I) i parametrów czasowych cyklu (T_{on} , T_{off})- jednym z głównych parametrów wpływających zarówno na stabilność pracy jak i na sprawność działania mechanizmu wykrywającego przebicie.

Początkowo przeprowadzono analizy wykorzystujące pełen zakres parametrów- nie użyto planu eksperymentu planowanego. Jego skuteczne użycie wymaga znajomości obszaru, w którym proces odpowiada stabilnie. Test przeprowadzono dla następujących parametrów:

- elektroda mosiężna o średnicy 0.3 mm
- obciążenie cyklu 50%
- napięcie wierzchołkowe 40V
- natężenie wierzchołkowe 5/10/15 A
- posuw elektrody zmienny w zakresie 1-3 z krokiem 0.2

Drażenia wykonano w płytce testowej wykonanej ze stopu Inconel 718.

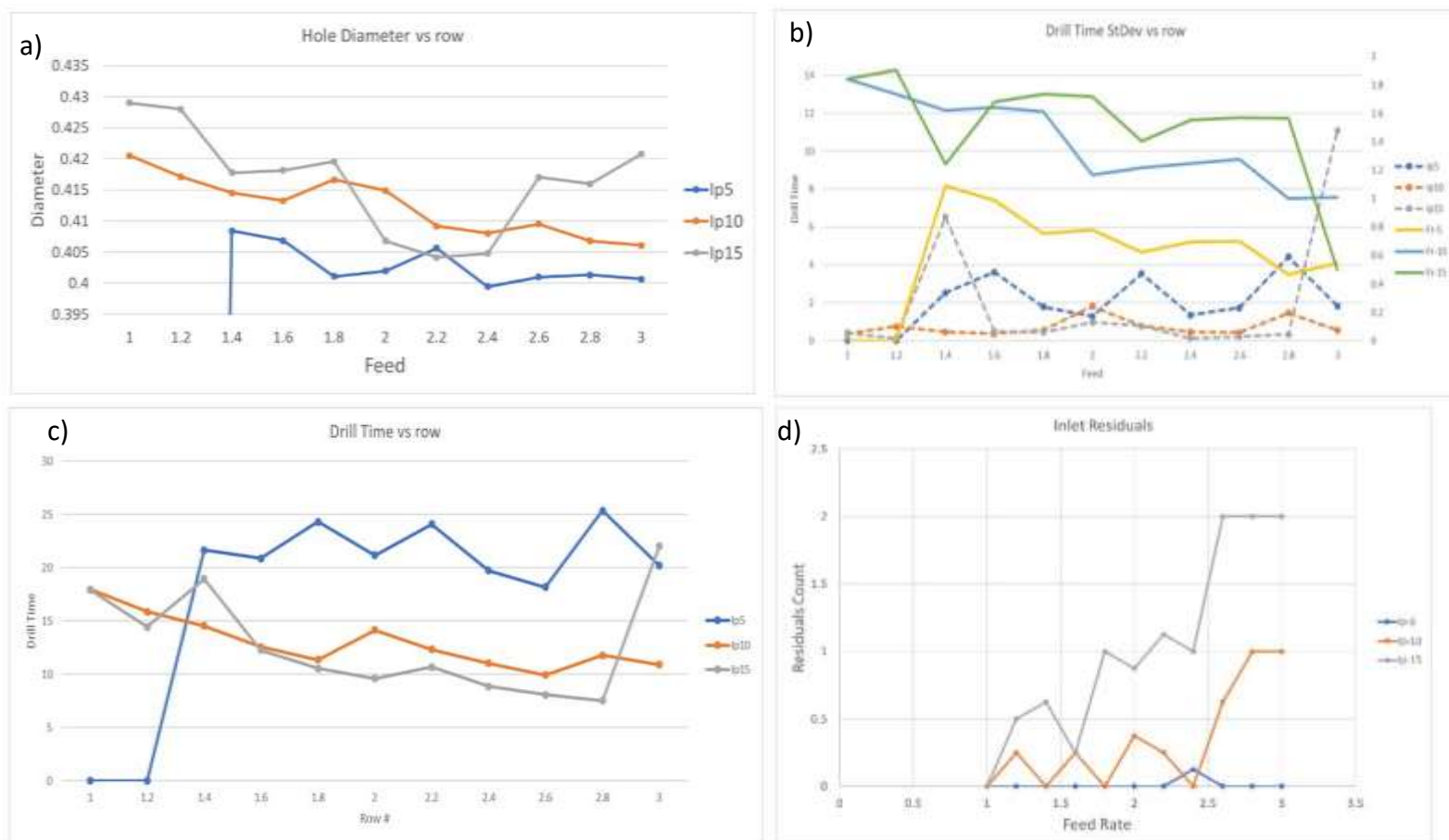
Przeprowadzona analiza wyników pokazała, iż bez względu na posuw dla natężenia 5 amper proces wykazuje niestabilność.



Rysunek 6-25 Widok płytki testowej- wejścia- a), wyjścia- b) oraz c) wykres napięcia dla jednego z otworów.

Duża liczna zwarć widoczna na Rysunku 6-25-c skutkuje niestabilną pracą elektrody co, obok najmniejszej energii wyładowania wykorzystanej w tym badaniu, negatywnie przekłada się na czas drążenia.

Wyniki pokazane na Rysunku 6-26-a-...-d potwierdzają wpływ posuwu na analizowane parametry: średnicę otworu, czas drążenia, stabilność pracy (krzywa napięcia pokazana na Rysunku 6-25-c oraz wartość odchylenia standardowego dla czasu drążenia). Zauważono także wpływ posuwu na ilość i wielkość nabudowanego wtórnie materiału dookoła wlotu otworu co widać na Rysunku 6-26-c.



Rysunek 6-26 a) Wpływ posuwu na średnicę wykonanych otworów, b) odchylenie standardowe czasu drążenia dla różnych posuwów i natężeń prądu, c) średni czas drążenia, d) ilość materiały osadzonego na wlocie otworu

Postawiono sobie pytanie o sposób oceny poprawnego posuwu. Pierwszą propozycją był tzw. współczynnik posuwu- Fr. Współczynnik oblicza się ze wzoru:

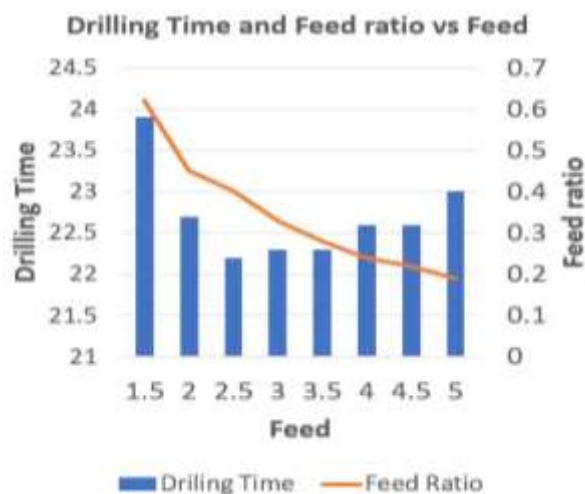
$$Fr = \frac{F_{calc}}{F_{set}}$$

Gdzie

$$F_{calc} = \frac{\text{głębokość otworu}}{\text{czas drążenia}}$$

F_{set} – posuw zaprogramowany w recepcie drążenia

Za wyznaczeniem tej metryki stało założenie, iż przy optymalnym nastawionym posuwie, posuw wyliczony (F_{calc}) będzie stanowił 0.7—0.8 jego wartości. Złożoność zagadnienia pokazała niestety, iż takie założenie było błędne.

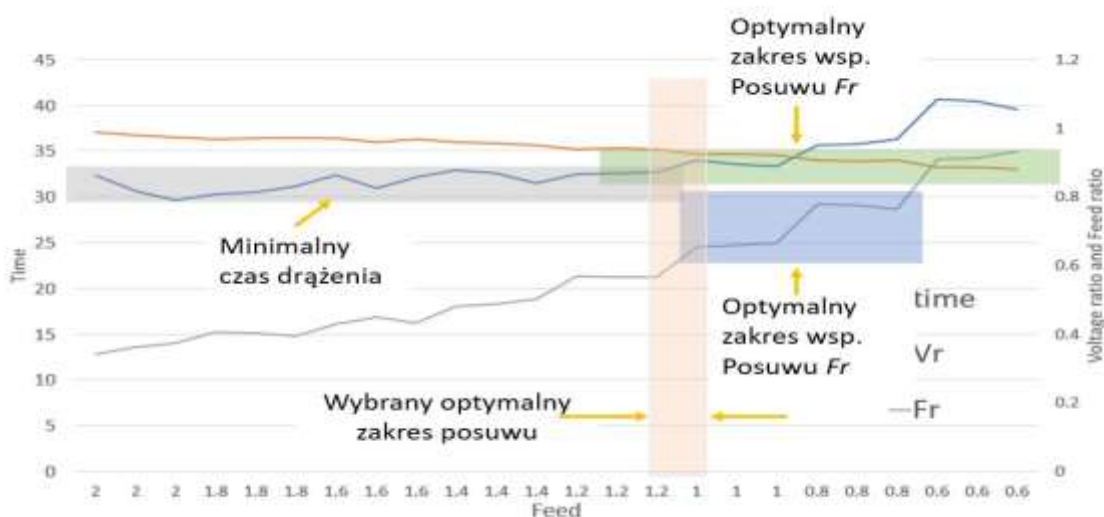


Rysunek 6-27 Porównanie Fr (Feed Ratio) ze średnim czasem drążenia dla zadanego posuwu ($Feed$).

Negatywna weryfikacja poprawności przyjętego założenia wymusiła poszukiwania nowej metryki. Zgodnie z fizyką zjawiska elektroerozji niestabilna praca skutkuje z jednej strony zwarciami z drugiej wysokim napięciem średnim procesu wynikającym ze „zrywania” szczeliny – co z kolei wymusza pojawienie się impulsów inicjujących które z definicji mają stałe wysokie napięcie impulsu. W przypadku używanej drążarki napięcie inicjujące (U_i) wynosi 100V. Przyjęto zatem założenie, iż w optymalnym procesie średnie napięcie U_{avg} powinno mieć wartość zbliżoną do napięcia nastawionego, tzw. napięcia roboczego- U_w . Współczynnik V_r opisuje wzór:

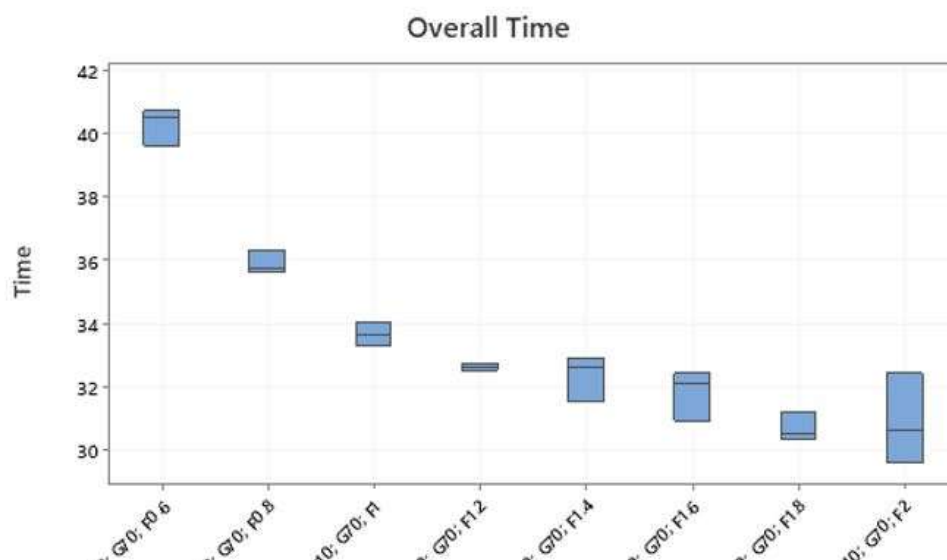
$$V_r = \frac{U_w}{U_{avg}}$$

Przyjęto, iż właściwym przedziałem wartości V_r dla poprawnego procesu będą wartości w przedziale 0.9-0.95. Niestety również ten współczynnik okazał się niejednoznaczny.



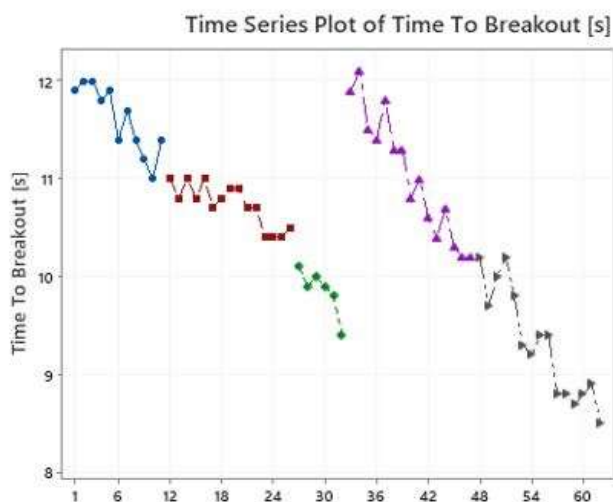
Rysunek 6-28 Metryki posuwu naniesione na wyniki drążeń dla zakresu posuwu 0.6-2 in/min.

Z pokazanych graficznie metryk najlepsze wyniki dał dobór najkrótszego czasu drążenia. Miało to odzwierciedlenie zarówno w stabilności tzw. krzywych drążenia (przebiegi napięcia, natężenia, położenia wrzeciona) jak i w wykrywalności przebicia. Zbyt niski posuw uniemożliwiał poprawną pracę mechanizmu wykrywającego przebicie. Dodatkowo, zaczęto obserwować rozrzut czasu drążenia.

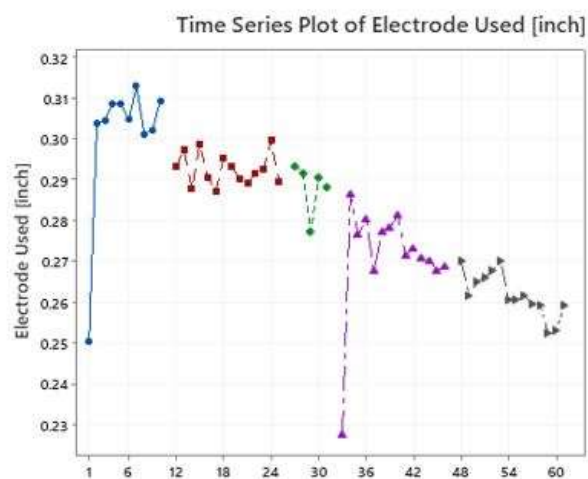


Rysunek 6-29 Zmiana czasu drążenia dla różnych prędkości posuwu wrzeciona.

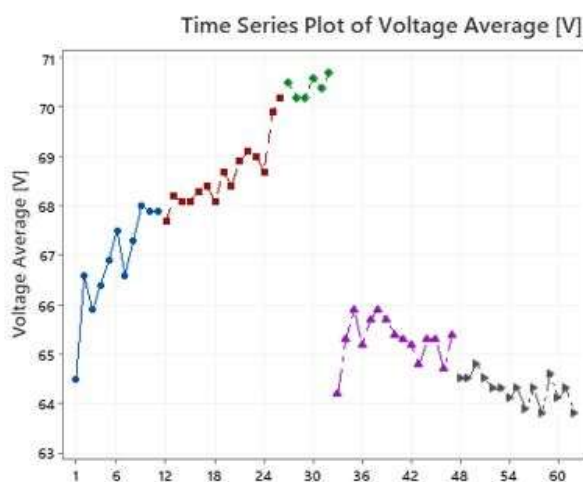
Wyżej opisane prace w obszarze doboru posuwu prowadzone były dla elektrod o średnicy 0.4mm. Po przystąpieniu do testów z elektrodami o mniejszych średnicach zauważono znaczny rozrzut czasu drążenia który zmniejszał się w miarę skracania się elektrody. Po serii testów wdrożono do aplikacji GCode możliwość drążenia ze zmiennym posuwem, którego wartość jest funkcją długości elektrody.



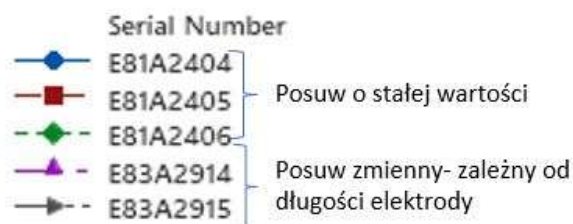
Variable	FEED	N	Mean	StDev
Time To Breakout [s]	CONSTANT	32	10.869	0.688
	VARIOUS	30	10.173	1.055



Variable	FEED	N	Mean	StDev
Electrode Used [inch]	CONSTANT	29	0.29462	0.01182
	VARIOUS	28	0.26663	0.01136



Variable	FEED	N	Mean	StDev
Voltage Average [V]	CONSTANT	32	68.372	1.497
	VARIOUS	30	64.780	0.638



Rysunek 6-30 Porównanie drążeń dla elektrody 0.3 mm przy użyciu posuwu o stałej wartości oraz zmiennego, zależnego od długości elektrody.

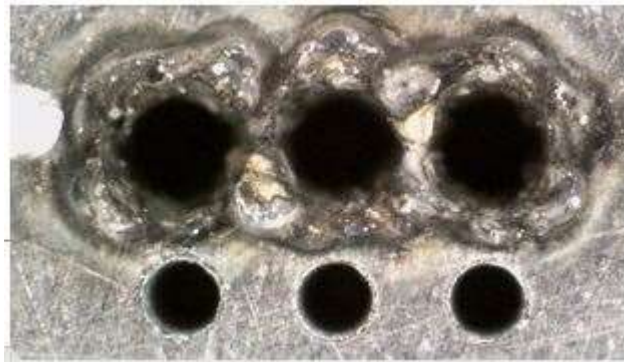
Podczas testu, którego dane częściowe pokazane są na Rysunku 6-30 wszystkie otwory wykonano poprawnie- wykrywając przebicie. Model zmiennego posuwu jest rozwijany i został przyjęty jako standardowy dla opracowywania nowych parametrów drążenia. Zastosowanie takiego modelu posuwu pozwoliło przede wszystkim na podniesienie stabilności pracy drążarki.

6.5. Wpływ obciążenia cyklu oraz długości faz cyklu.

Cykl pracy obrabiarki EDM składa się z dwóch głównych faz: aktywnej- kiedy zachodzą wyładowania, określanej t_e , t_{on} oraz fazy płukania t_o lub t_{off} . Zarówno długość tych faz jak i ich wzajemne proporcje mają wpływ na proces drążenia. Podstawowym współczynnikiem używanym do opisu cyklu, poza wartościami czasowymi poszczególnych faz – najczęściej są to ms lub μs , jest tzw. obciążenie cyklu. Oblicza się je ze wzoru:

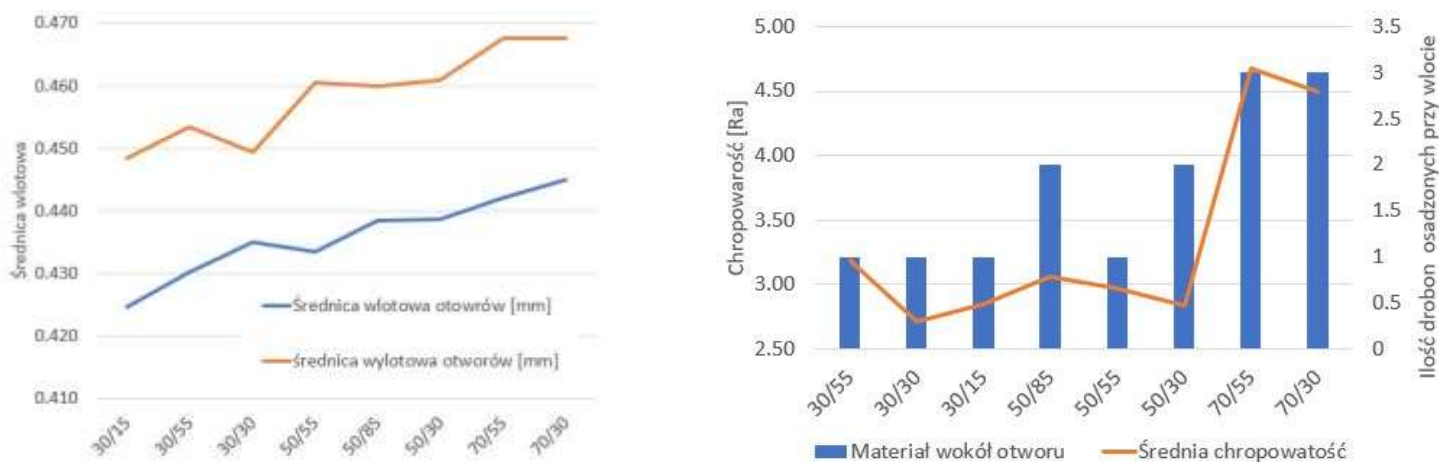
$$Dc = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Współczynnik ten określa procentowy udział fazy aktywnej do całkowitej długości cyklu. Nie może on być używany w oderwaniu od długości trwania faz. Wynika to z faktu, iż zarówno zbyt krótkie jak i zbyt długie cykle negatywnie wpływają na stabilność procesu. Zbyt krótkie cykle nie pozwalają na odpowiednie oczyszczenie obszaru roboczego z pozostałości procesu, a także nie zapewniają wystarczającego chłodzenia tej strefy. Na Rysunku 6-31 przedstawiano dwie serie otworów wykonanych takimi samymi parametrami. Jedyną różnicą była długość cykli. Parametry czasowe cykl dla rzędu górnego to $t_{on}=5ms$, $t_{off}=7ms$ natomiast dla rzędu dolnego to $t_{on}=30ms$, $t_{off}=40ms$. Obciążenie obu cykli to w $\sim 40\%$.



Rysunek 6-31 Otwory wykonane tą samą średnicą elektrody, tymi samymi parametrami elektrycznymi przy tym samym obciążeniu cyklu $\sim 40\%$.

Obciążenie i parametry cyklu oddziałują na detal obrabiany. Wpływ widoczny jest na rozbić otworu, stabilność pracy, chropowatość, przetop.



Rysunek 6-32 Porównanie wpływu parametru cyklu na wykonywany otwór- jego średnicę, chropowatość czy ilość drobin wokół otworu.

Jak pokazano na wykresach zamieszczonych na Rysunku 6-32 podniesienie obciążenia cyklu powoduje wzrost średnicy i chropowatości. Co ciekawe wzrost następuje nawet dla otworów wydrążonych cyklem o tym samym obciążeniu (cykl 1: $t_{on}=30ms$, $t_{off}=55ms$ oraz cykl 2: $t_{on}=50ms$, $t_{off}=85ms$ - dla obu obciążenie wynosi $\sim 35\%$). Mechanizm ten potwierdzony został wielokrotnie podczas kolejnych testów. Obciążenie cyklu oraz długości faz mogą być wykorzystywane do sterowania procesem. Ich kontrolowana zmiana przekłada się na charakterystyki wykonywanych otworów. Obciążeniem cyklu, dla którego proces jest najbardziej stabilny jest 50%, tzn. czas trwania cyklu pracy t_{on} trwa tyle sam co cykl płukania t_{off} .

6.6. Wpływ materiału obrabianego

Przedstawiony w tym paragrafie materiał stanowi fragment opracowania, które w formie artykułu zgłoszone zostało na konferencję ESAFORM 2023 (46). Drażenia wykonano w materiałach opisanych w Tabelach 6-3 oraz 6-4.

Jednym z stosunkowo mało zbadanych obszarów jest wpływ fizykochemicznych właściwości materiałowych takich jak przewodność cieplna, temperatura topnienia oraz ciepło właściwe na proces drażenia elektroerozyjnego. Rozwijane są modele pod określone materiały, co nie daje możliwości szerszego spojrzenia na ogólne zależności.

Do obróbki wszystkich wymienionych materiałów użyto takich samych parametrów: $I_p=10A$, $U=40V$, $t_{on}=30ms$, $t_{off}=30ms$ oraz prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr/min. Czas wszystkich drażeń był taki sam.

Parametrami poddanymi analizie były:

- prędkość usuwania materiału MRR (ang. Material Removal Rate)

$$MRR = V/t$$

gdzie: V- objętość usuniętego materiału, t- czas drążenia

- zużycie elektrody LTW (ang. Linear Tool Wear)- zużycie elektrody podczas drążenia jednego otworu

- promieniowe rozbieżenie otworu ROC (ang. Radial Ovecut)

$$ROC = \frac{D_{hole} - D_{electrode}}{2}$$

gdzie: D_{hole}- średnica otworu, D_{electrode}- średnica elektrody

- wskaźnik smukłości AR (ang. Aspect Ratio)

$$AR = \frac{H_{depth}}{D_{hole}}$$

gdzie: H_{depth}- głębokość otworu, D_{hole}- średnica otworu

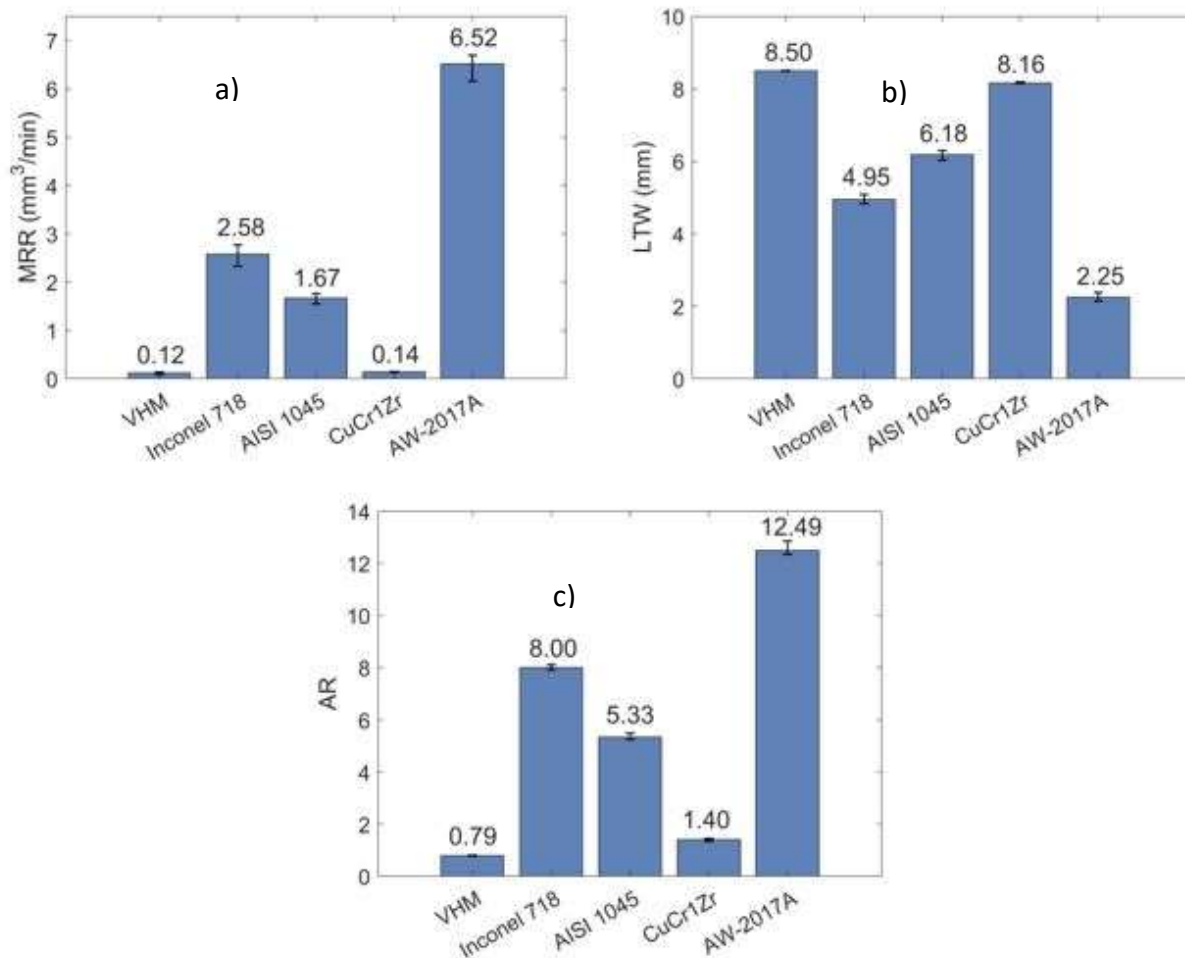
Dla każdego z materiałów wykonano serię drążeń, co umożliwiło analizę statystyczną parametrów. Wyniki przedstawione są w Tabeli 6-6.

Tabela 6-6 Wyniki drążeń (wartości średnie).

Materiał obrabiany	V [mm ³]	t [s]	D _{hole} [mm]	H _{depth} [mm]
Tungsten carbide VHM	0.05	24	0.47	0.37
Inconel 718 superalloy	0.75	18	0.49	3.94
Carbon steel AISI 1045	0.53	19	0.50	2.67
Copper CuCr1Zr	0.11	47	0,48	0.67
Aluminium alloy AW-2017A	1.32	12	0.51	6.39

Tabela 6-7 Odchylenie wartości średnich wyznaczonych współczynników.

Materiał obrabiany	MRR	LTW	ROC	AR
	Odchylenie standatdowe			
Tungsten carbide VHM	0.018	0.0058	0.0033	0.0067
Inconel 718 superalloy	0.150	0.0724	0.0025	0.0815
Carbon steel AISI 1045	0.081	0.0727	0.0064	0.0853
Copper CuCr1Zr	0.008	0.0155	0.0025	0.0326
Aluminium alloy AW-2017A	0.162	0.0845	0.0057	0.1496



Rysunek 6-33 Wyniki drążeń: a) MRR- wsp. erozji materiału, b) LTW- wsp. erozji elektrody c) AR- wsp. smukłości otworu.

Najwyższy współczynnik erozji materiału $\sim 6.5 \text{ mm}^3/\text{min}$, podobnie jak współczynnik smukłości otworu ~ 12.5 zaobserwowano dla aluminium. Jednocześnie dla tego materiału elektroda zużywała się najwolniej. Po przeciwnej stronie znajduje się węgiel wolframu oraz stop miedzi. Stop aluminium ma podobną przewodność cieplną ($134 \text{ W/m}^*\text{K}$) do węgla wolframu ($87.9 \text{ W/m}^*\text{K}$). Węgiel odznacza się jednocześnie dużo wyższą temperaturą topnienia (2273K) w porównaniu do aluminium (913K). Aluminium ma znacząco wyższe ciepło właściwe ($873 \text{ J/kg}^*\text{K}$) podczas gdy dla węgla to ($150\text{-}350 \text{ J/kg}^*\text{K}$). Wyniki drążeń w miedzi są zbliżone do tych uzyskanych dla węgla wolframu, mimo iż temperatura topnienia miedzi ($\sim 1340\text{K}$) jest prawie połowę niższa od temperatury topnienia węgla (2273K). Jednocześnie miedź ($401 \text{ W/m}^*\text{K}$) ma ponad czterokrotnie wyższą przewodność cieplną, porównując do węgla ($87.9 \text{ W/m}^*\text{K}$). Pozostałe dwa materiały- Inconel oraz stal mają zbliżone wartości analizowanych

współczynników termofizycznych- zatem ich odpowiedź na drażnienie jest podobna. Można zatem wywnioskować, iż te trzy cechy mogą posłużyć do określenia podatności materiału na obróbkę elektroerozyjną. Do podobnych wniosków doszedł Reynaerts (45) proponując użycie współczynnika erozji (ang. Erosion Index) ER_{index} . Opisuje go równanie:

$$ER_{index} = \lambda * c * T^2$$

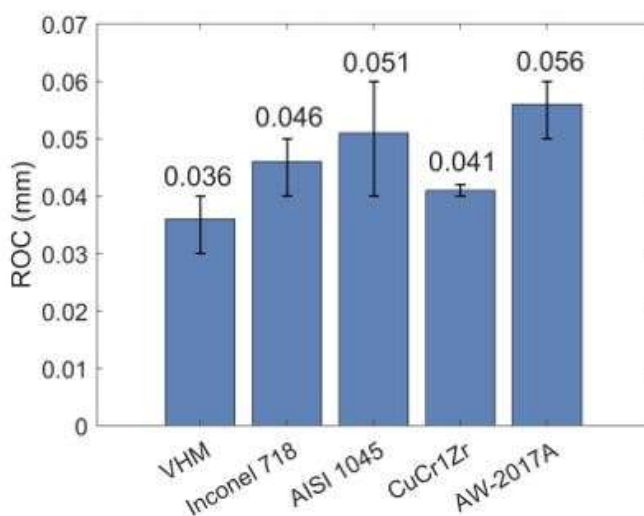
Gdzie: λ - przewodność cieplna (W/m*K), c - ciepło właściwe (J/kg*K), T - temperatura topnienia (K)

Podstawiając dane z Tabeli 6-4 do powyższego równania otrzymamy podsumowanie podatności wykorzystanych materiałów na obróbkę elektro erozyjną.

Tabela 6-8 Współczynniki erozji ER_{index} dla badanych materiałów.

Węglík wolframu VHM	Inconel 718	Stal AISI 1045	Stop miedzi CuCr1Zr	Stop aluminium AW-2017A	Mosiądz
Współczynnik Erozji ER_{index} [$\times 10^{10} \text{ J}^2/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg})$]					
15.90	1.28	8.81	28.40	9.75	9.76

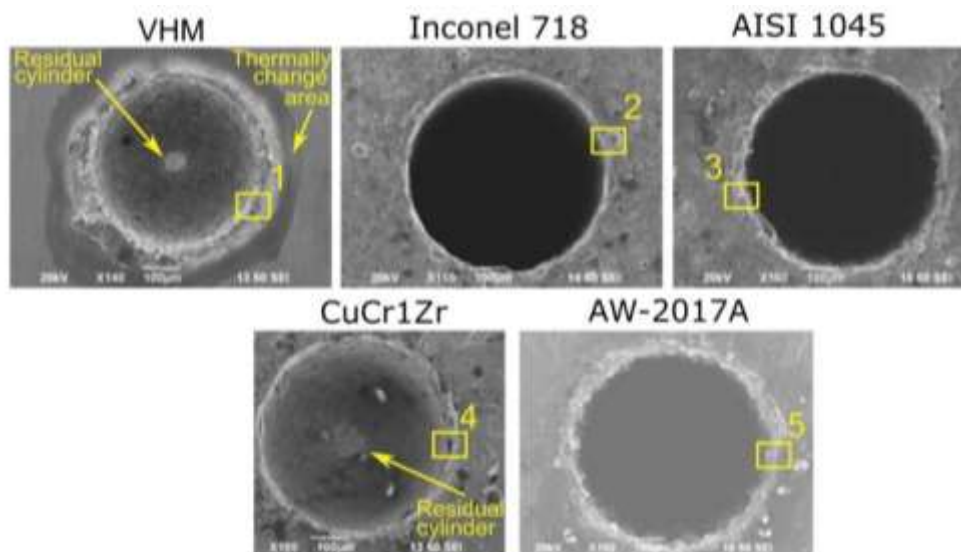
Obliczenia potwierdziły, iż materiałami najmniej podatnymi na obróbkę elektroerozyjną są węglík wolframu oraz stop miedzi. Jednocześnie zastanawia duża rozbieżność we współczynnikach pomiędzy stopem Inconel 718 a stalą AISI1045- prawie siedmiokrotna, podczas gdy różnica w wydatku erozji MRR to 54%. Można zatem stwierdzić, iż współczynnik erozji jest parametrem orientacyjnym, jakościowym.



Rysunek 6-34 rozbieżność promieniowa otworu dla poszczególnych materiałów.

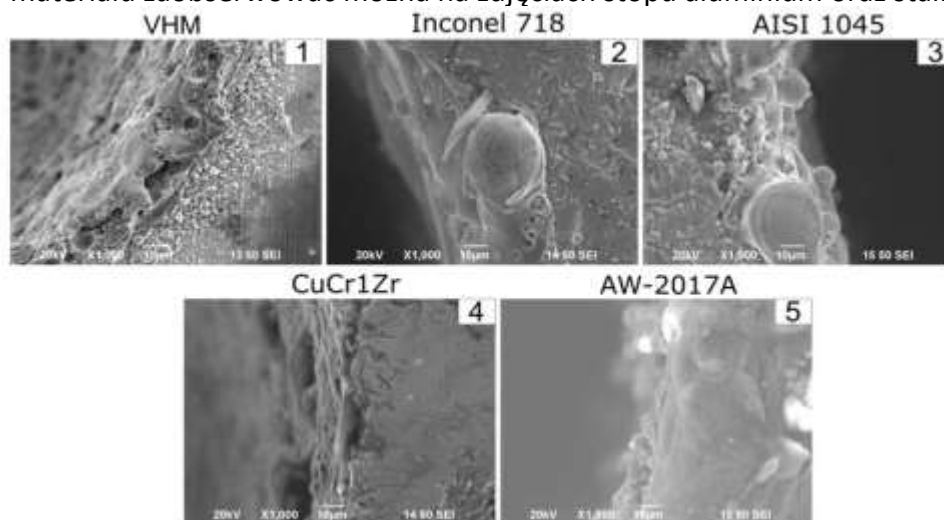
Pewną prawidłowość w odniesieniu do współczynnika ER_{index} można przełożyć także na stabilność geometryczną wykonanych otworów. Jak pokazano na Rysunku 6-34 otwory wykonane w materiałach o wyższym indeksie mają mniejsze rozbieżności promieniowe.

Próbki poddano także analizom przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego. Na zdjęciach pokazanych na Rysunku 6-35 widać strefy przetopu, wpływu ciepła a także pozostałe w centralnej części stożki. Analiza struktury pokazała dużą różnicę w charakterze otworów. Otwory wykonane w węgliku miały wyraźnie widoczną strefę przegrzaną. Na zbliżeniu fragmentu krawędzi- pokazanym na Rysunku 6-36-1 widać jednolitą przetopioną warstwę z lokalnymi pęknięciami. Zaobserwować można także pustki. Nie zaobserwowano sferycznych drobin czy grudek przyklejonych na powierzchni. Widać je dla próbek z Inconelu oraz stali AISI1045.



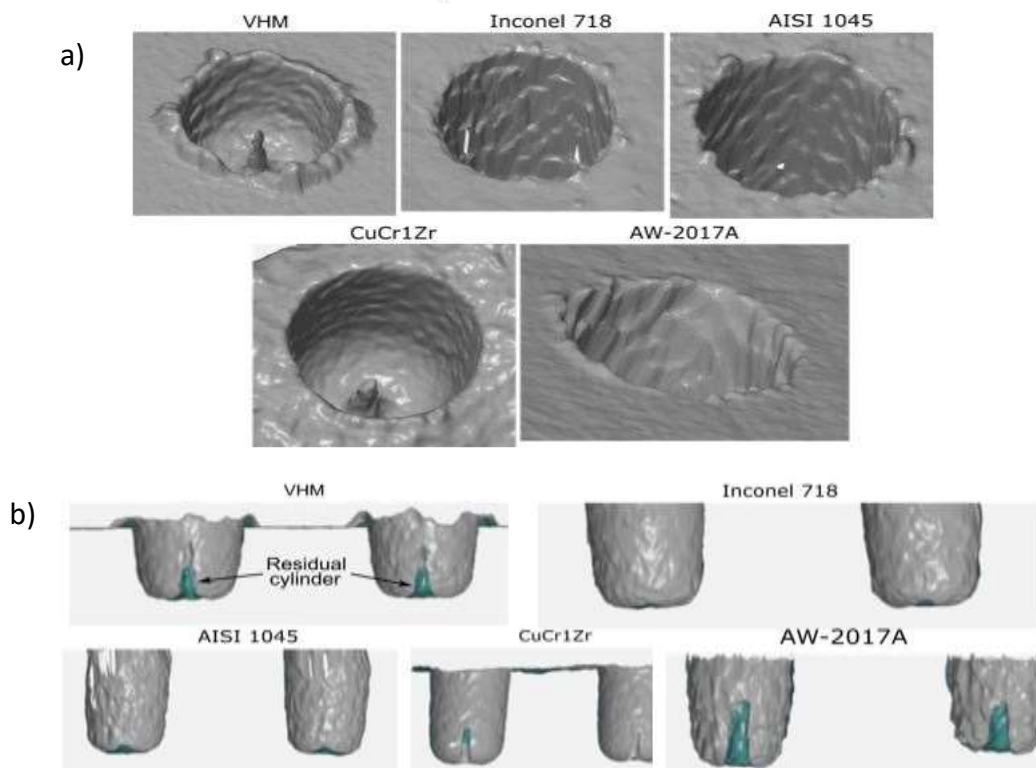
Rysunek 6-35 Otwory wydrążone w materiałach testowych, powiększenie 160x.

Powierzchnia otworu wykonanego w stopie miedzi jest zdecydowanie najrówniejsza- bez widocznych wtórnie osadzonych drobin. Nie widać także pęknięć warstwy przetopionej ani warstwy przegrzanej. Najbardziej nieregularną warstwę- z dużą ilością pęknięć, utlenień, wtórnie osadzonego materiału zaobserwować można na zdjęciach stopu aluminium oraz stali AISI.



Rysunek 6-36 Widok krawędzi otworów- numeracja zdjęć jak na Rysunku 6-35

Na zdjęciach z mikroskopu SEM- wewnątrz niektórych otworów wykryto pozostałość w formie centralnie ulokowanego stożka. Geometria widoczna jest na skanach pokazanych na Rysunku 6-37.



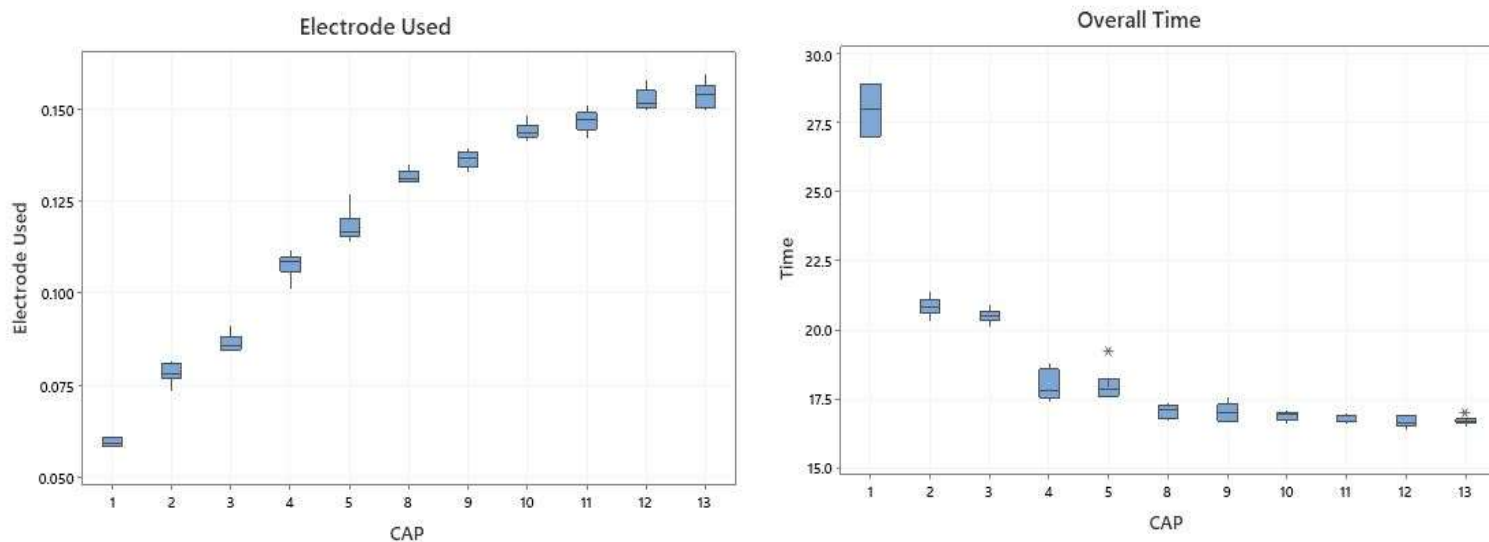
Rysunek 6-37 Skan otworów: a) widok z zewnątrz, b) widok w przekroju.

Stożek, po pierwszej ocenie zaobserwowany został w otworach wykonanych w węglu i w miedzi. Bliższa analiza otworów pokazała podobną formację na dnie otworów w stopie aluminium.

Wyjaśnienie postawnie stożka na dnie otworów wymaga dodatkowej analizy i weryfikacji. Niemniej testy pokazały pewną zgodność z przyjętym założeniem o współczynniku erozji.

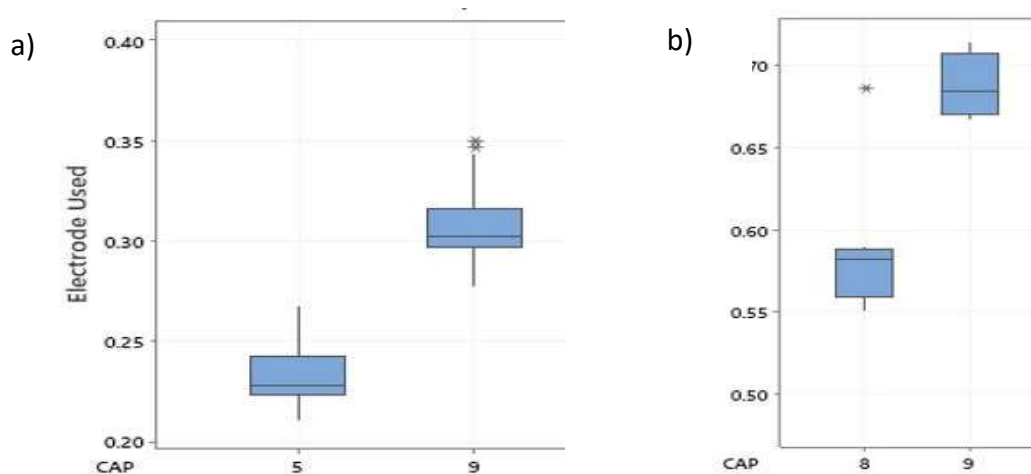
6.7. Wpływ pojemności

Wpływ elementów pojemnościowych na proces drążenia elektro erozyjnego nie jest obecny w literaturze fachowej. Za pomocą kondensatorów można sterować kształtem impulsu czy czasem jego trwania. Brakuje analiz pokazujących wpływ zmian (zwiększania lub zmniejszania) pojemności włączonej w układzie generującym impulsy. Wykonane analizy pokazały statystycznie znaczący wpływ pojemności na takie charakterystyki procesu jak szybkość erozji elektrody oraz czas drążenia.



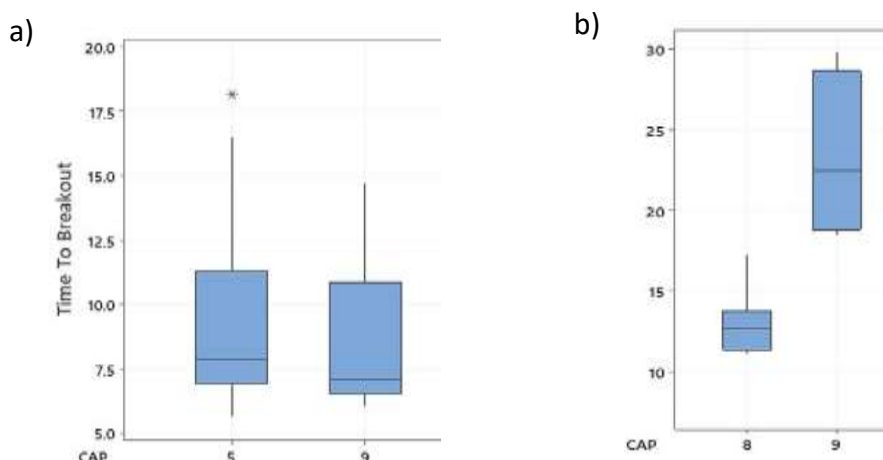
Rysunek 6-38 Wpływ pojemności na LTW oraz czas drążenia dla elektrody o średnicy 0.5mm.

Pierwszy z testów przeprowadzony został dla elektrody o średnicy 0.5mm. Drążenia wykonano w standardowej płytce testowej ze stopu Inconel 718. Zmiana pojemności wyraźnie wpłynęła zarówno na zużycie elektrody jak i na czas drążenia co pokazano na Rysunku 6-38. Test powtórzono dla elektrody o średnicy 0.25 mm oraz dla płytki wykonanej z odlewu monokrystalicznego N515.



Rysunek 6-39 Porównanie zmiany w zużyciu elektrody dla: a) IN718, b) N515 po zmianie pojemności w układzie generatora.

Zmiana dla obu materiałów jest podobna. Po podniesieniu pojemności podłączonej do generatora znacząco wzrasta zużycie elektrody. W zależności od innych parametrów testu i zakresu zmiany zużycie elektrody wzrastało o 25-35%.



Rysunek 6-40 Wpływ zwiększenia pojemności na czas drążenia a) IN718, b) N515

Jednocześnie ta dla tych samych testów odmienne wnioski wyciągnięto dla czasu drążenia. Dla stopu Inconel 718, co pokazano na Rysunku 6-40-a, wpływ zwiększenia pojemności nie jest widoczny. Rozrzut czasu drążenia dla pojemności o indeksie 5 jest porównywalny z tym dla pojemności 9. Inną wyniki reprezentuje wykres przedstawiony na Rysunku 6-40-b, który przedstawia zmianę czasu drążenia dla materiału Rene N515. W tym przypadku zmiana, podobnie jak dla zużycia elektrody, jest widoczna. Wpływ pojemności na stanu powierzchni czy stabilności drążenia powinien być poddany dalszym badaniom.

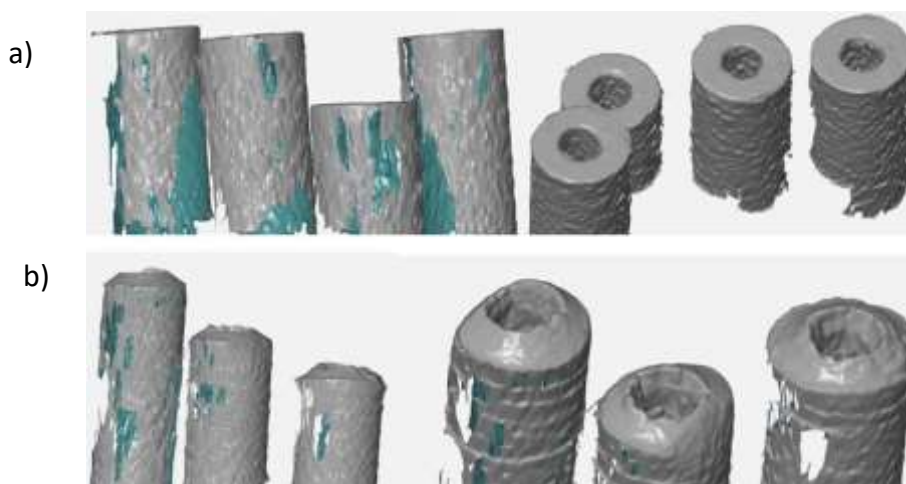
6.8.Producent elektrod

Nieoczekiwanym efektem szczegółowej kontroli procesu drążenia było spostrzeżenie dotyczące jakości i źródła pochodzenia elektrod. Wprowadzona kontrola wydatku dielektryka pozwoliła na powiązanie zaburzeń procesu z konkretnym dostawcą. Najważniejsze zmiany procesu pokazano w Tabeli 6-9.

Tabela 6-9 Wpływ źródła elektrod na proces drążenia.

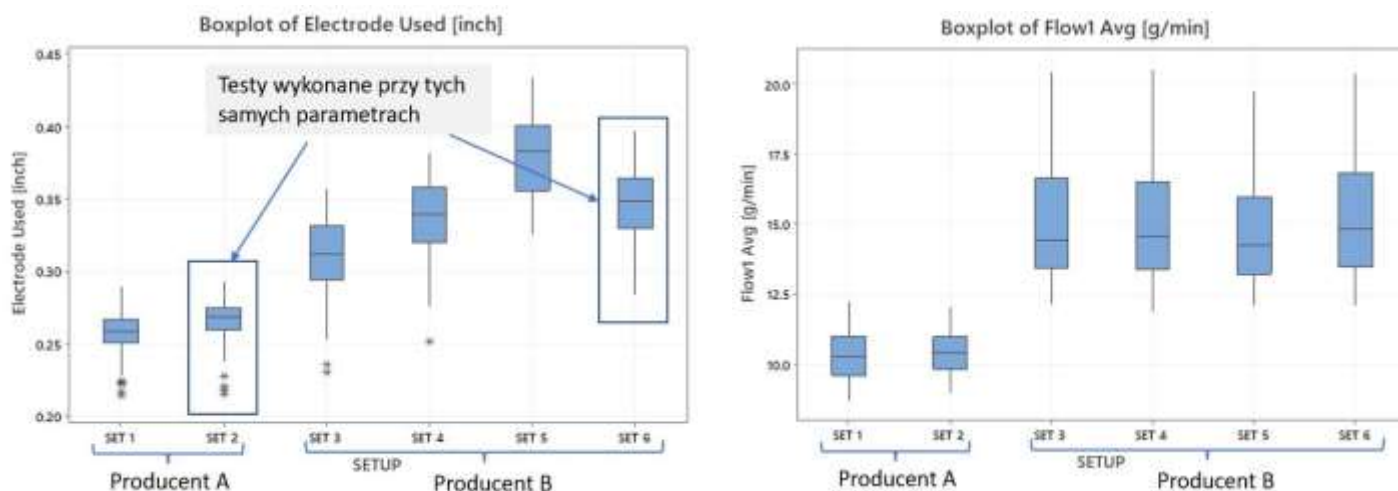
		Elektrody „stare”	Elektrody „nowe”
Ilość otworów wykonanych 1 elektrodą		19	13
Znormalizowany	czas	1	1.8
Znormalizowane	zużycie	1	1.3
Odchylenie standardowe wartości napięcia		17	21.4
Znormalizowany	przepływ kanałem wewnętrznym	1	0.78

Testy, podczas których zauważono anomalie, realizowane były przy użyciu elektrod o średnicy zewnętrznej 0.25mm. Elektrody z „nowej” i „starej” dostawy zeskanowano. Pokazano je na Rysunku 6-41.



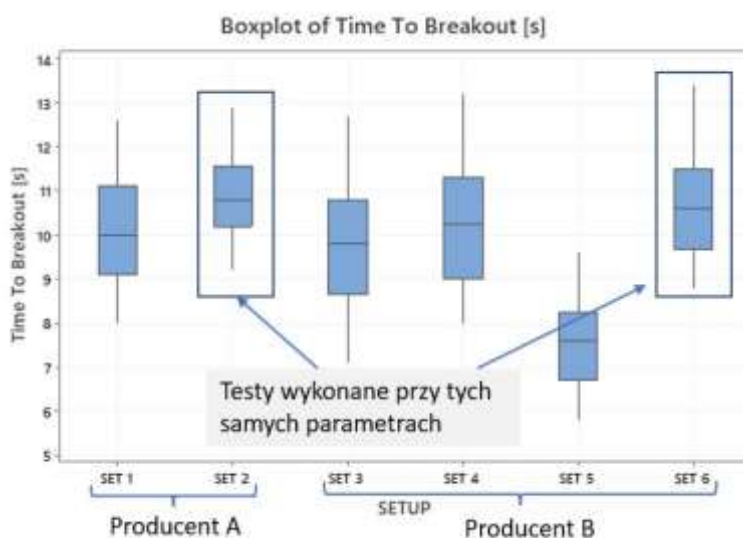
Rysunek 6-41 Geometria i stan powierzchni dla a) starej partii b) nowej partii elektrod

Od tego momentu zaczęto traktować „dostawcę” jako jedną ze zmiennych procesu. W opisanym w rozdziale „5.1.1 Narzędzia cyfrowe- przemysł 4.0” systemie CoolBox-DMES dodano pole „dostawca” dla każdego wykonywanego otworu. Pozwala to na porównanie wpływu tej zmiennej na proces.



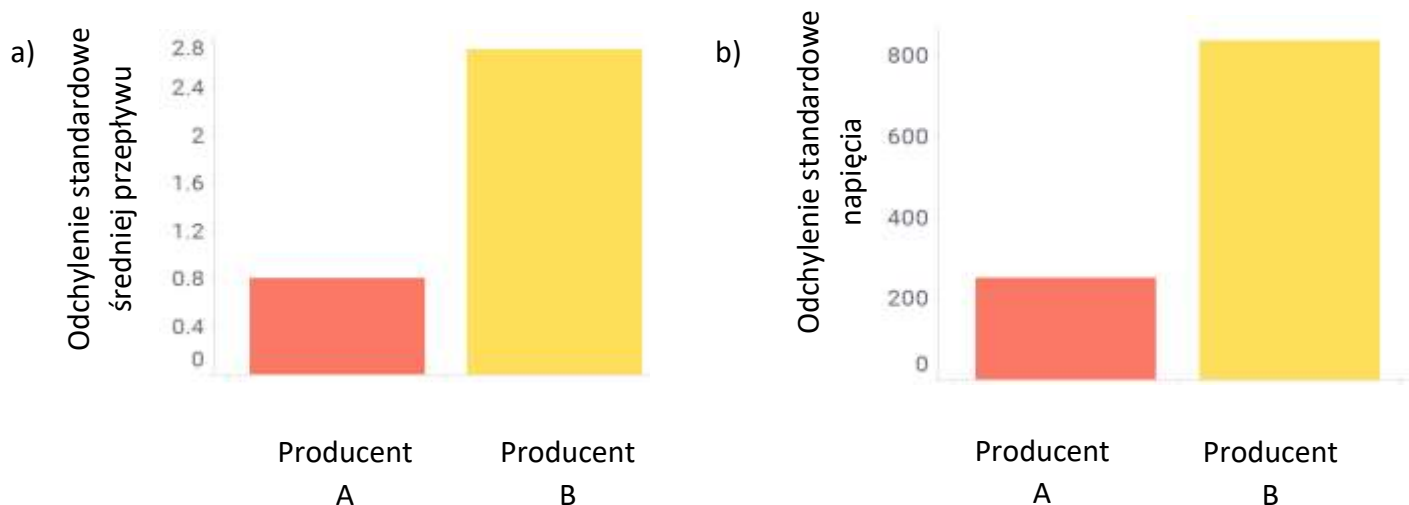
Rysunek 6-42 Porównanie zużycia elektrody oraz średniego przepływu dla dwóch producentów.

Z porównania wynika, iż elektrody producenta A mają jednocześnie mniejszy przepływ i przy tych samych parametrach zużycie ich jest mniejsze o prawie 30% w porównaniu do producenta B. Dalsza analiza pokazała brak negatywnego wpływu mniejszego przepływu w przypadku producenta A- co pokazane jest na Rysunku 6-43.



Rysunek 6-43 Porównanie czasów drążenia

W przypadku procesu produkcyjnego najważniejszym wymaganiem jest stabilność i powtarzalność procesu. Jak pokazano na Rysunku 6-44 elektrody producenta A zapewniają lepszą stabilność procesu.

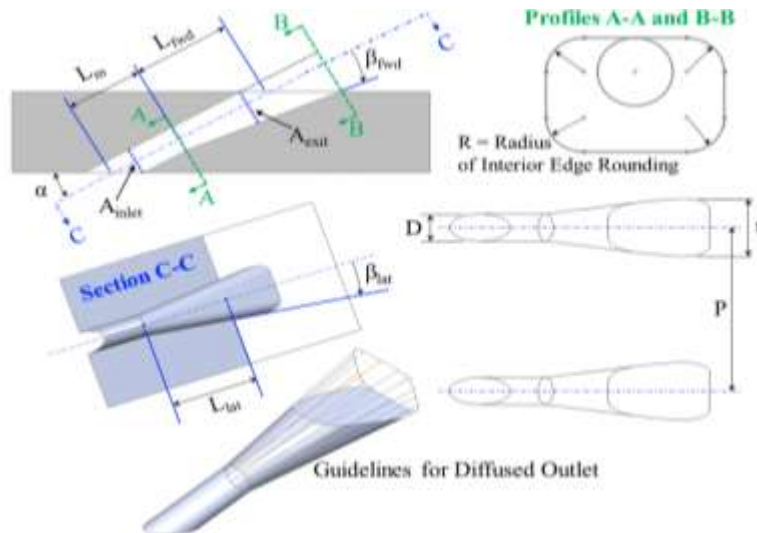


Rysunek 6-44 Porównanie stabilności przepływu oraz odchylenia standardowego napięcia dla elektrod pochodzących z dwóch źródeł.

Przeprowadzone testy pokazały istotność weryfikacji wszystkich zmiennych mogących potencjalnie wpłynąć na proces. Bez pełnej informacji o zmianach w wydatku, napięcia, źródeł elektrod z wyników badań można wyciągnąć odmienne wnioski. Zagadnieniem, nad którym warto podjąć w przyszłości prace jest przyczyna zaobserwowanych rozbieżności, oraz optymalizacja elektrody- chropowatości, geometrii, składu chemicznego.

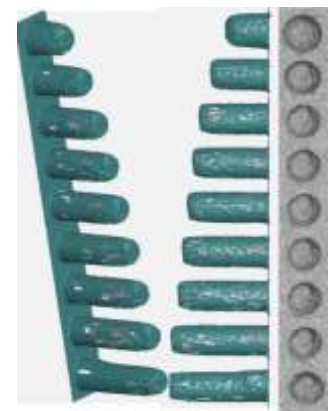
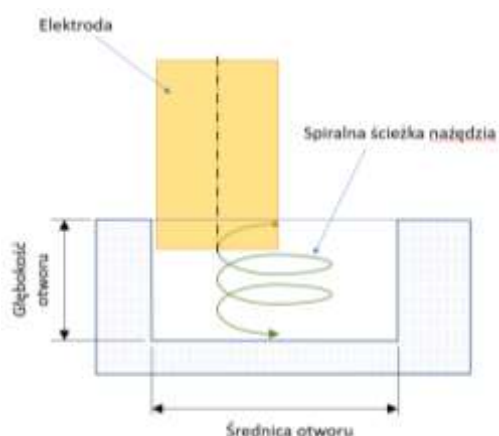
6.9. Technologia wykonywania otworów kształtowych

Elementy turbiny silnika Catalyst wykorzystują obok otworów okrągłych także otwory kształtowe o których wspomniano w rozdziale 3.1. Zapewniają one większą sprawność chłodzenia w porównaniu do otworów chłodzących.



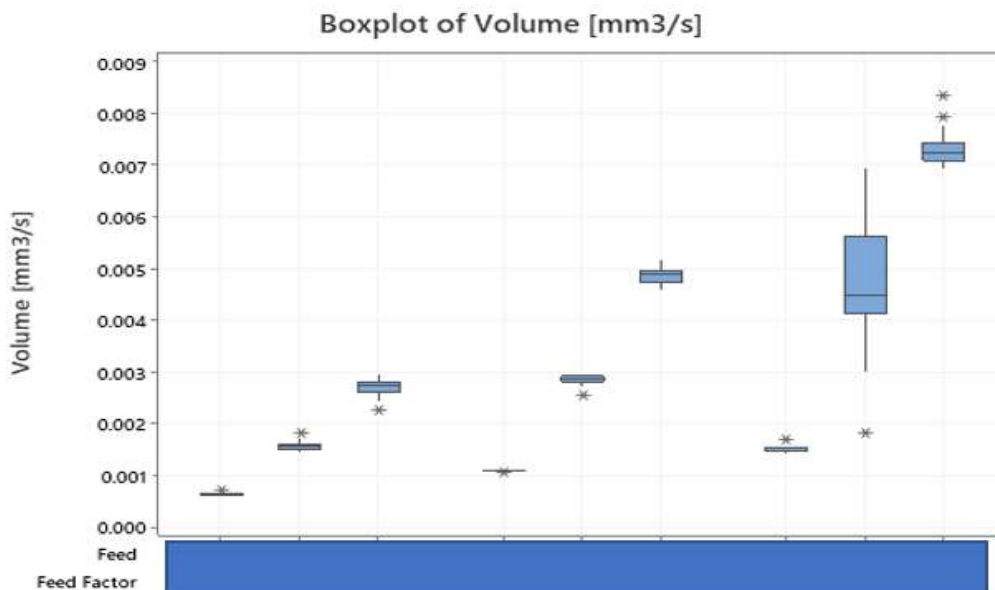
Rysunek 6-45 Widok tzw. kształtowego otworu chłodzącego. (83)

Ceną jest jednak skomplikowany proces wykonywania. W poprzednim rozdziale opisano proces rozwoju technologii w obszarze wykonywania otworów okrągłych, do produkcji których niezbędne jest zrozumienie mechanizmów rządzących procesem elektro drążenia. Do wykonania kompletnego otworu w kształcie prezentowanym na Rysunku 6-45 niezbędne było opracowanie technologii wierszowania. Punktem wyjścia do tej analizy były parametry uzyskane dla procesu drążenia. Założono, iż najprostszym kształtem, który powinien być użyty do pierwszych prób będzie okrąg. W pierwszym teście zweryfikowano wpływ posuwu F , oraz wysuwu elektrody kompensującego jej zużycie.



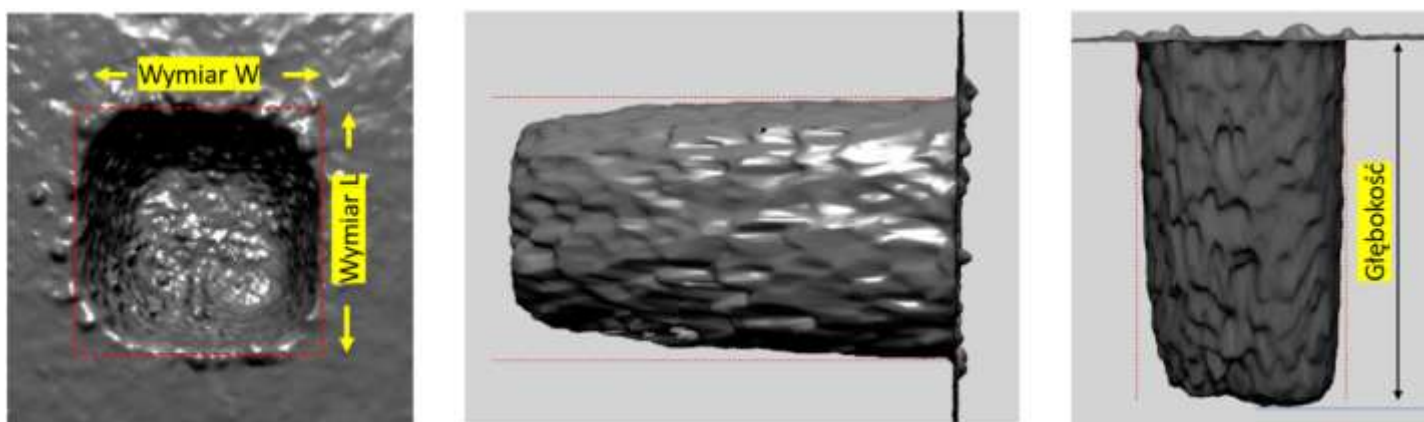
Rysunek 6-46 Analiza wpływu prędkości wysuwania elektrody oraz zasięgu wysuwu na czas i geometrię wykonywanych kształtów.

Na podstawie zebranych informacji wprowadzono do modelu współczynnik posuwu F_f . Określa on stosunek prędkości w osi Z do prędkości w płaszczyźnie XY. Użyteczny zakres F_f wyznaczono na podstawie eksperymentu planowanego pełno czynnikowego. Zmiennymi był posuw F , oraz współczynnik posuwu F_f .



Rysunek 6-47 Wyniki analizy pełno czynnikowej dla posuwu i współczynnika posuwu.

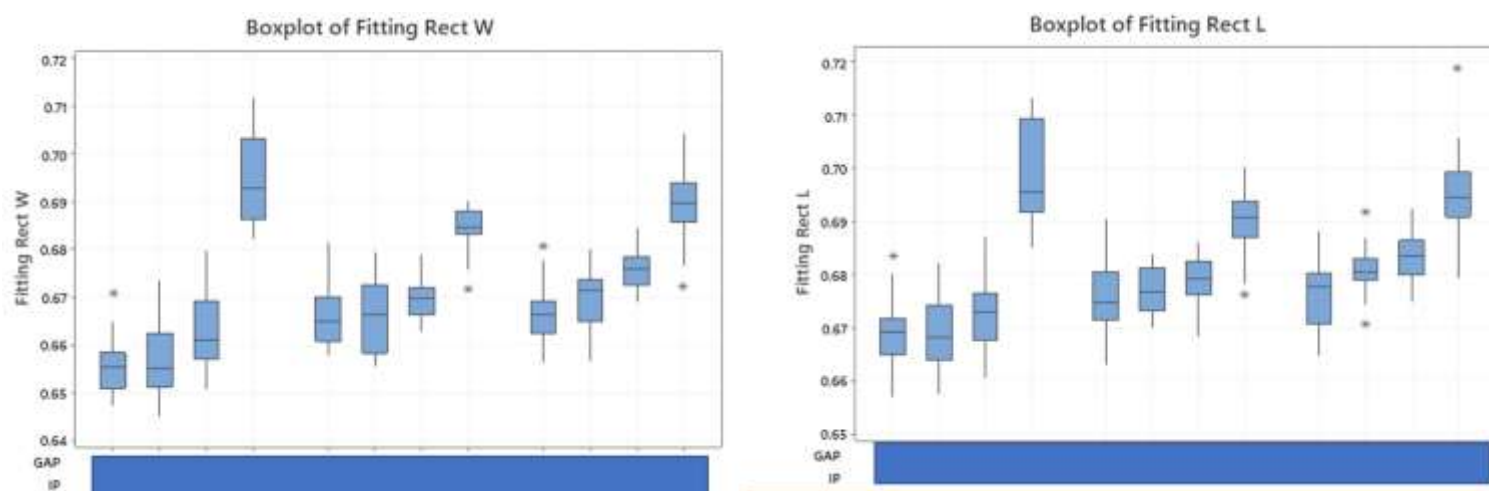
Do celów testowych przyjęto jako geometrię testową graniastosłup o boku postawy 0.68mm. Konieczne było zweryfikowanie stabilności geometrycznej otworów kształtowych. Dodano wymiary: x, y oraz głębokość pokazane na Rysunku6-47.



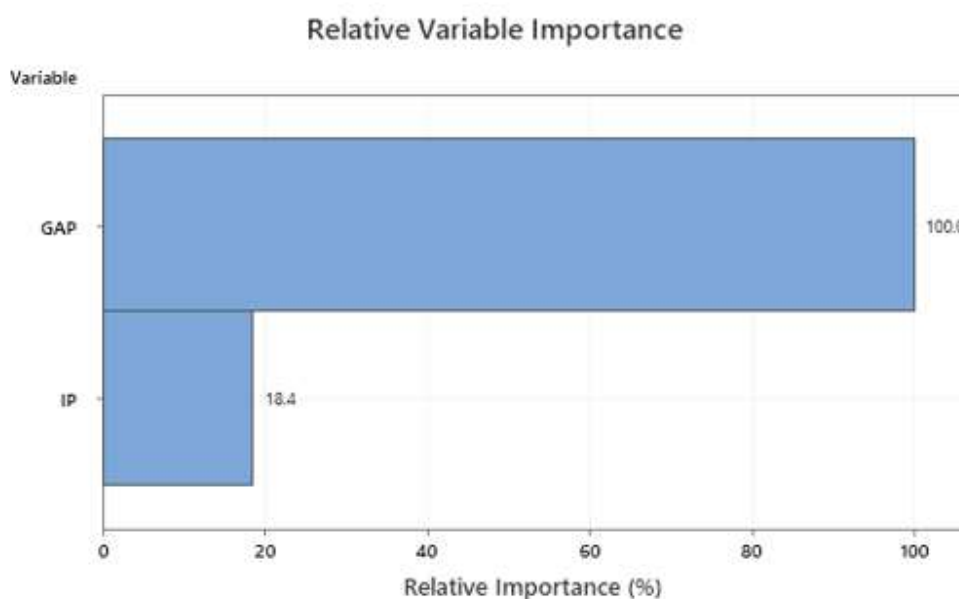
Rysunek 6-48 Geometria testowa- usuwana objętość jest zgodna z objętością docelowego dyfuzora otworu kształtowego.

Posługując się przyjętymi metrykami geometrycznymi przystąpiono do analizy stabilności otrzymywanych kształtów. Zweryfikowano zmienność wymiarów L, W oraz głębokości dla różnych wartości napięcia i natężenia. Zakres zmienności wymiarów L i W pokazane są na Rysunku 6-49. Oba wymiary zwiększają swoją wartość średnią wraz ze wzrostem napięcia i

natężenia. Analiza statystyczna której wyniki widoczne są na Rysunku 6-50 potwierdziła te wnioski.



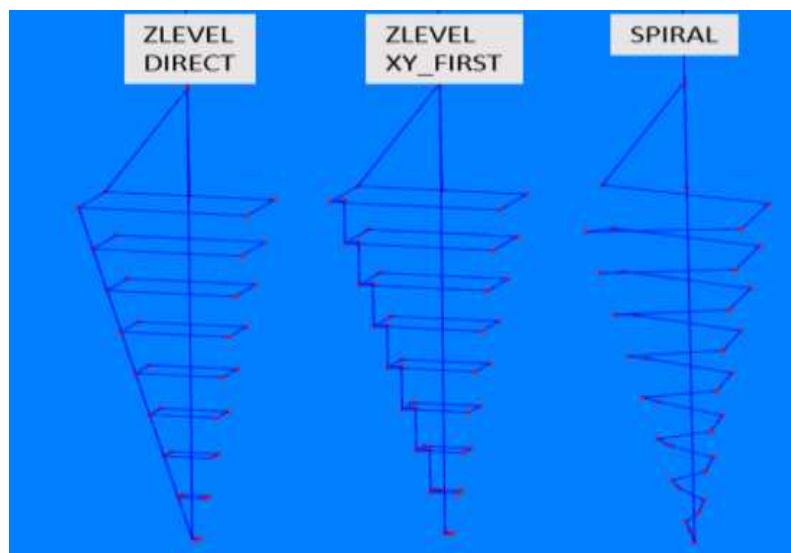
Rysunek 6-49 Zmienność wymiarów W i L w zależności od zmiennej napięcia i natężenia.



Rysunek 6-50 Wpływ napięcia i natężenia na geometrię.

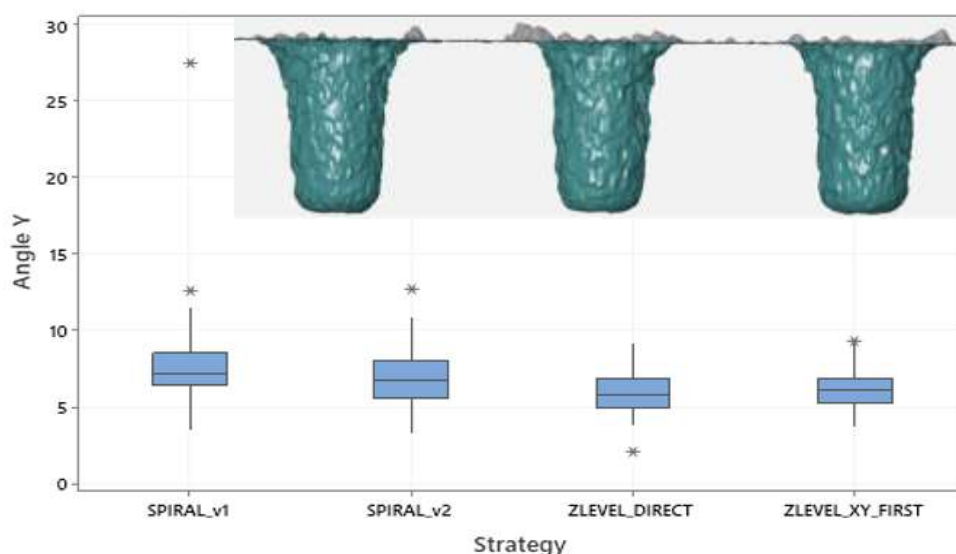
Ścieżka, po której porusza się elektroda może mieć różne przebiegi. Sposób przemieszczania elektrody jest kolejną zmienną wpływającą na dokładność wykonania dyfuzora, czas operacji oraz zużycie elektrody. Przeanalizowano trzy schematy ścieżek: „z-level direct”, „z-level xy-first” oraz

„spiral”. Dwa pierwsze różnią się między sobą miejscem przejścia elektrody na kolejny poziom wierszowania.



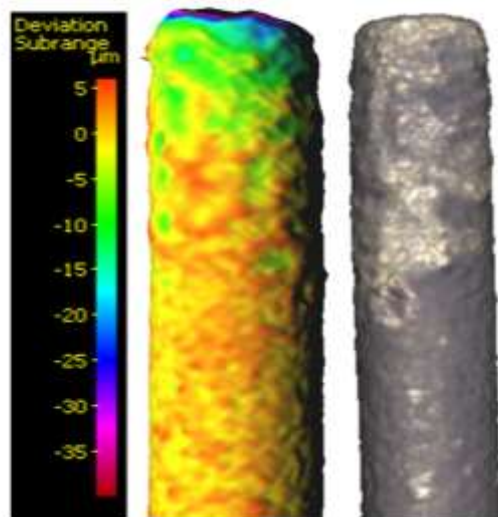
Rysunek 6-51 Schematy ścieżki narzędzia.

W schemacie z-level elektroda przesuwa się do kolejnej warstwy natychmiast po zakończeniu ścieżki w danym poziomie, natomiast w schemacie xy-first dodatkowo odsuwa się od ścianki. W schemacie spiralnym wierzchołek elektrody nie przemieszcza się po płaszczyźnie a spiralnie schodzi coraz niżej. Nie ma tutaj, jak w przypadku pierwszych dwóch schematów oddzielnego kroku na przejście do nowej warstwy.



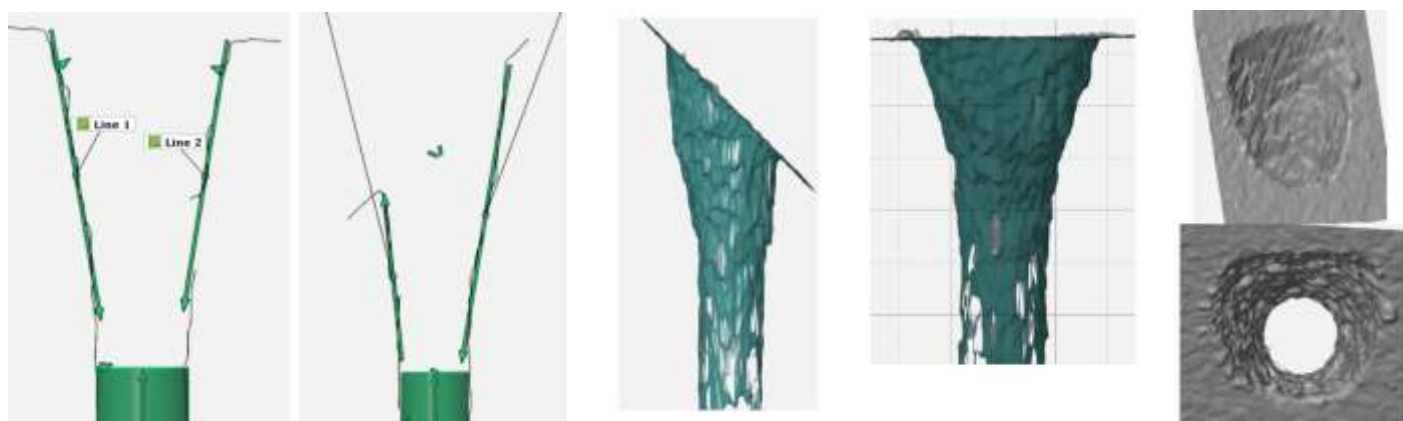
Rysunek 6-52 Wyniki wierszowania dla różnych strategii. Na skanie widok otworów wykonanych strategią zlevel-xy first. Kąt Y jest pochyleniem ścianek otworu.

Najlepszą stabilność geometryczną uzyskano dla strategii zlevel-xy-first. Wyniki przedstawiono na Rysunku 6-52. Sprawdzeniu poddano także elektrody- zakładając poprawność doboru nastaw procesu, elektroda w procesie wierszowania nie powinna zużywać się na średnicy.



Rysunek 6-53 Skan wraz z mapą odchyłek oraz zdjęcie elektrody.

Wybrane elektrody zeskanowano- mapę kształtu oraz zdjęcie wierzchołka elektrody przedstawiono na Rysunku 6-53. Wierzchołek elektrody nie jest zdegradowany, a zużycie na promieniu jest minimalne $\sim 10 \mu\text{m}$. Potwierdza to prawidłowy dobór parametrów.



Rysunek 6-54 Pomiar oraz skan kompletnego otworu kształtowego.

Wykorzystanie zdobytych doświadczeń do wykonania docelowego kształtu otworu chłodzącego pozwoliło na uzyskanie geometrii spełniającej wymagania rysunkowe. Jak każdy proces produkcyjny także technologia opisana w tej pracy podlegać będzie dalszym modyfikacjom. Otrzymanie poprawnego kształtu jest kluczowym sukcesem, ale na drodze do celu są jeszcze wymogi ekonomiczne- jak najniższy czas obróbki przy jak najwyższej wydajności oraz stabilność geometryczna.

6.10. Wnioski

Zagadnienie obróbki elektrodą rotującą, mimo iż rozwijane od prawie 40 lat pozostaje w wielu aspektach wciąż niezbadane. Takimi obszarami są parametry elektrody (stosunek średnicy

zewewnętrznej do wewnętrznej), optymalne ciśnienie płukania, skład chemiczny elektrody. Dostępne w literaturze badania optymalizacyjne koncentrują się w większości na wpływie napięcia, natężenia oraz parametrach cyklu. Podczas badań nie jest weryfikowana stabilność procesu, czy wpływ parametrów na sprawność systemu wykrywającego przebicie. Prace będą kontynuowane w obszarze poprawy wydajności procesu jak też w dalszej jego digitalizacji.

7. Badania powłok aluminidkowych.

7.1. Materiały i metody

Opracowanie technologii wykonywania otworów o małych i bardzo małych średnicach co umożliwiło przejście do kolejnego zagadnienia jakim było wykonanie i analiza powłok. Badania powłok podzielone były na dwie fazy- badania wstępne oraz badania główne.

Do badań wstępnych użyto płytki testowej ze stopu Inconel 718. Próbki pokazane są na Rysunku 7-1.



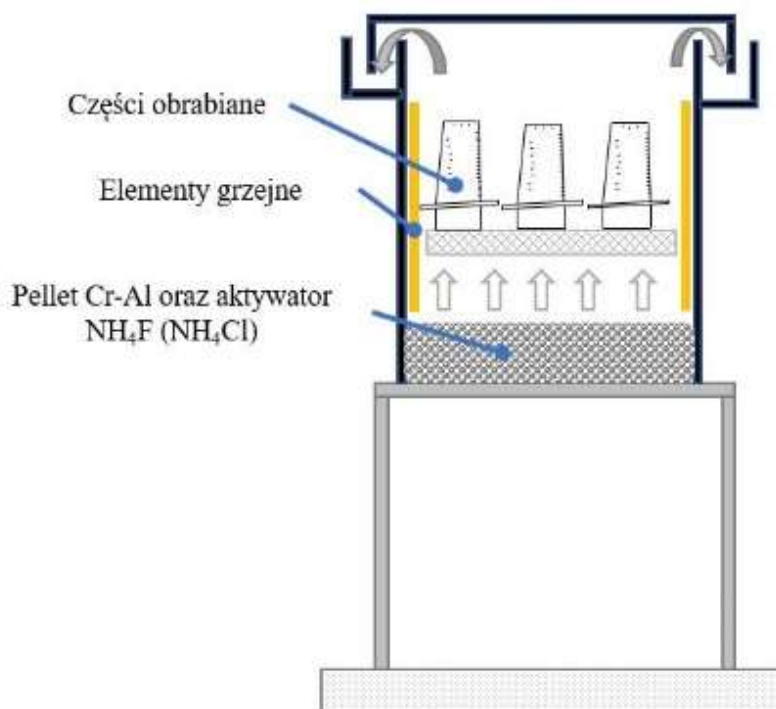
Rysunek 7-1 Płytki z Inconel 718 użyte do badania wstępnego. Widoczne są trzy grupy otworów.

W próbkach wykonano trzy serie otworów o średnicach 0.4, 0.5 oraz 1mm. Otwory o mniejszych średnicach wydrążono elektrodami o średnicach 0.3 i 0.4mm natomiast otwory o średnicy 1mm wykonano techniką wierszowania elektrodą 0.5mm. We wszystkich trzech przypadkach użyto tych samych nastaw. Obciążenie cyklu wynosiło 50%.

Po umyciu w myjce ultradźwiękowej próbki poddane zostały procesowi wytwarzania powłok dyfuzyjnych. Proces realizowany był poprzez zakład Avio Polska w Biesku Białej. Wykorzystana metoda „over-pack” co do zasady przebiega tak samo jak „pack cementation” z tą różnicą, że w tej pierwszej elementy zawieszane są nad retortą na której umieszczony jest granulat glinu wraz z aktywatorem. W procesach produkcyjnych dla spowolnienia procesu wykorzystuje się stopy aluminium np. z chromem. Transfer atomów glinu z fazy gazowej do materiału poddawanego obróbce następuje na jest napędzany zjawiskiem dyfuzji gazowej oraz dyfuzji w ciele stałym. Pierwsze ze zjawisk podnosi zawartość glinu na powierzchni, natomiast drugie- redukuje wprowadzając atomy w głąb materiału. Skład warstwy wierzchniej stabilizuje się wkrótce po rozpoczęciu procesu. Ponieważ dyfuzja w fazie gazowej jest znacznie wyższa niż w fazie stałej,

dlatego też za skład warstwy wierzchniej odpowiada dyfuzja w fazie stałej. Z punktu widzenia reakcji cały proces podzielić można na pięć etapów:

- a) Formowanie chlorków glinu w wyniku reakcji stopu aluminium z aktywatorami chlorowymi
- b) Dyfuzyjny transport związków aluminium w fazie gazowej na powierzchnię obrabianego elementu
- c) Reakcja uwolnienia atomów glinu z chlorków glinu
- d) Dyfuzja aluminium w głąb obrabianego przedmiotu połączona z formowaniem różnych faz międzymetalicznych
- e) Dyfuzja produktów reakcji na powierzchni przedmiotu obrabianego do atmosfery roboczej



Rysunek 7-2 Schemat pieca do procesu VPA

Etapy a) oraz c) zachodzą bardzo szybko w temperaturze procesu ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$), dlatego też grubość wytworzonej warstwy kontrolowana jest przez etapy dyfuzyjne b) i d). Ostatni etap odpowiada za czystość wytworzonej powłoki (84). Szkic pieca wykorzystanego do obróbki „out-of-pack” pokazany jest na Rysunku 7-2. Retorta zawierająca złożę oraz części podgrzewana jest zgodnie z dobranym cyklem obróbki cieplnej. Proces „out-of-pack” odznacza się dużo wyższą czystością

powłoki w porównaniu do procesu „pack-cementation”. W procesie wykorzystano materiały opisane w Tabeli 7-1.

Tabela 7-1 Materiały wykorzystane w procesie osadzania z fazy gazowej, VPA.

Materiał	Funkcja	Skład chemiczny	Ilość
Stop Al-Cr (granulat)	Donor	30/70	50 kg
Fluorek amonu (proszek)	Aktywator	NH ₄ F	40 kg
Gaz ochronny	Ochrona	Ar techniczny	Zgodnie z programem

Fizycznie proces podzielony jest na etapy, które określone są przez specyfikację techniczną procesu. Kolejne fazy procesu wykonywania powłoki określone są w Tabeli 7-2.

Tabela 7-2 Etapy procesu wykonywania powłoki poprzez osadzanie z fazy gazowej, VPA.

Faza	Wartość docelowa [°C]	Główna linia argonu [l/h]	Dodatkowa linia argonu [l/h]	Czas [h]
Grzanie	800	2500		2.0
Wygrzewanie	800	2500		0.5
Grzanie	1050	2500		2.0
Grzanie	1080	2500		0.5
Wygrzewanie	1080	2500		6.0
Chłodzenie	300	3600	300	Do osiągnięcia wartości docelowej

Wykorzystany autoklaw jest przemysłowym systemem wyposażonym w grafitowe palety na których układane są części. Retorty mają kształt kraty- co umożliwia swobodną dyfuzję ze złożeń do obrabianych detali. Złoże składające się z granulatu metalicznego (stop glinu i chromu) oraz aktywatora rozłożone są równomiernie na tacy, która znajduje się pod rusztem z częściami. System posłużył do wykonania powłoki pokazany jest na Rysunku 7-3.



Rysunek 7-3 Piec próżniowy służący do wytwarzania powłoki aluminidkowej w procesie VPA w Avio Polska w Bielsku Białej.

Po załadowaniu retorty detalami oraz donorem wymieszanym z aktywatorem instalowana jest pokrywa dzwonowa. Tak przygotowany wsad umieszczany jest w dzwonie pieca (na zdjęciu widoczny na antresoli). Po ewakuacji z wsadu powietrza i osiągnięciu odpowiedniego poziomu próżni następuje włączenie elementów grzejnych wraz z podaniem do pieca argonu. Proces realizowany jest zgodnie z zatwierdzoną procedurą. Kluczowe parametry procesu są kontrolowane w trybie ciągłym a także rejestrowane.

Po wytworzeniu powłoki próbki poddane zostały testowi oksydacyjnemu, także w zakładzie Avio Polska. Użyto pieca MAB FE37 produkcji Forno Mab, Włochy. Piec pokazany jest na Rysunku 7-4. Test przeprowadzany jest w atmosferze powietrza w temperaturze 1100°C, w czasie 23 godzin. Po ochłodzeniu próbki poddawane są dalszym analizom.



Rysunek 7-4 Piec Mab FE-37 wykorzystany do testu utleniania.

Morfologia, topografia powierzchni oraz skład chemiczny zbadano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM-6490LA, wyposażonego w moduł dyfraktometrii roentgenowskiej. Badanie złądów metalograficznych wykonano przy pomocy mikroskopu Keyence VHX-7000.

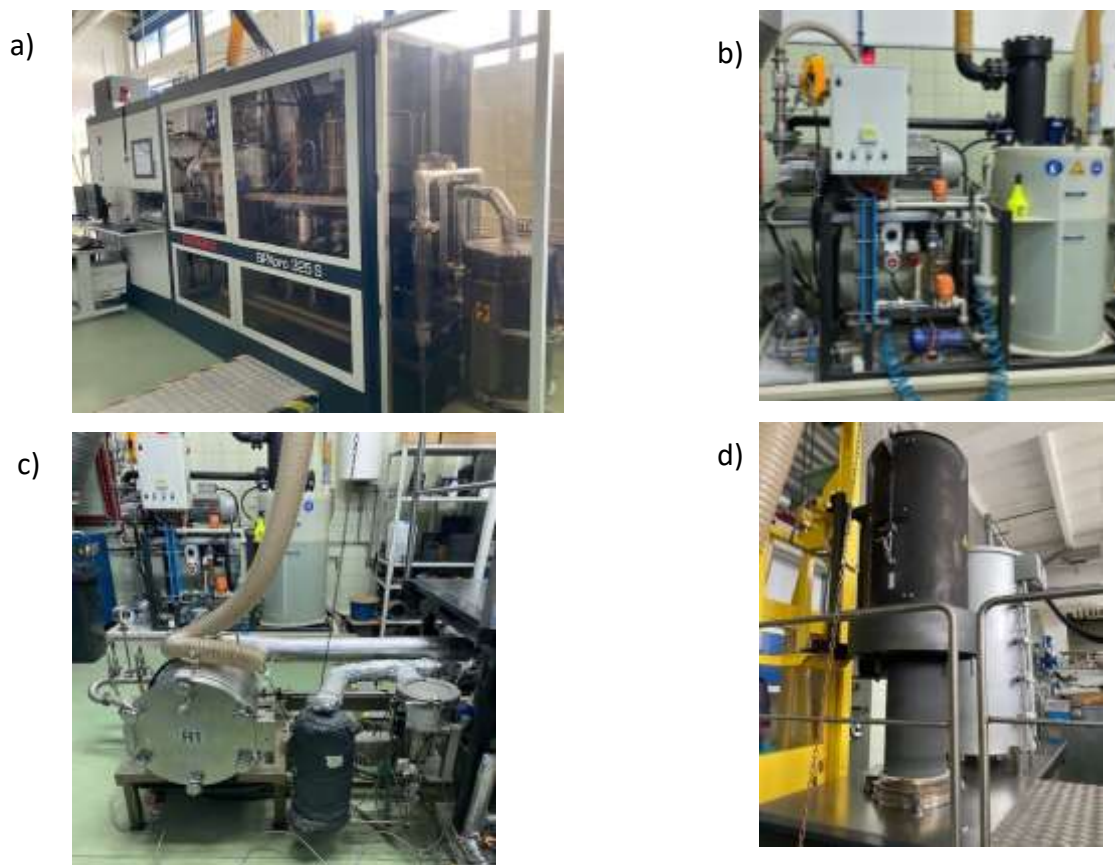
Do badania składu fazowego powłoki użyto dyfraktometru Brucker AXS D8 Discover. Urządzenie wykorzystuje katodę CuK_α pozwalającą uzyskać wiązkę o długości fali $\lambda=0.154$ nm. Do analizy strukturalnej warstwy wierzchniej wykorzystano dyfrakcję roentgenowską z małym kątem padania (graze incidence x-ray diffraction, GIXRD). System wyposażony jest w paraboliczne lustro Göbel'a i standardową linię ostrości (conventional line Focus Cu radiation tube) (40kV/40mA). Kąt padania wnosił 2° przy kącie 2θ zmieniającym się w zakresie od 20° do 120° z krokiem 0.025° .

Adhezja warstwy badana była przy pomocy testu rysy który wykonano urządzeniem CMS instruments RST wyposażonym w sferyczny indenter o średnicy $200\ \mu\text{m}$. Testy wykonano przy obciążeniach: 5N, 20N, 40N, 60N, 80N, 100N oraz 200N. Wszystkie wykonane były dla tej samej długości rysy: 4mm. Badanie krzywych akustycznych pozwala na określenie punktu LC3 w którym następuje delaminacja warstwy. Dla prawidłowej interpretacji konieczne jest potwierdzenie wniosków z analizy krzywych akustycznych ze zdjęciami rys.

Do badania głównego wykonano próbki z dwóch materiałów: Inconel 718, oraz Rene N515. Każda z próbek była oznaczona numerem seryjnym. Otwory wykonane zostały dwoma zestawami paramentów- o niskiej energii (200J)- i niskim Ton (30ms) oznaczone jako otwory X oraz o wysokiej energii (410J) i wysokim Toff (60ms) oznaczone jako otwory Y. Na jednej płytce umieszczono dwie próbki w każdej po 14 otworów- naprzemiennie X i Y. Po drążeniu płytka była cięta na pile precyzyjnej. Schemat próbki pokazany jest na Rysunku 7-6.

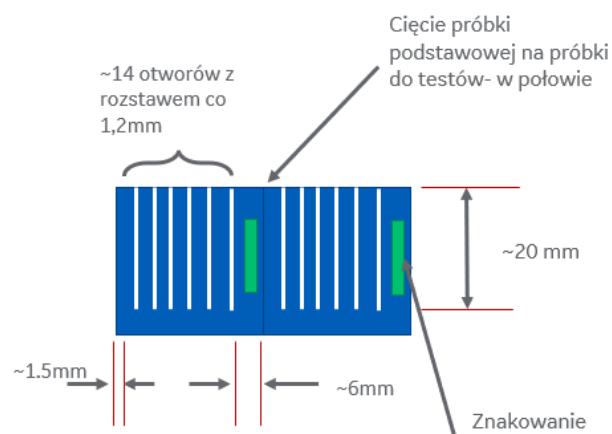
Powłoka aluminidkowa wykonane zostało we wspomnianym już zakładzie Avio Polska oraz z w Uczelniane Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego. W tym ostatnim wykonano powłoki w technologii CVD co ostatecznie pozwoliło porównać wpływ obróbki elektro

erozyjnej na powłoki wykonywane różnymi technologiami. Instalacja CVD Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej pokazana jest na Rysunku 7-5



Rysunek 7-5 Systemu BERNEX BPX Pro325S do realizacji procesu CVD: a) sterowanie wraz z generatorami zewnętrznymi (w tym AlCl₃) b) neutralizator HCl c) chłodnica i osadnik AlCl₃ oraz dodatkowy generator Hf/Zr d) retorta pieca z dzwonem chłodzącym, w tle piec kołpakowy.

Schematyczny wygląd próbki pokazany jest na Rysunku 7-6.



Rysunek 7-6 Schemat próbki użytej do testu głównego

Prawidłowe przeprowadzenie badań wymagało przygotowania planu opisującego typ próbek, kolejność ich testowania oraz analizy. Takie podsumowanie pokazano w Tabeli 7-3.

Tabela 7-3 Opis wykorzystanych w badaniu próbek.

Nazwa	IN718	N515	EDM	VPA	CVD	Met	Oksydacja [h]			
							48	120	192	264
AR1C		X	X		X					
AR2C		X	X		X	X				
AR3C		X	X		X		X			
AR4C		X	X		X			X		
AR5C		X	X		X				X	
AR6C		X	X		X					X
AI1C	X		X		X					
AI2C	X		X		X	X				
AI3C	X		X		X		X			
AI4C	X		X		X			X		
AI5C	X		X		X				X	
AI6C	X		X		X					X
AR2V		X	X	X		X				
AR3V		X	X	X			X			
AR4V		X	X	X				X		
AR5V		X	X	X					X	
AR6V		X	X	X						X
AI2V	X		X	X		X				
AI3V	X		X	X			X			
AI4V	X		X	X				X		
AI5V	X		X	X					X	

Po wytworzeniu powłok płytki umieszczone zostały na 4 stojakach a następnie w piecu skąd wyjmowane po upływie czasu określonego w Tabeli 7-3.

a)

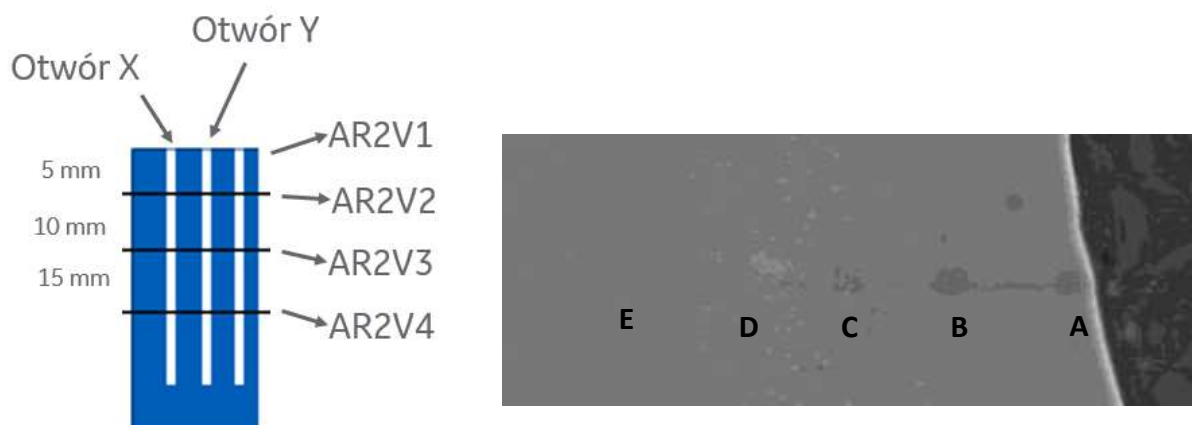


b)



Rysunek 7-7 a) próbki ustawione na stojaki b) próbki w piecu przed rozpoczęciem testu.

Utlenione detale zainkludowano w żywicy termoutwardzalnej po czym poddano szlifowaniu i polerowaniu. Pomiary na płytkach wykonywane były w 4 przekrojach: 1...4. Przekroje wykonywane były co 5mm- schemat pokazany jest na Rysunku 7-8 W wybranych otworach X i Y analizowano skład w pięciu punktach A...E.



Rysunek 7-8 Schemat położenia przekrojów na próbce oraz lokalizacja punktów pomiarowych na przekroju.

Pomiary składu chemicznego spisywane były w plikach tekstowych o określonych nazwach, odpowiadających konkretnym przekrojom i punktom pomiarowym. Przykładowo AI2V1YE.txt jest wynikiem pomiaru dla płytki wykonanej z Inconel 718, z powłoką wykonaną w procesie VPA, przekrój 1, otwór Y i punkt pomiarowy E. Opis nazwy pliku pomiarowego pomiaru pokazany jest na Rysunku 7-9.



Rysunek 7-9 Opis nazwy pliku z wynikami pomiarowymi.

Usystematyzowana akwizycja danych pozwoliła na zaimportowanie wszystkich plików do systemu bazodanowego CoolBox-DMES. Analiza danych dla badania głównego wykonana została w systemie BI firmy Tibco, SpotFire.

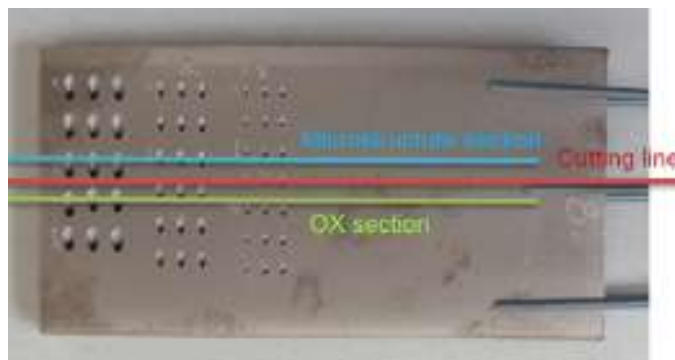
7.2. Badanie wstępne

Pierwszy z testów przeprowadzony został na pojedynczej próbce testowej wykonanej ze stopu Inconel 718 wykorzystywanej w badaniach nad elektrodrażeniem. W płycie wykonano trzy serie otworów. Średnice otworów zostały pomierzone. Przykład skanu otworu oraz ciągłego zapisu średnic dla kolejnych otworów prezentowane są na Rysunku 7-10.



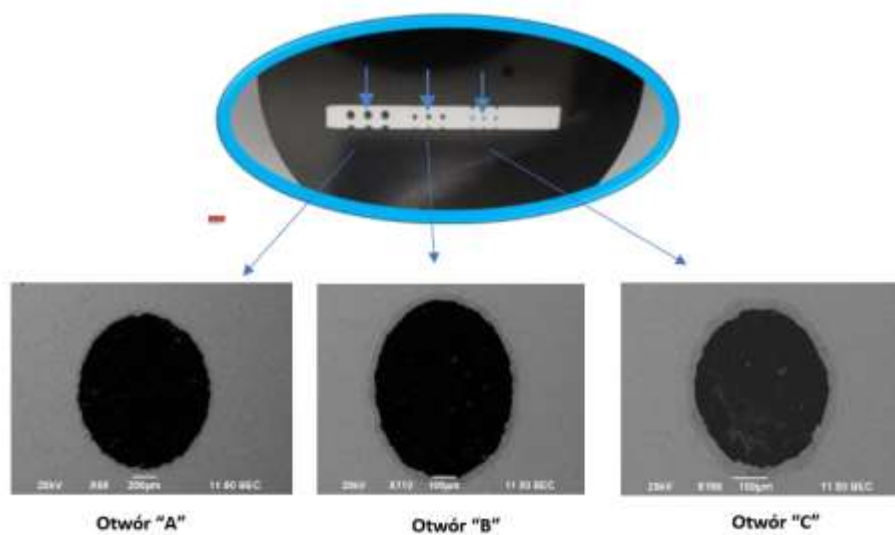
Rysunek 7-10 Przykład skanu wykonanego otworu oraz pomiary dla kolejnych pól.

Pierwszym zrealizowanym testem była weryfikacja powłoki otworów o różnych średnicach. Na próbce, w której wykonano trzy pola otworów o różnych średnicach wytworzono w procesie VPA powłokę aluminidkową. Proces trwał 6 godzin w temperaturze 960°C. Następnie połowę detalu poddano procesowi utleniania atmosferycznego. Przez 23h próbka w temperaturze 1100°C poddawana była działaniu atmosfery powietrza. Na Rysunku 7-11 pokazano próbkę po wykonaniu powłoki.

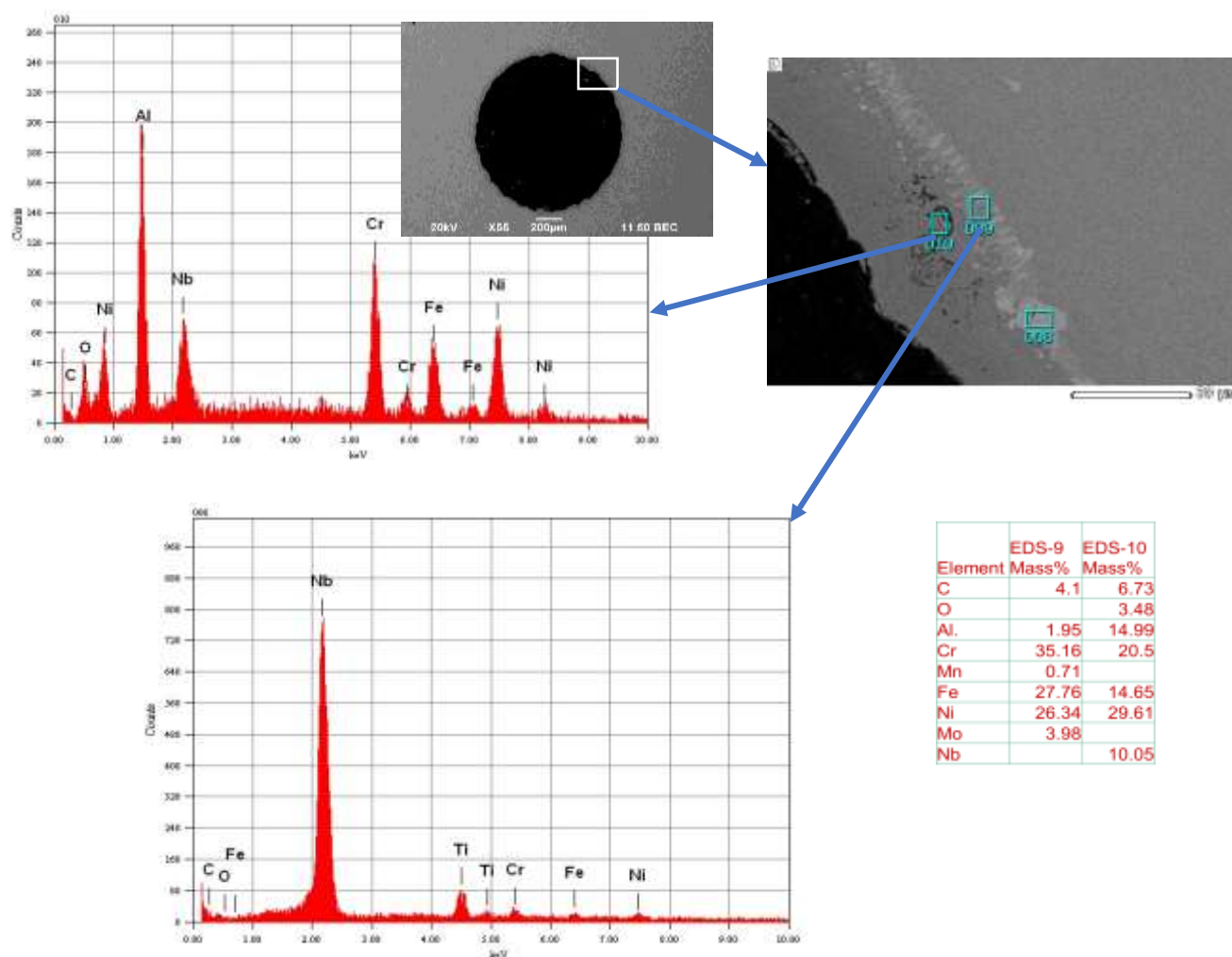


Rysunek 7-11 Próbka A-88 po wykonaniu powłoki aluminidkowej technologią VPA

Po wykonaniu zglądu metalograficznego otrzymano przekrój prostopadły próbki z widocznymi otworami. Powierzchnia była szlifowana i polerowana- nie poddano jej trawieniu. Wykonano analizę składu chemicznego wybranych lokalizacji na obwodzie otworów. Do badań użyto mikroskopu JEOL JSM-6490LA



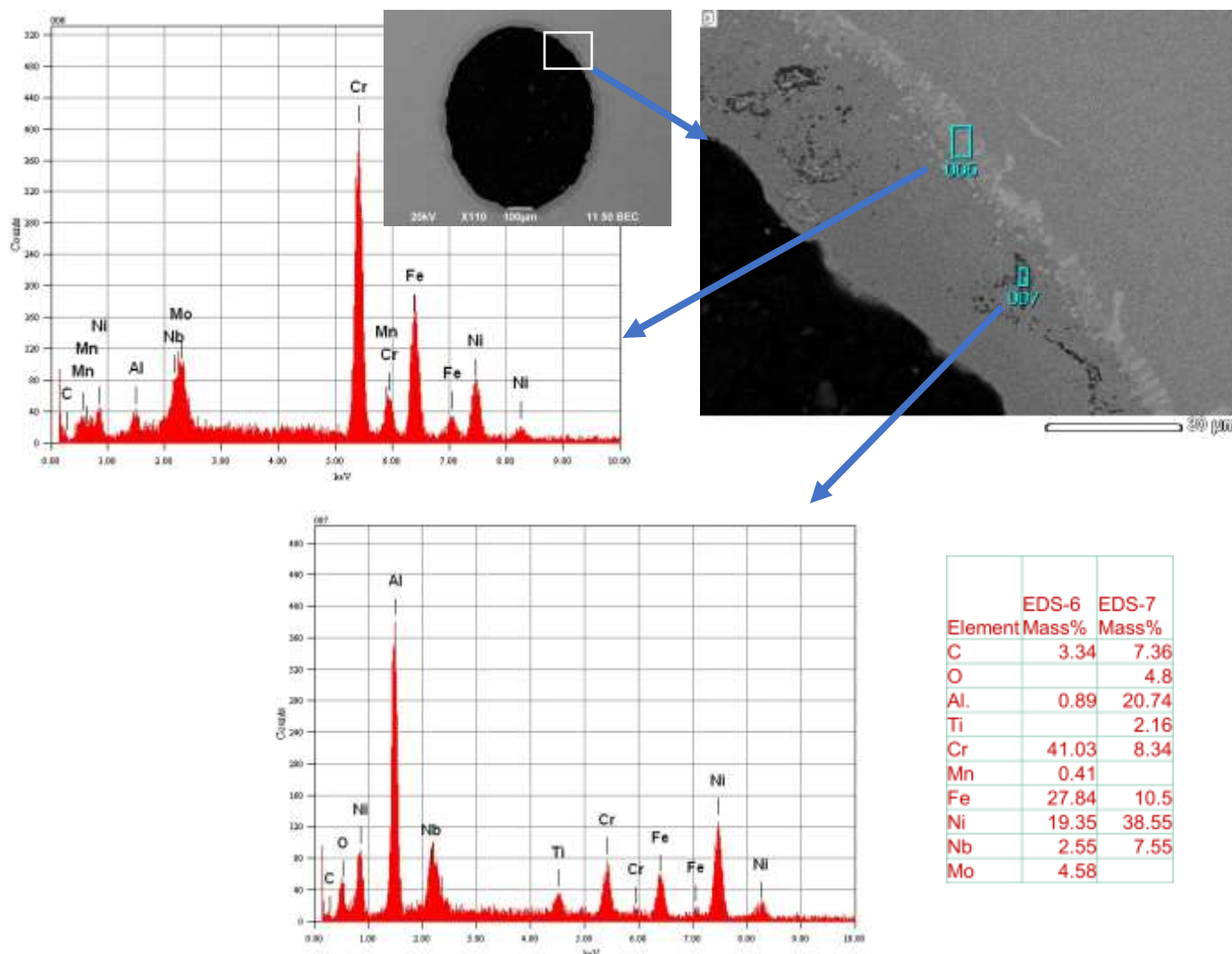
Rysunek 7-12 Wypolerowany zgląd oraz powiększenia otworów A, B i C.



Rysunek 7-13 Widok zglądu metalograficznego otworu „A” oraz powiększenie warstwy zmienionej wraz z analizą składu.

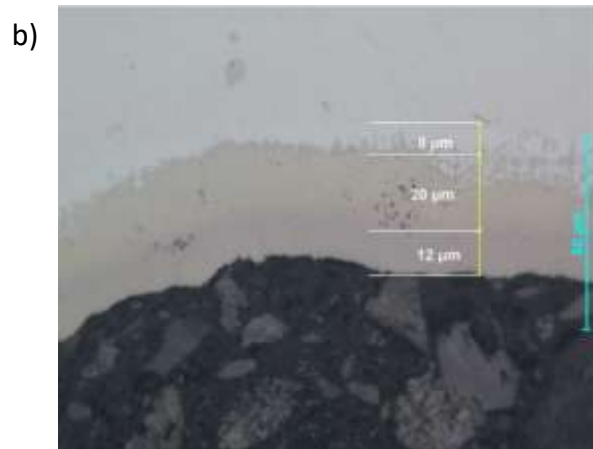
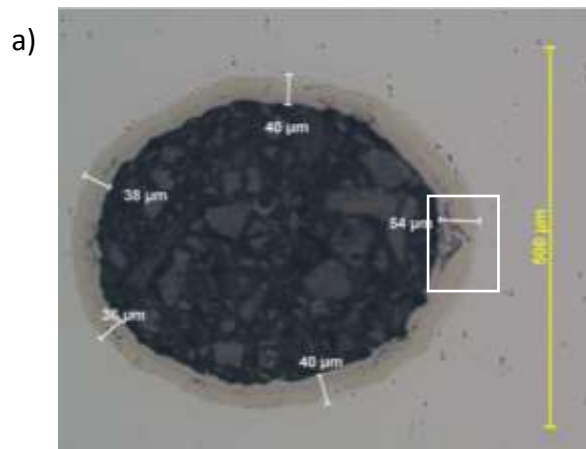
Otworki określone jako „A” wykonane zostały techniką wierszowania elektroerozyjnego. Średnia średnica dla wykonanych otworów wynosi przed naniesieniem powłoki wynosiła 1.08mm przy odchyleniu standardowym w populacji 0.024mm.

Analizie poddano obszar z wyraźnymi wtrąceniami w warstwie nabudowanej. Obszaru „10” zwiera glinu oraz tlen co sugeruje obecność Al_2O_3 . Strefa dyfuzyjna poniżej obszaru wtrąceń wykazuje niski poziom glinu. Bardzo wysoki poziom Nb wynika prawdopodobnie z segregacji tego pierwiastka w tej warstwie. Jest to zgodne z badaniami Zielinskiej (10) .



Rysunek 7-14 Widok zgładu metalograficznego otworu „B” oraz powiększenie warstwy zmienionej wraz z analiza składu.

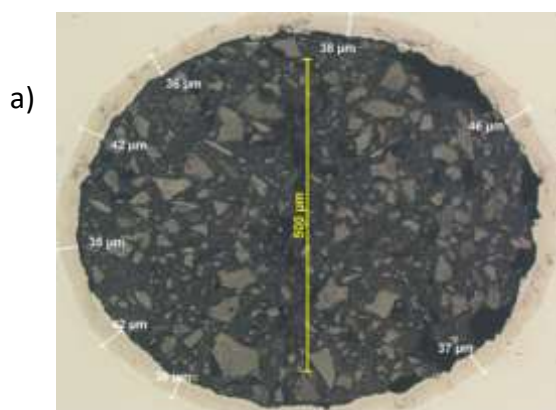
Podobnie jak w otworach „A” w zbadanych otworach wyraźnie widać dwie warstwy powłoki: nabudowaną oraz dyfuzyjną. Warstwa nabudowana posiada widoczne wtrącenia, niektóre posiadają niejednorodne wnętrza. Obszary te zawierają zarówno glin jak i tlen. Analiza EDS pokazała, że warstwa dyfuzyjna zawiera relatywnie mało glinu.



Rysunek 7-15 a) pomiar grubości warstwy w otworze „A” oraz b) warstw składowych.

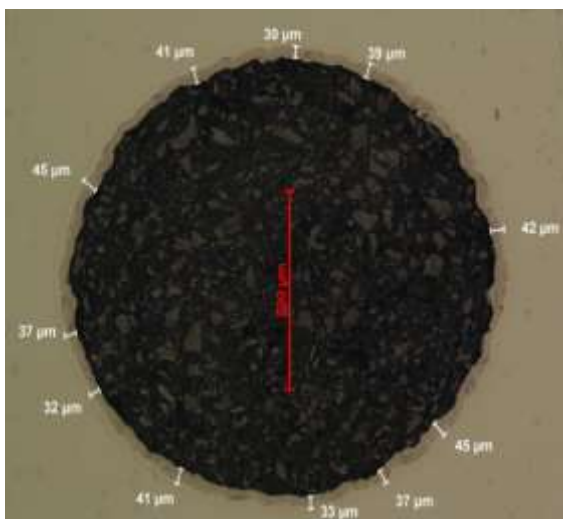


Rysunek 7-16 Powiększenie zanieczyszczenia powłoki zaznaczonego na Rysunku 7-15.



Rysunek 7-17 Przekrój otworu typu „B” drążonego elektrodą 0.4mm; a) widok ogólny b) zanieczyszczenia warstwy.

a)

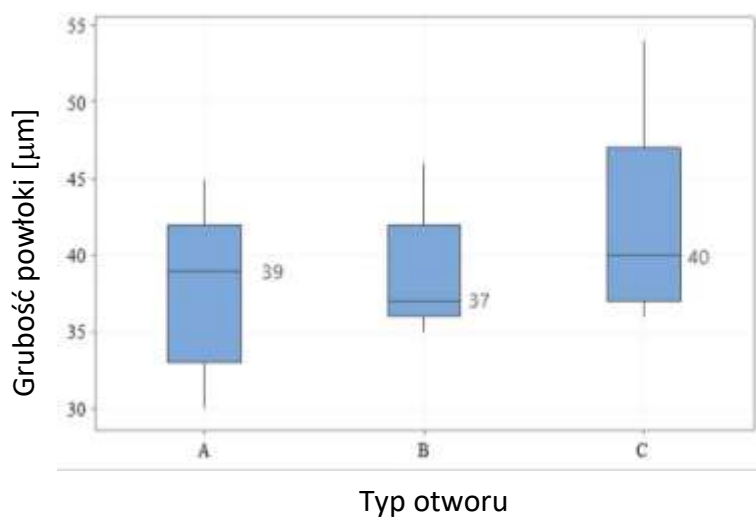


b)



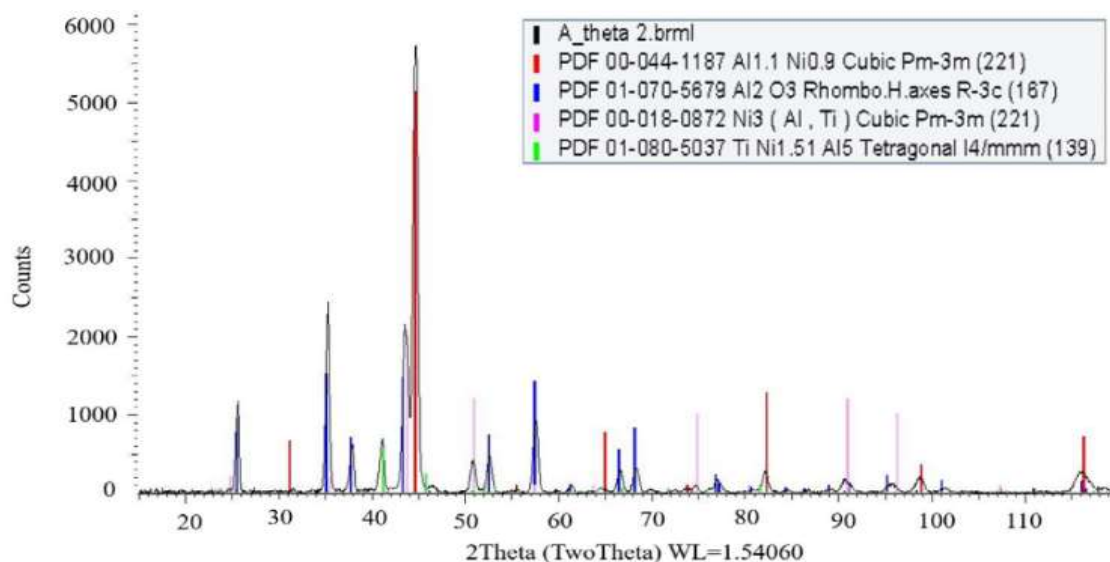
Rysunek 7-18 Przekrój otworu typu „c” wierszowanego elektrodą 0.4mm; a) widok ogólny b) zanieczyszczenia warstwy.

Pomiary grubości powłoki pokazane na Rysunkach 7-15, 7-17 oraz 7-18 porównano a wynik przedstawiono na Rysunku 7-19.



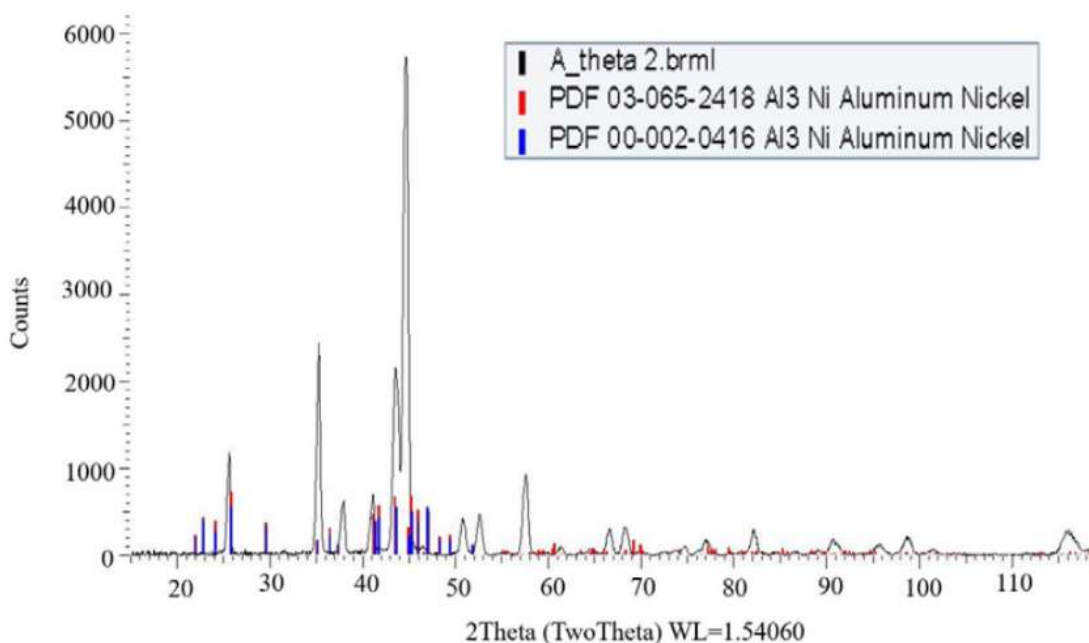
Rysunek 7-19 Porównanie grubości warstw dla otworów A, B oraz C.

Weryfikacja składu fazowego wykonana została dyfraktometria rentgenowska. Wykonano szczegółową analizę przeprowadzono dla 2°.



Rysunek 7-20 Analiza fazowa powierzchni próbki z użyciem markera Al_2O_3

Analiza składu fazowego powłoki potwierdziła obecność tlenku glinu (Al_2O_3) oraz gliniku niklu (NiAl).

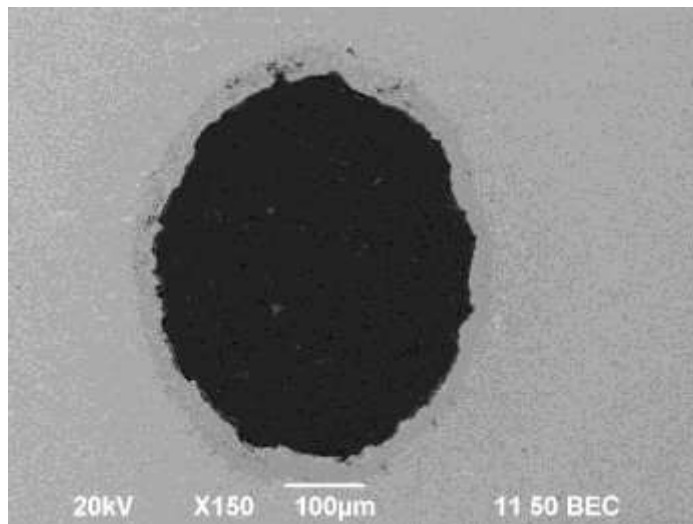


Rysunek 7-21 Analiza fazowa powierzchni próbki użyciem markera Al_3Ni .

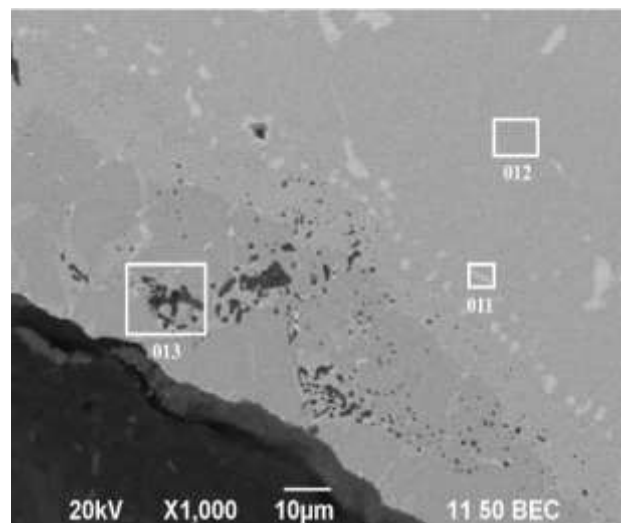
Analiza składu fazowego powłoki potwierdziła obecność niewielkiej ilości Al_3Ni .

Drugą część próbki poddano testowi oksydacyjnemu w temperaturze 1100°C. Wygrzewanie trwało 23 godziny. Próbkę następnie poddano badaniu metalograficznemu, SEM. Podczas badania metalograficznego zidentyfikowano zmiany w strukturze powłoki dla wszystkich trzech średnic. Powierzchnia powłoki była dużo bardziej nierówna- wyraźnie widać obszary o obniżonej grubości oraz lokalne wżery korozyjne. Widać to na poniższym Rysunku 7-22 otworu o najmniejszej średnicy.

a)

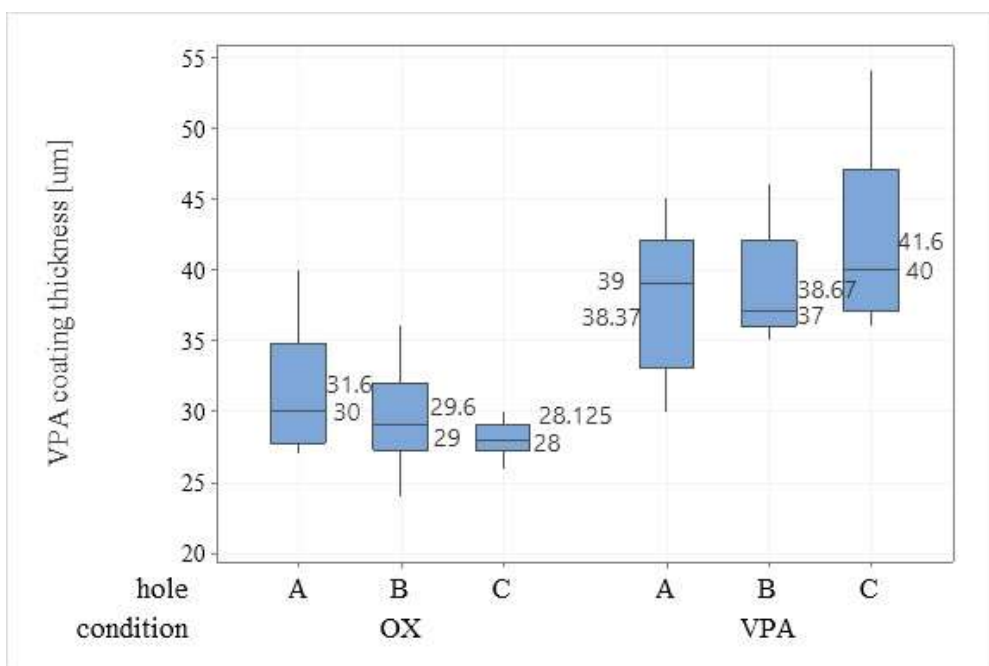


b)



*Rysunek 7-22 a) przekrój otworu A o najmniejszej średnicy. Widoczna jest degradacja warstwy;
b) zbliżenie na powłokę w miejscu występowania defektu.*

Wskazana na Rysunku 7-22 strefa 13 zawiera ponad 40% wagowych aluminium i tlenu. W strefie 11 zaobserwowano koncentrację niobu (Nb)- formacje TCP (ang. *Topologically Closed Pack*) nie były obserwowane podczas badań poprzedzających test oksydacyjny. Pomiar powłoki przed i po teście oksydacyjnym wykazał spadek grubości powłoki dla wszystkich trzech typów otworów. Największa zmiana mediany oraz wartości średniej zaobserwowana została dla otworów o najmniejszej średnicy i wyniosła 12 µm.



Rysunek 7-23 Pomiar a) oraz zestawienie wyników grubości powłoki dla próbki przed i po teście oksydacyjnym.

Tabela 7-4 Zestawienie pokazujące średnią grubość warstwy po wykonaniu, po utlenianiu oraz zmianę procentową.

Typ otworu	Grubość powłoki [μm]	Grubość warstwy po utlenianiu [μm]	Zmiana [%]
A	38	32	18
B	39	30	23
C	42	28	32

7.3. Wnioski z badania wstępnego

Badania potwierdziły możliwość wytworzenia powłoki aluminidowego w procesie VPA w otworach o różnych średnicach. Grubość powłoki była zgodna z przyjętymi limitami. Widoczne są zanieczyszczenia. Prawdopodobnie pochodzą one z procesu drążenia elektroerozyjnego. W badaniu XRD: zidentyfikowano NiAl, Ni₃Al oraz Al₂O₃. Test utleniający w widoczny sposób wpłynął na powłokę. Grubość powłoki uległa zmniejszeniu dla wszystkich analizowanych otworów. Największą redukcję grubości stwierdzono w otworach o najmniejszej średnicy i wyniosła ona 32%.

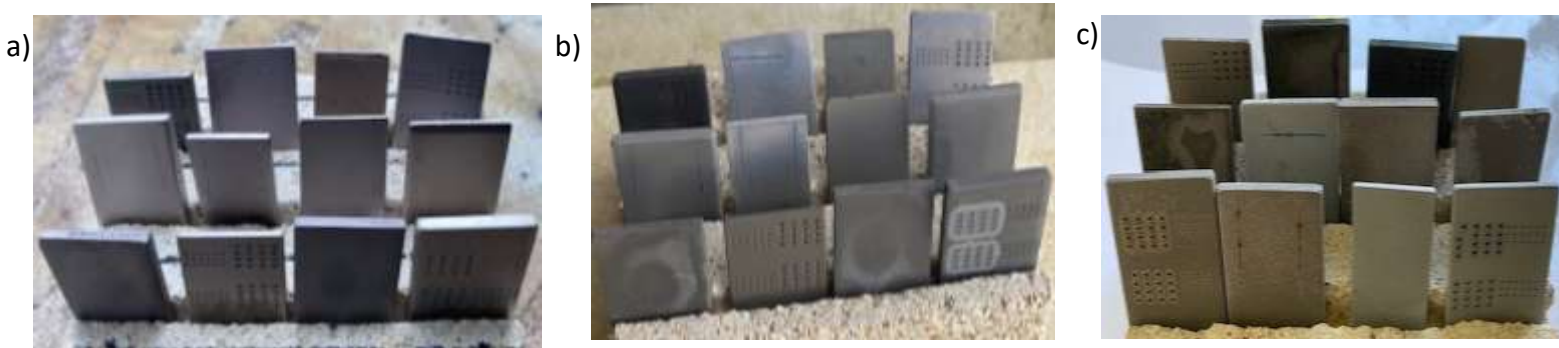
Do kolejnego etapu badań wykorzystano dodatkowo próbki z stopu monokrystalicznego N515 oraz wykonano powłoka w technologii CVD.

8. Badanie zmiany składu chemicznego w drążonych otworach

Celem badania było znalezienie odpowiedzi na następujące pytania:

- jak zmienia się zawartość glinu w otoczeniu otworu podczas długotrwałego testu oksydacyjnego?
- jaki wpływ na zawartość glinu w otoczeniu otworu ma głębokość otworu?
- czy na odporność porycia mają wpływ parametry drążenia elektroerozyjnego?

Przeprowadzone badanie pozwoliło na zebranie bardzo obszernego zbioru danych. Przygotowano w sumie 22 detale- zarówno ze stopu Inconel 718 jak i Rene N515. Ze względu na ilość materiałów, do celów tej pracy zdecydowano się wykorzystać jeden materiał (Rene N515). Otwory wykonane zostały dwoma zestawami paramentów- o niskiej energii (200J)- i niskim Ton (30ms) oznaczone jako otwory X oraz o wysokiej energii (410J) i wysokim Toff (60ms) oznaczone jako otwory Y. Pomiary wykonano na powierzchni oraz w odległości 5mm, 10,mm oraz 15mm od powierzchni w czterech punktach pomiarowych (Rysunek 7-8). Analizę składu chemicznego przeprowadzono dla trzech pierwiastków: glinu, niklu oraz tlenu. Wykorzystanie badania grawimetrycznego dla analizy korozji w otworze nie jest możliwe. Wygląd próbek w chwili rozpoczęcia testu, po 48 godzinach i po 264 przedstawiono na Rysunku 7-24.

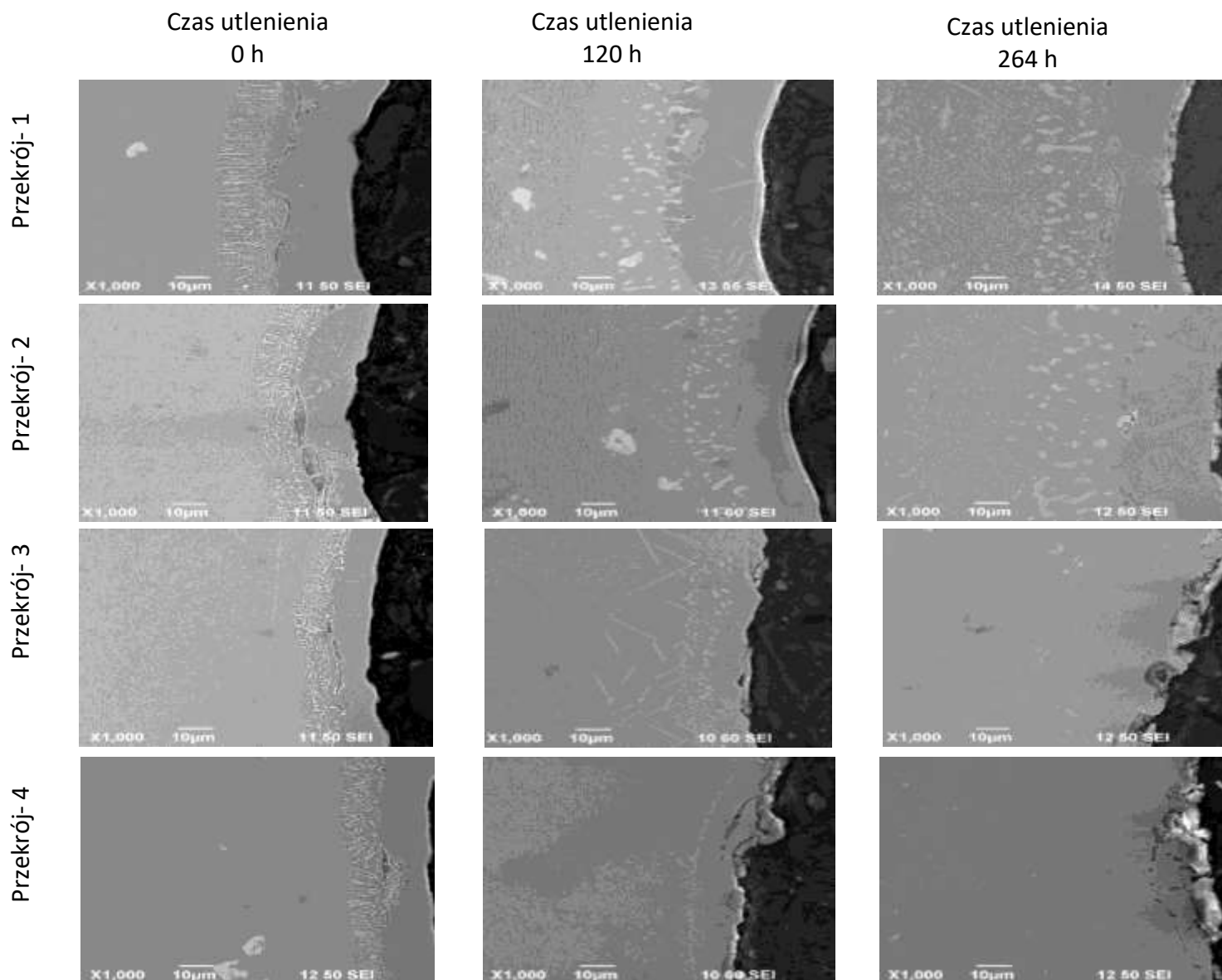


Rysunek 7-24 a) próbki przed testem b) po 48 godzinach c) po 264 godzinach

Po wyjęciu i ostudzeniu próbki zostały zmagazynowane a następnie po kolei poddawane były analizom.

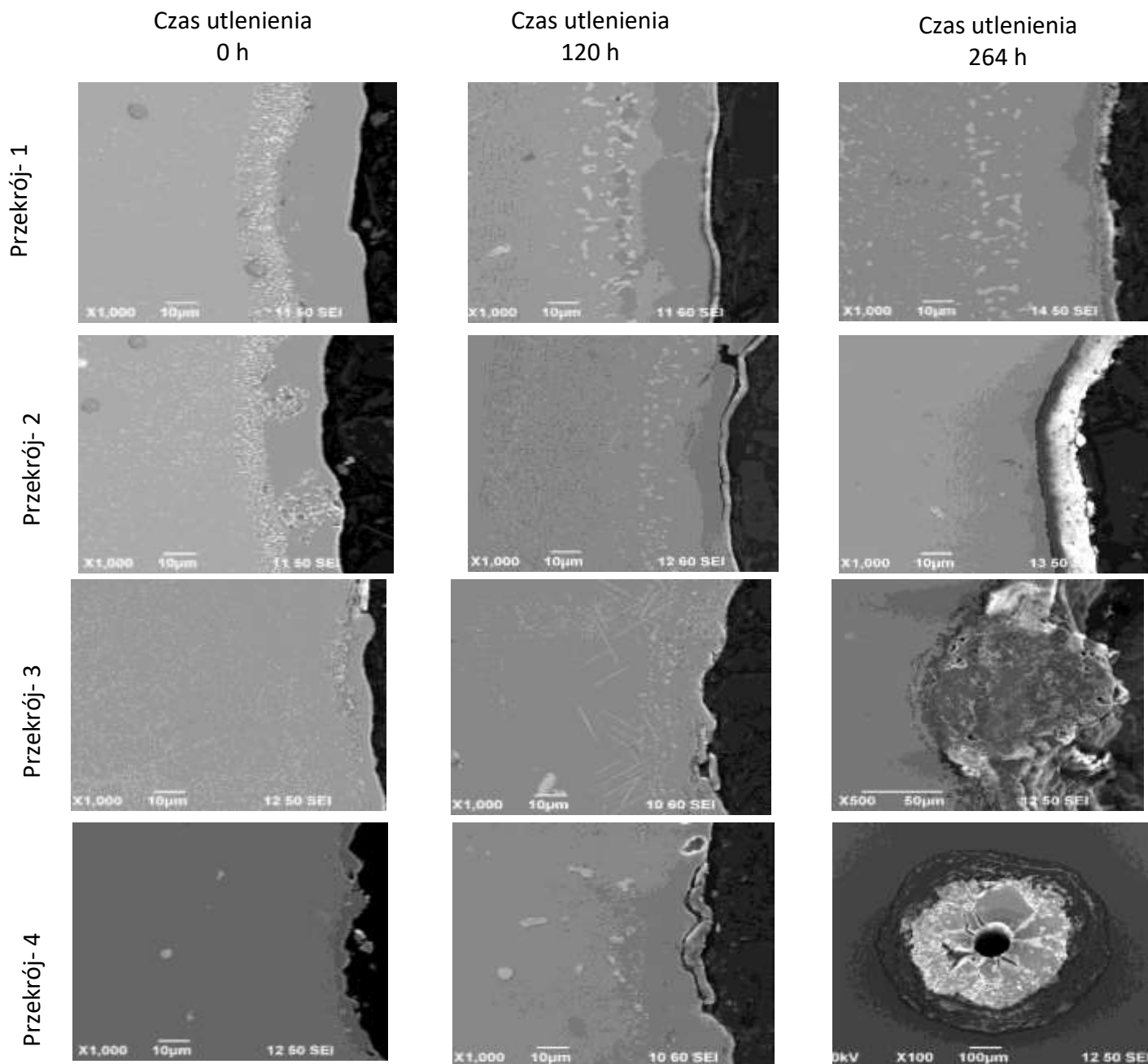
8.1. Mikrostruktura i skład chemiczny przed i po procesie utleniania

Analiza zmian w powłoce przeprowadzona została na podstawie obserwacji mikrostruktury oraz zmian udziału masowego trzech pierwiastków: glinu (Al), niklu (Ni) oraz tlenu (O).



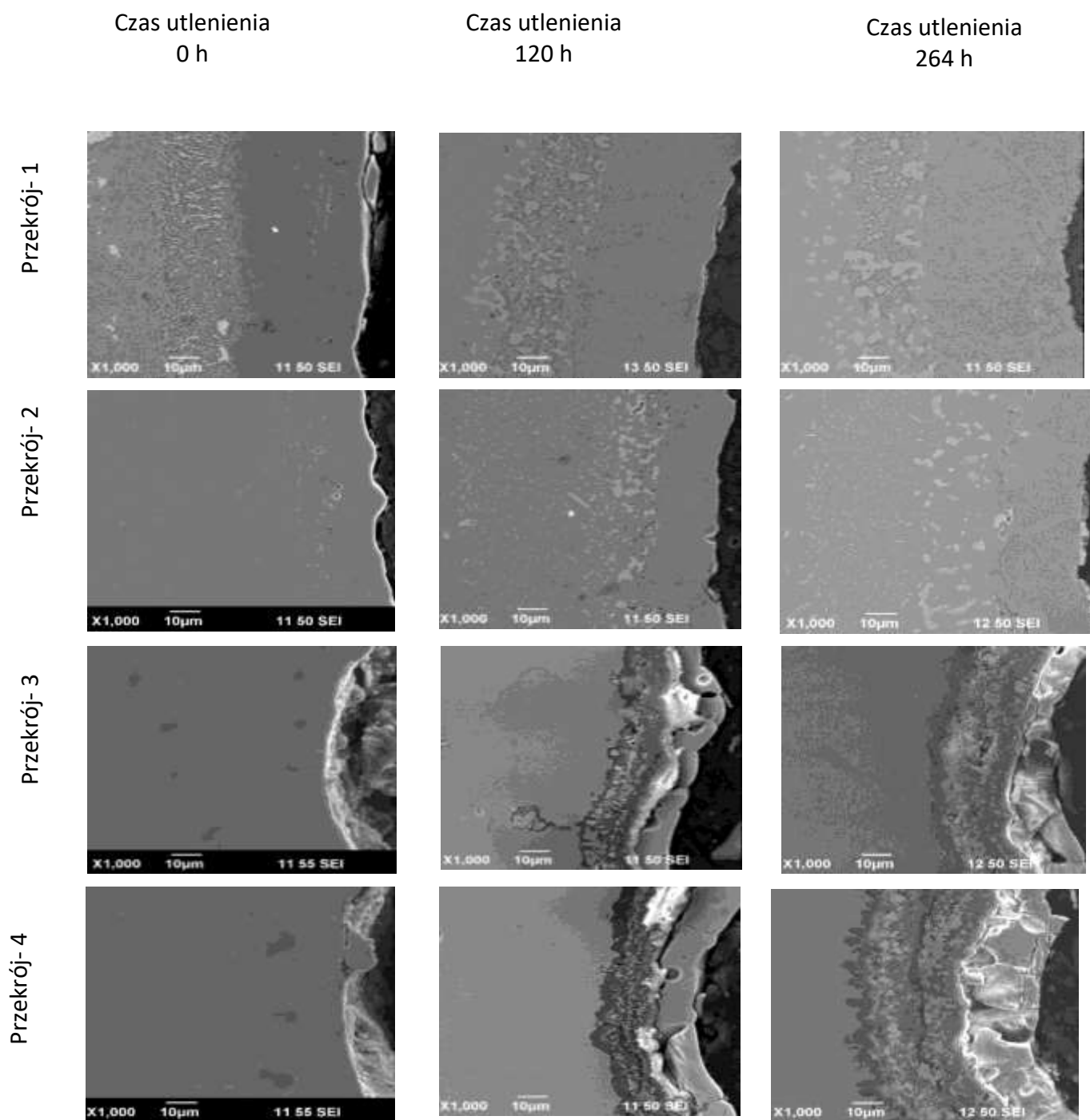
Rysunek 7-25 Mikrostruktura powłoki CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o małej energii (X).

Punktem odniesienia był wygląd przekroju powłoki nieutlenionej. Powłoki dla przekroju nr 1 ma największą grubość. Mikrostruktura odpowiada procesowi o wysokiej aktywności (71). Grubość powłoki zmniejsza się wraz z głębokością otworu. Utlenianie skutkuje pojawieniem się na powierzchni rozbudowanej warstwy tlenków.



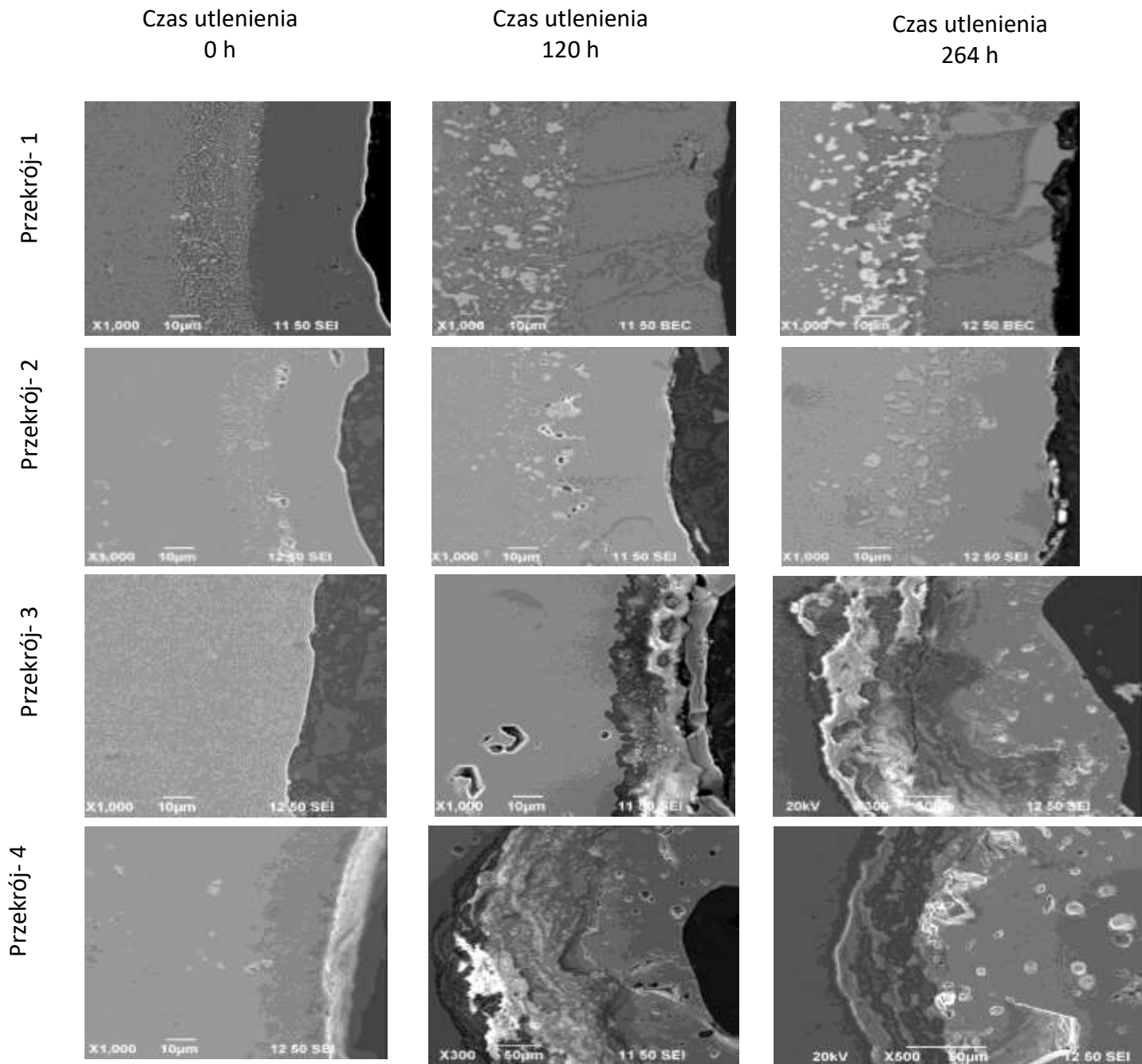
Rysunek 7-26 Mikrostruktra powłoki CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 264 godzin dla otwory wykonanego parametrami o dużej energii (Y).

Degradacja pokrycia w porównaniu do mikrostruktur pokazanych na Rysunku 7-26 przebiega zauważalnie szybciej. Po 264 godzinach otwór w przekroju 4-tym był prawie całkowicie wypełniony produktami utleniania. Podwyższenie parametrów energetycznych drążenia skutkuje wzrostem szybkości utleniania powłoki.



Rysunek 7-27 Zmiana powłoki VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o małej energii (X).

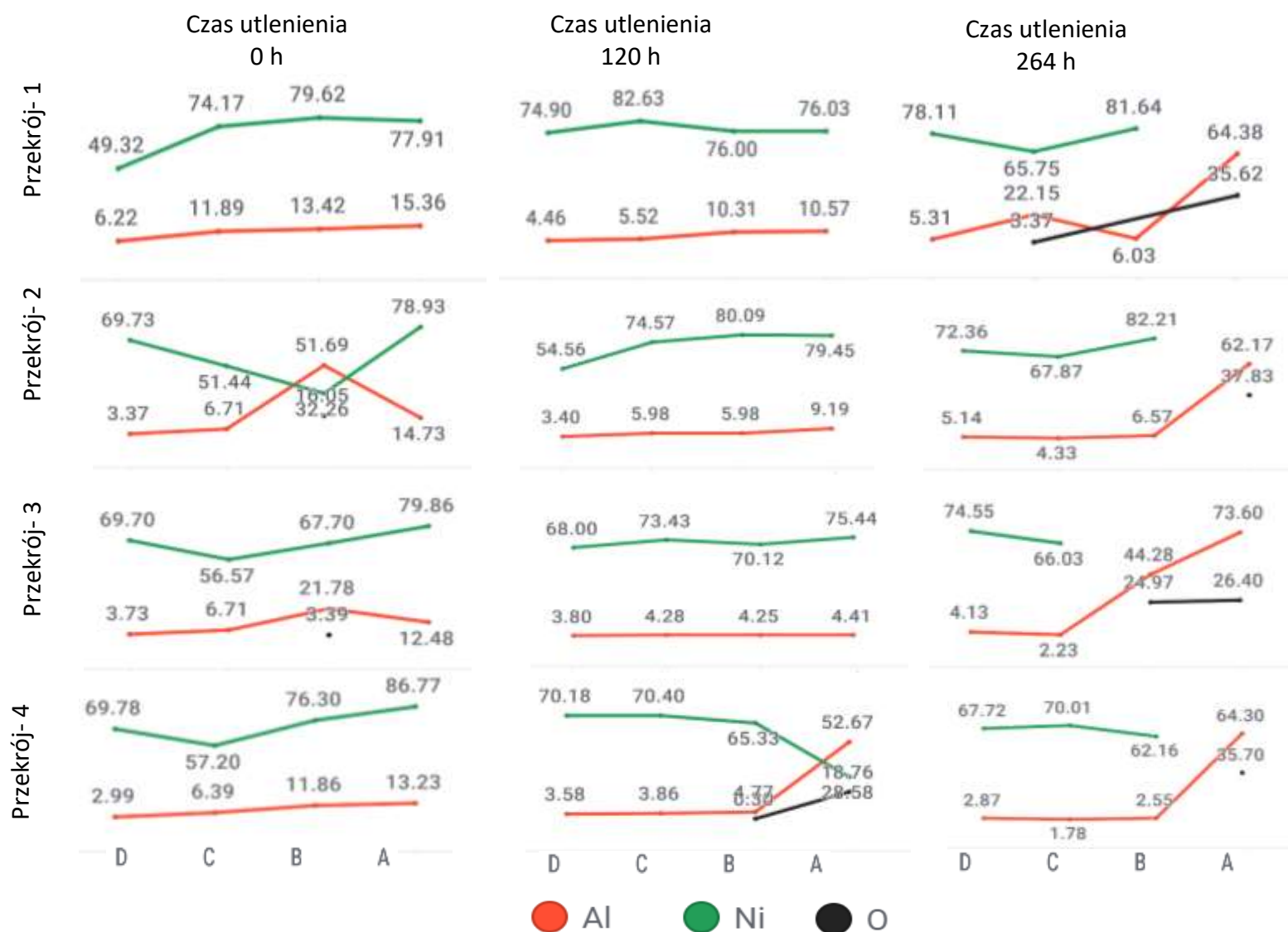
Powłoka otrzymana w procesie VPA jest znacznie grubsza w porównaniu do powłoki uzyskanej w procesie CVD. W pierwszym przekroju odpowiednio $\sim 40\mu\text{m}$ vs $\sim 20\mu\text{m}$. Jednak nie obserwuje się jej na większych głębokościach (przekroje 3 i 4)



Rysunek 7-28 Zmiana powłoki VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).

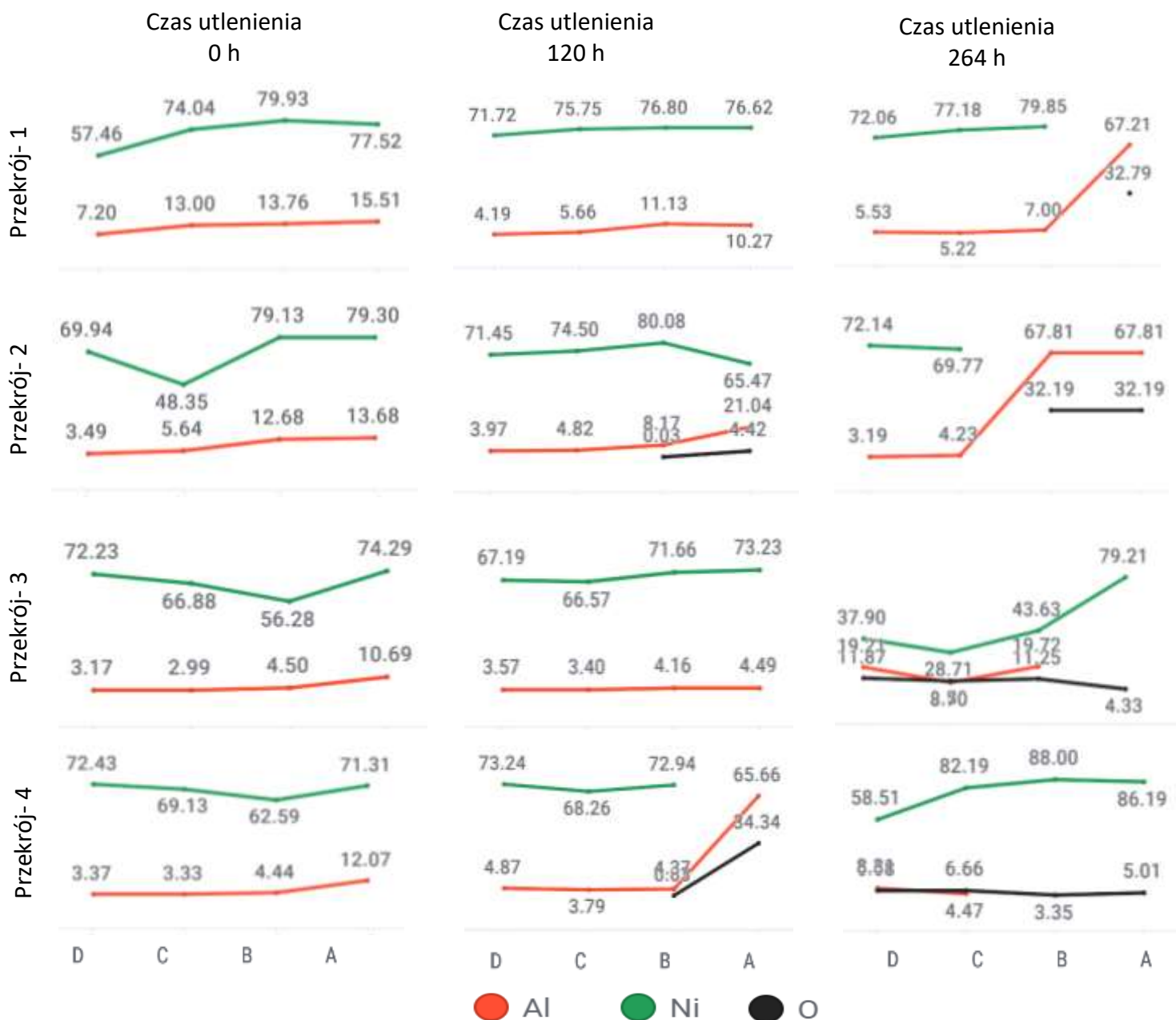
Degradacja pokrycia, porównując do mikrostruktur pokazanych na Rysunku 7-27, ma charakter bardziej zaawansowany- zwłaszcza dla przekroju 4 (głębokość 15mm). Tu także nie obserwuje się powłoki na większych głębokościach (przekroje 3 i 4).

W trakcie analizy, podczas której wykonano zdjęcia przekrojów, zbadano skład chemiczny powłok (% masy) w poszczególnych punktach pomiarowych, które pokazane są na Rysunku 7-8. W czasie pomiaru rejestrowano wszystkie występujące pierwiastki o zawartości znacząco większej niż błąd pomiaru. Dla przejrzystości analizy skupiono się na trzech: Ni, Al, O. Kolejność i schemat ułożenia wykresów jest analogiczny do schematu wykorzystanego dla zdjęć.



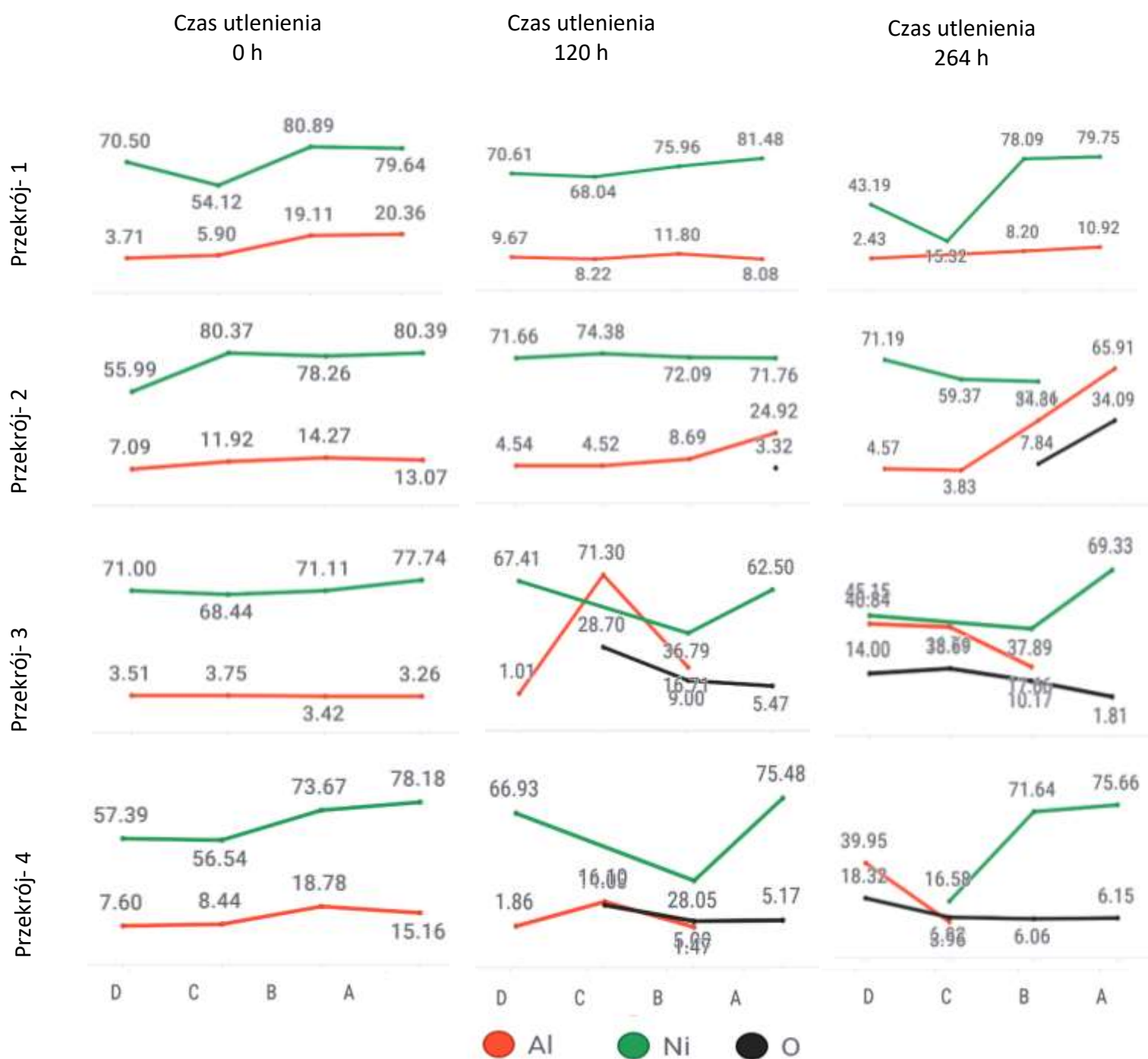
Rysunek 7-29 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o małej energii (X).

Pomiary są zgodne z analizą mikrostruktury. Powłoka uzyskana w procesie CVD wykazała się dużą odpornością na proces utleniania. Otwory drążono parametrami o małej energii. Tlen pojawia się w powłoce po 264 godzinach.



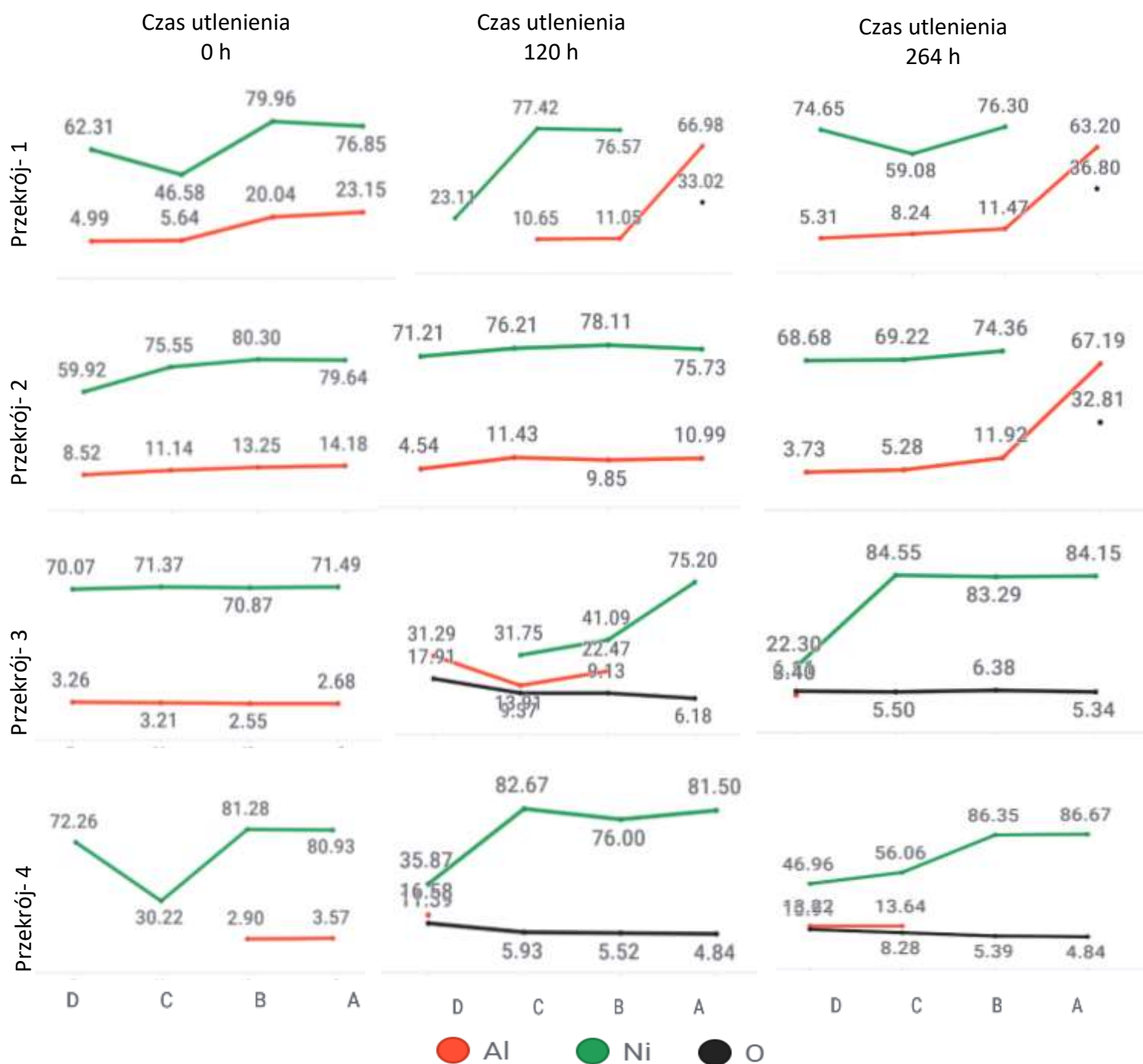
Rysunek 7-30 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 266 godzin dla otworu wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).

Próbki wykazują po 120 godzinach utleniania zbliżone wyniki do tych uzyskanych dla parametrów drążenia o małej energii.



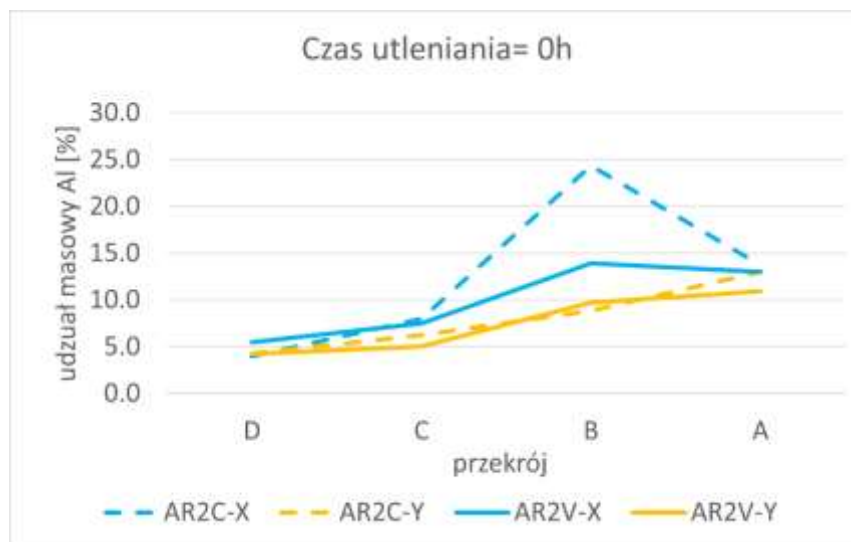
Rysunek 7-31 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o niskiej energii (X).

Analizowana powłoka również posiada dobrą odporność na utlenianie chociaż tlen można zauważyć już po 120 godzinach na przekroju 3 i 4.



Rysunek 7-32 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 266 godzin dla otworu wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).

W pierwszym przekroju tlen zarejestrowany został po 120 godzinach utleniania. Jego zawartość wynosi 33 %. Jednocześnie zawartość glinu to 68%- świadczyć to może o mocno rozbudowanych tlenkach glinu. Po 240 godzinach we wszystkich przekrojach obecny jest tlen.



Rysunek 7-33 Udział % masowy glinu (Al) uśredniony po wszystkich przekrojach dla poszczególnych punktów pomiarowych. Dla każdej prezentowanej krzywej w punkcie pomiarowym np. A zsumowano udziały masowe dla wszystkich przekrojów.

Zmiana wartości średnich procentowej masowej zawartości glinu w powłoce pokazana na Rysunku 7-33 wskazuje na parametry drążenia jako czynnik decydujący o zawartości glinu w przekroju. Zarówno powłoka osadzona metodą VPA jak i CVD ma wyższą zawartość glinu dla otworów drążonych parametrami o niskiej energii (X).

8.2. Podsumowanie oraz wnioski z badania głównego

Przeprowadzenie badań po procesie utleniania powłok aluminidkowych z wykorzystaniem dwóch metod badawczych- oceny wizualnej oraz pomiaru składu chemicznego dało możliwość na uzyskanie danych pozwalających na sformułowanie odpowiedzi na wcześniej postawione pytania. Zastosowanie powszechnie wykorzystywanej metody grawimetrycznej do analizy korozji wewnątrz otworów chłodzących nie było możliwe.

Zawartość glinu w otoczeniu otworu podczas testu oksydacyjnego uzależniona jest od kilku elementów. Czynnikiem wpływającym na mikrostrukturę powłoki jest zarówno głębokość otworu jak i technologia wykonania powłok oraz parametry drążenia elektroerozyjnego. Różnica w trwałości pomiędzy powłokami wykonanymi w technologii CVD a VPA jest zauważalna. Otwory pokrywane przy wykorzystaniu metody CVD zarówno te drążone impulsami o małej, jak i o dużej energii wykazały podobny udział masowy aluminium w pierwszym punkcie pomiarowym A. Zakres pomiaru wahał się od 15% dla przekroju 1 do 12-13% dla przekroju numer 4. Wykorzystując metodę VPA uzyskano powłoki o zawartości masowej glinu rzędu 20%, w porównaniu do powłoki otrzymanej metodą CVD (jest to 30% więcej). Jednocześnie powłoka ta nie powoduje podniesienia udziału masowego glinu w głębszych przekrojach 3 i 4. Zmierzony

poziom jest poniżej nominalnej zawartości glinu w stopie N515 (6.5%). Powłoki wykonane w technologii CVD wykazały podobny poziom zawartości masowej glinu we wszystkich przekrojach pomiarowych co wynikać może z wyższej aktywności glinu w tej technologii. Generator CVD wykorzystuje czysty glin podczas gdy w procesie VPA wykorzystano granulát stopu glinu z chromem. Ponieważ glin uwolniony ze związku metalicznego jest mniej aktywny- proces także zachodzi mniej dynamicznie. Proces taki określa się jako nisko aktywny (ang. low activity VPA).

Przeprowadzony eksperyment wykazał, że dla otworów ślepych o małych średnicach powłokę o wyższej odporności korozyjnej uzyskano w procesie osadzania metodą CVD. Dla tego procesu 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 jest w tym przypadku silniejszy niż wpływ technologii wykonywania pokrycia.

9. Podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych.

Przeprowadzona analiza literatury pokazała, że proponowana tematyka pracy jest aktualna a jej podjęcie było uzasadnione. Przeanalizowane zagadnienia: drążenie elektroerozyjne otworów jak i powłoki dyfuzyjne na bazie glinu są szeroko omawiane w literaturze technicznej. Szczegółowym analizom poddawano parametry obróbki elektroerozyjnej oraz ich wpływ na własności powierzchni oraz stabilność procesu. Wpływ parametrów na wybrane metryki takie jak prędkość usuwania materiału czy zużycie elektrody są częstymi tematami badań. Natomiast temat długofalowej stabilności procesu czy wpływu takich zmiennych jak wydatek wody, długość elektrody czy jej parametry fizyczne nie są przedmiotem badań. W trakcie badań nad procesem elektrodrążenia przeprowadzono około 200 testów, podczas których wydrążono łącznie ponad 30 tysięcy otworów. Pozwoliło to na zebranie bogatego doświadczenia, którego część wykorzystana została w niniejszej pracy. Efektem prac jest zrozumienie ograniczeń technologicznych oraz obszarów, w których proces wymaga dalszego rozwoju. Taki stan wiedzy umożliwi w przyszłości z jednej strony uwzględnienie tych ograniczeń w procesie projektowania nowych elementów, z drugiej umożliwi dalszy rozwój procesu.

Analiza powłok aluminidkowych, podobnie jak w przypadku procesu elektrodrążenia, jest tematem bardzo aktualnym. Przeprowadzane są badania nowych technik wytwarzania powłok czy domieszkowania ich metalami ziem rzadkich, które to podnoszą odporność korozyjną. Jak wykazano, istnieją obszary które ze względu na swój niszowy charakter nie były przedmiotem badań. Powłoki ochronne wytwarzane w otworach chłodzących są szczególnym zagadnieniem. Powierzchnia otworów podlega w trakcie obróbki elektroerozyjnej szeregowi zmian. Jak wykazano w przeglądzie literatury są to zarówno zmiany składu chemicznego, składu fazowego

jak i chropowatości powierzchni. Wpływ takiej obróbki, co wykazały zrealizowane badania mają wpływ na trwałość powłok.

10. Kontynuacja prac nad technologiami

Zrealizowane badania oraz analiza ich wyników wskazują na potencjalne obszary dalszego rozwoju omawianych technologii: drążenia elektroerozyjnego oraz powłok aluminidkowych. Rozważane modyfikacje mogą w istotny sposób wpłynąć na te procesy.

10.1. Badania drążenia elektroerozyjnego.

Szczegółowa analiza procesu elektrodrążenia w tym także przegląd prac naukowych sugerują kontynuację prac w następujących kierunkach:

- optymalizacja wydatku dielektryka płynącego wewnętrznym kanałem elektrody
- możliwość wytworzenia warstwy izolatora na powierzchni elektrody, oraz wpływ tej modyfikacji
- dodatkowa stabilizacja elektrod o średnicach mniejszych niż 0.3 mm
- rozwój narzędzi cyfrowych umożliwiających poprawę wykrywalności detekcji przebicia
- rozwój modelu numerycznego o model elektrohydrodynamiczny oraz o geometrię elektrody zużytej (zaigłowanej)

Jednym z widocznych w literaturze kierunków poprawy czy też zmiany procesu jest jego modyfikacja z czysto elektroerozyjnego do tzw. procesu hybrydowego. Do wody dejonizowanej dodawane są substancje (kwasy, sole) przekształcające ten proces w drążenie erozyjno-chemiczne. W takim przypadku jednocześnie następuje usuwanie materiału zgodnie z mechanizmem elektro- erozji poprzez topienie i odparowanie, a także przez rozczynianie elektro-chemiczne. Proces taki charakteryzuje się brakiem warstwy przetopionej.

10.2. Badania powłok aluminidkowych.

Ze względu na prostotę i stabilność najczęściej wykorzystywanym procesem do produkcji powłok aluminidkowych jest proces **VPA**. Umożliwia on wykonywanie **powłok** na dużej ilości części jednocześnie. Ograniczeniem tego procesu jest ograniczona możliwość modyfikacji. Wprowadza się pewne rozwiązania, które pozwalają na częściowe wymuszenie przepływu par w czasie procesu. Jest to element niezbędny, jeżeli konieczne jest wykonanie powłok na ściankach kanałów wewnętrznych. Niemniej proces ten nie umożliwia skutecznego domieszkowania powłoki pierwiastkami aktywnymi (Hf, Zr, Y, Re) co jak pokazują badania jest jednym z głównych obszarów obecnie prowadzonych badań. Zasadna zatem **byłaby** technologia **CVD**

11. Publikacje autora

1. M. Trajer, Ł. Pyclik, J.R. Sobiecki, The nickel aluminide coatings obtained on small holes produced by EDD method, *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 68(2022)10, 623-634, DOI:10.5545/sv-jme.2022.169
2. M. Trajer, A. Czeszkiewicz, M. Machno, Analysis of the Relationship between the Properties of Selected Materials and the Parameters of the EDD Process, *ESAFORM 2023*
3. M. Machno, M. Trajer, W. Bizoń, A. Czeszkiewicz, A Study on Accuracy of Micro-Holes Drilled in Ti-6Al-4V Alloy by Using Electrical Discharge Machining Process, *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, 2022, DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/155224>

12. 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 elektrodrążeniem 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 aluminidkowej. 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 aluminidkowej w procesie VPA. Próbką 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 aluminidkowej 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.

13. 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.

14. Literatura

1. **The Technical Publications Department.** *The Jet Engine*. Derby, UK : Rolls-Royce plc, 1988. ISBN 0902121 235.
2. *Evolution of turbine cooling.* **Bunker Ronald S.** Charlotte, NC, USA : Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017. <https://doi.org/10.1115/GT2017-63205>.
3. **Y. Tamarin.** *Protective Coatings for Turbine Blades*. Materials Park : ASM International, 2002. ISBN-10:0-87170-759-4.
4. *A history of superalloy metalurgy for superalloy metalurgists.* **Sims Chester T.** 1984 (399-419), Scgnectady : Material Science , 1984, Tom 1984. DOI: 10.7449/1984/SUPERALLOYS_1984_399_419.
5. *Effect of film-hole configuration on creep rupture behavior of a second generation nickel-based single crystal superalloys.* **Weikang Sun Yuanming Xu, Chunyan Hu, Xinling Liu.** Beijing : Materials Characterization, 2017, Tomy 130 (2017) 298–310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.019>.
6. **Gupta Devendra.** *Diffusion process in advanced technological materials.* . New York : William Andrew, Inc, 2005. ISBN: 0-8155-1501-4.
7. *The effects of manufacturing tolerances on gas turbine cooling.* . **Bunker Ronald S.** 4, Berlin : ASME, 2008, Tom 131. <https://doi.org/10.1115/1.3072494>.
8. *State-of-art, challenges, and outlook on manufacturing of cooling holes for turbine blades.* **Z. Y. Li X. T. Wei, Y. B. Guo, and M. P. Sealy.** 3, Zibo : Machining Science and Technology, 2015, Tom 19. <https://doi.org/10.1080/10910344.2015.1051543>.
9. *Drążenie elektrochemiczne otworów w elementach silników turbinowych.* . **J. Kozak.** 4, Budgoszcz : Mechanik, 2015, Tom 2015.
10. *Influence of chemical composition of nickel based superalloy on the formation of aluminide coatings.* **Zielinska M.** 1, Rzeszow : Archives of metalurgy and materials, 2011, Tom 56. DOI: 10.2478/v10172-011-0023-y.

11. *Impact of Process Parameters on the Quality of Deep Holes Drilled in Inconel 718 Using EDD.* **Machno Magdalena.** 14, Kraków : Materials, 2019, Tom 12. <https://doi.org/10.3390/ma12142298>.
12. *Fatigue crack susceptibility of electrical discharge drilled holes in nickel based heat resistant alloy.* **Kang S.H.** 1, Tuscaloosa : Materials Science and Technology, 2006, Tom 22. <https://doi.org/10.1179/174328406X78389>.
13. *A review of shaped hole turbine fim- cooling technology.* **Bunker R.S.** 4, Niskayuna : ASME Journal of heat and mass transfer., 2005, Tom 127. DOI: 10.1115/1.1860562.
14. *The effect of machined topography and integrity on fatigue life.* **Novovic D.** 2-3, Birmingham : International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, Tom 44. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.018>.
15. *Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes.* **Ekmekci Bulent.** 10, Zonguldak : Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, Tom 19. 10.1088/0960-1317/19/10/105030.
16. **Reed Roger C.** *The Superalloys Fundamentals and Applications.* New York : Cambridge University Press, 2006. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>.
17. **Lazarenko B.R.** *To Invert the effect of wear on electric power contacts.* Moskwa : Związkowy Instytut Elektro-Techniczny, 1943.
18. *Advacing EDM through fundamental insight in to the process.* **M. Kunieda B. Lauwers, K.P. Rajurkar, B.M. Schumacher.** 2, Tokyo : CIRP Annals, 2005, Tom 54. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60020-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60020-1).
19. *The Movement of a Bubble in the Gap Depending on the Single Electrical Discharge.* **M. Ikeda.** 11 (12-26), Tokyo : JSEME, 1972, Tom 6. <https://doi.org/10.2526/jseme.6.12>.
20. **Jameson Elman C.** *Electrical Discharge Machining.* Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 2001. 0-87263-521-X.
21. *Historical phases of EDM development driven by the dual Influence of “Market Pull” and “Science Push”.* **Schumaker M.** 2013 (5-12), Lozanna : Elsevier, 2013, Tom 6. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.001.
22. *Effect of EDM process parameters on 3D surface topography.* **Ramasawmya H.** 2 (155-164), Moka : Journal of Materials Processing Technology, 2004, Tom 148. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00652-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00652-6).

23. *Thinning process of recast layer in hole drilling and trimming by EDM.* **CJ Li.** 2016 (575-579), Pekin : Procedia CIRP, 2016, Tom 42. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.262>.
24. *Multi-Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function.* **Swiercz Rafał.** 72, Bydgoszcz : Micromachines, 2018, Tom 10. <https://doi.org/10.3390/mi10010072>.
25. *Relationship between EDM parameters and surface crack formation.* **Lee H.T.** 3 (676-683), Tainan : Journal of Materials Processing Technology, 2003, Tom 142. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00688-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00688-5).
26. *Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper–tungsten electrode.* **H.T. Lee.** 1-2 (346-356), Tainan : Materials Science and Engineering: A, 2003, Tom 364. DOI :10.1016/j.msea.2003.08.046.
27. *Assessment of surface integrity of Ni superalloy after electrical-discharge, laser and mechanical micro-drilling processes.* **Irman M.** 2015 (1303-1311), London : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology., 2015, Tom 79. DOI 10.1007/s00170-015-6909-5.
28. *Optimization and predictive modeling using S/N, RSM, RA and ANNs for micro-electrical discharge drilling of AISI 304 stainless steel.* **Sarıkaya Murat.** 2016 (1503-1517), Sinop : Neural Computing and Applications., 2016, Tom 30. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2775-9>.
29. *Specifics of flushing in electrical discharge drilling.* **Munz M.** Amsterdam : Procedia CIRP 6 (2013) 83 – 88, 2013. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.024.
30. *Effect of tube- electrode inner structure on machining performance in tube- electrode high-speed electrochemical discharge drilling.* **Zhang Y.** 2016 (38-49), Nanjing : Journal of Materials Processing Technology, 2015, Tom 231. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.12.012>.
31. *Influence of electrode tool length on the micro EDM drilling performance.* **Skrabalak G.** 2018 (594-598), Barcelona : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.120.
32. *Impact of electrode length on EDM inclined hole drilling process.* **Gao Q.** 2018 (1171-1175), Szanghaj : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, Tom 94. DOI 10.1007/s00170-017-0937-2.
33. *Fluid Dynamics in Electrode Flushing Channel and Electrode-Workpiece Gap During EDM Drilling.* **Kliuev M.** 2018 (254-259), Zurich : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.058.

34. *Flushing velocity observations and analysis during EDM drilling.* **Kliuev M.** 2018 (590-593), Zurich : Procedia CIRP, 2018, Tom 77. 10.1016/j.procir.2018.08.210.
35. *Effects of flushing on electro-discharged machined surfaces.* **Wang Y.S.** 1-4 (299-305), Singapore : Journal of Materials Processing Technology, 1995, Tom 48. SSDI 0924-0136(94)01662-K.
36. *Influence of gap air flushing on plasma channel and crater geometry in single blasting erosion arc discharge.* **Yingmou Zhua Ahmad Farhadia, Guojian Hea, Xiao Liub, Lin Gu, Wansheng Zhaoa.** 2018 (210-214), Bilbao : Procedia CIRP, 2017, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.050.
37. *A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718.* **Tanjilul M.** 2018 (263-274), Singapur : Journal of Materials Processing Technology, 2018, Tom 225. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>.
38. *Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate ratein electrical discharge machining of hard-to-machine alloys.* **Torres A.** 2015 (33-45), Pampeluna : Precision Engineering, 2015, Tom 40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.10.001>.
39. *Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718.* **Kuppan P.** 2008 (74-84), Vellore : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Tom 38. DOI 10.1007/s00170-007-1084-y.
40. *Optimization of micro-EDM drilling of inconel 718 superalloy.* **Ay M.** 2013 (1015-1023), Elazig : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology., 2013, Tom 66. DOI 10.1007/s00170-012-4385-8.
41. *Optimization of the EDM drilling process to increase the productivity and geometrical accuracy.* **Risto M.** 2016 (537-542), Karlsruhe : Procedia CIRP, 2016, Tom 42. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.247.
42. *Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance.* **Yilmaz O.** 2010 (185-194), Gaziantep : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, Tom 51. DOI 10.1007/s00170-010-2625-3.
43. *Performance Evaluation of Electrode Materials in Electric Discharge Deep Hole Drilling of Inconel 718 Superalloy.* **Kuppan P.** 2017 (53-59), Vellore : Procedia Engineering, 2017, Tom 174. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.141.
44. *Ultrafast drilling of Inconel 718 using hybrid EDM with different electrode materials.* **Ahmed A.** 2020 (2281-2294), Kerala : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, Tom 106. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04769-w>.

45. *Microstructuring of silicon by electro- discharge mechining (EDM)*. **Reynaerts D.** 1-3 (379-386), Heverlee : Sensors and Actuators A: Physical, 1997, Tom 61. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)01359-9.
46. *Analysis of the Relationship between the Properties of Selected Materials and the Parameters of the EDD Process*. **Trajer M.** Krakow : ESAFORM, 2023.
47. *Surface finishing of micro-EDM holes using deionized water*. **Chung D. K.** 4, Seul : Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, Tom 19. doi:10.1088/0960-1317/19/4/045025.
48. *Semi- empirical model of surface finish on electrical discharge machining*. **Tsai K.M.** 10 (1455-1477), Hsinchu : International Journal of Machine Tools and Manufacture., 2004, Tom 41. PII: S0890-6955(01)00015-3.
49. *Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique*. **Cusanelli G.** 1-3 (289-295), Geneva : Journal of Materials Processing Technology, 2004, Tom 149. doi:10.1016/j.jmatprotec.2003.11.047.
50. *Break-out detection for high-speed small hole drilling EDM based on machine learning*. **Weiwen X.** 2018 (569-574), Szanghai : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.115.
51. *Self-tuning breakthrough detection for EDM drilling micro holes*. **Bellotti M.** 2020 (630-640), Leuven : Journal of Manufacturing Processes., 2020, Tom 57. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.031>.
52. *Breakout detection in fast hole electrical discharge machining*. **Koshy P.** 10 (922-926), Hamilton : International Journal of Machine Tools and Manufacture., 2010, Tom 50. doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.05.006.
53. *Breakout detection for fast EDM drilling by classification of machining state graphs*. **Xia W.** 2020 (1645-1656), Shanghai : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, Tom 106. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04530-3>.
54. *Enhancement of the micro-EDM process for drilling through-holes*. **Bellotti M.** 2018 (610-615), Bilbao : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.123.
55. *Breakthrough phenomena in drilling micro holes by EDM*. **Bellotti M.** 2019, Leuven : International Journal of Machine Tools and Manufacture., 2019, Tom 146. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103436>.

56. *Completion detection and efficiency improvement for breakout stage of fast EDM drilling.* **Zang Y.** 2020 (1565-1574), Shanghai : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, Tom 114. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06936-4>.
57. *Mico-EDM for three- dimensional casvities- development of uniform wear method.* **Masuzawa T.** 1 (169-172), Tokyo : CIRP Annals, 1997, Tom 47. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62810-8.
58. *Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM.* **Bleys P.** 1 (157-160), Leuven : CIRP Annals, 2002, Tom 51. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61489-9.
59. *Electrode wear phenomenon and its compensation in micro electrical discharge milling: a review.* **Kar S.** 14, Silchar : Materials and Manufacturing Processes, 2018, Tom 33. DOI: 10.1080/10426914.2018.1453144.
60. *Tool Wear Compensation and Path Generation in Micro and Macro EDM.* **Narasimhan J.** 1 (75-82), Lincoln : Journal of Manufacturing Processes, 2005, Tom 7. DOI: 10.1016/S1526-6125(05)70084-0.
61. *Electrode profile prediction and wear compensation in EDM-milling and micro-EDM-milling.* **Richard J.** 2018 (819-824), Bilbao : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.162.
62. *A Block Divided EDM Process for Diffuser Shaped Film Cooling Holes.* **Liang W.** 2018 (415-419), Bilbao : Procedia CIRP, 2018, Tom 68. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.105.
63. *EDM Drilling and Shaping of Cooling Holes in Inconel 718 Turbine Blades.* **Kliuev M.** 2016 (322-327), Zurich : Procedia CIRP, 2016, Tom 42. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.293.
64. **Bose S.** *High Temperature Coatings.* Waltham : Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 9780128046227.
65. **Young David J.** *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals.* Amsterdam : Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100101-1.01001-3>.
66. *Hot corrosin of metals and alloys.* **Pettit F.** 2011 (1-21), Pittsburgh : Oxidation of Metals, 2011, Tom 76. DOI 10.1007/s11085-011-9254-6.
67. *Common failures in gas turbine blades.* **Carter T. J.** 2 (237-247), Johannesburg : Engineering Failure Analysis, 2004, Tom 12. doi:10.1016/j.engfailanal.2004.07.004.
68. *Hot corrosion failure in the first stage nozzle of gas turbine nozzle.* **Salehnasab B.** 2016 (316-325), Dezfoul : Engineering Failure Analysis, 2016, Tom 60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.057>.

69. *Corrosion failures in gas turbine hot components*. **Kosieniak E.** 2012 (330-337), Warsaw : Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, Tom 12. DOI 10.1007/s11668-012-9571-3.
70. **Sobiecki Jerzy R.** *Zastosowanie związków organicznych w wytwarzaniu antyściernych i antykorozyjnych warstw powierzchniowych metodą PAMOCVD*. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010. Tom 23. ISSN 1234-5229.
71. *Mechanisms of Formation of diffusion aluminide coating on nickel-based superalloys*. **Goward G. W.** 1971 (475-495), East Hartford : Oxidation of Metals, 1971, Tom 3. <https://doi.org/10.1007/BF00604047>.
72. *Oxidation Resistance of Turbine Blades Made of _ZS6K Superalloy after Aluminizing by Low-Activity CVD and VPA Methods*. **M. Zagula-Yavorska P. Kocurek, M. Pytel, and J. Sieniawski.** 5, Rzeszow : Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, Tom 25. DOI: 10.1007/s11665-016-2032-5.
73. *The microstructure and oxidation resistance of the aluminide coatings deposited by the CVD method on pure nickel and hafnium-doped nickel superalloys*. **M. Zagula-Yavorska J. Romanowska, M. Pytel, J. Sieniawski.** 4 (862-872), Rzeszow : Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, Tom 15. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.03.006>.
74. *Cyclic oxidation of palladium modified and nonmodified aluminide coatings deposited on nickel base superalloys*. **Maryana Zagula-Yavorska Jan Sieniawski.** 1 (130-139), Rzeszow : Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, Tom 18. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.05.004>.
75. **Yongdong Xu Xiu-Tian Yan.** *Chemical Vapour Deposition*. London : Springer, 2010. ISBN: 978-1-84882-894-0.
76. *Microstructure and Oxidation Resistance of an Aluminide Coating on the Nickel Based Superalloy Mar M247 Deposited by the CVD Aluminizing Process*. **M. Zielinska M. Zagula-Yavorska J. Sieniawski, R. Filip.** 3, Rzeszów : Archives of Metallurgy and Materials, 2013, Tom 58. DOI:10.2478/amm-2013-0057.
77. *Problemy degradacji oraz modyfikacji hafnem aluminidkowych powłok ochronnych na elementach turbin silników lotniczych*. **Swadźba L.** 2011 (53-64), Katowice : Problemy Eksploatacji, 2011, Tom 4. 1232-9312.
78. *Ion-plasma process of the production of diffusion aluminide coatings*. **Muboyadzhyan S. A.** 2010 (159-167), Moskwa : Russian Metallurgy, 2010, Tom 2010. DOI: 10.1134/S0036029510030031.

79. *The influence of deposition technique of aluminide coatings on oxidation resistance of different nickel superalloys.* **Goral M.** Madryd : 10th International Conference on Key Engineering Materials 2020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.863>.
80. *Effect of Cycle Frequency on High Temperature Oxidation Behavior of Alumina-forming Coatings Used for Industrial Gas Turbine Blades.* **Vialas N.** 2004 (747-754), Toulouse : Material Science Forum, 2004, Tomy 461-464. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.461-464.747.
81. *The effects of active element additions on the oxidation performance of a platinum aluminide coating at 1100 °C.* **Fisher G.** 1-2 (24-30), Newcastle : Surface and Coatings Technology, 1998, Tom 110. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00548-9.
82. *EDM drilling of ultra-high aspect ratio micro holes with insulated tools.* **Ferraris E.** 1 (191-194), Leuven : CIRP Annals, 2013, Tom 62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.115>.
83. *Analysis of the Unsteady Flow Field Inside a Fan-Shaped Cooling Hole Predicted by Large Eddy Simulation.* **A. Shubham G. Laurent, D. Florent, O. Nicolas, D. Jérôme.** 3, Toulouse : Journal of Turbomachinery, 2021, Tom 143. DOI: 10.1115/1.4050121.
84. *Diffusion coatings for high- temperature applications on Ni- based superalloys.* **Cigada P.A.** 15, Mediolan : Surface and Coatings Technology, 2011, Tom 439. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128452>.
85. *Protective Coatings for Turbine Blades.* **brak miejsca : ASM International, 2002.**
86. **brak miejsca : <https://byronproducts.com/vapor-phase-aluminide-coatings/>.**
87. *Świercz R. Multi-Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function.* Bydgoszcz : MDPI, 2018. doi:10.3390/mi10010072.
88. *Trajer M. Analysis of the relationship between the properties of selected materials and parametes of the EDD process. .* Kraków : ESAFORM, 2023. n/a.
89. *Impact of Process Parameters on the Quality of Deep Holes Drilled in Inconel 718 Using EDD.* **Machno. brak miejsca : Materials, 2019.**
90. *A comparative study of four modified Al coatings on Ni3Al-based single crystal superalloy.* **Qiong WU Rui-bo YANG, Yu-xiao WU, Shu-suo LI, Yue MA, Sheng-kai GONG.** 6 (496-505), Pekin : Materials International, 2011, Tom 21. [https://doi.org/10.1016/S1002-0071\(12\)60089-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60089-6).
91. *Failure due to structural degradation in turbine blades.* **N. Ejaz A. Tauqir.** 3 (452-463), Rawalpindi : Engineering Failure Analysis, 2006, Tom 13. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.041>.

92. *A comparative study of the cyclic thermal oxidation of PVD nickel aluminide coatings.* He J.L. 1 (67-69), Taichung : Surface and Coatings Technology, 2002, Tom 155. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00025-7).

93. *Micro Drilling EDM with High Rotation Speed of Tool Electrode Using the Electrostatic Induction Feeding Method.* Yahagia Y. 2012 (162-165), Tokyo : Procedia CIRP, 2012, Tom 1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.028>.

94. *A comparative study of the cyclic thermal oxidation of PVD nickel aluminide coatings.* J.L. He C.H. Yu, A. Leyland, A.D. Wilson, A. Matthews. 1 (67-69), Taichung : Surface and Coatings Technology, 2002, Tom 155. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00025-7).

15. Spis rysunków

Rysunek 3-1 Przekrój silnika odrzutowego W.2/700- będącego wersją rozwojową pierwszej wersji W.1X napędzającego pierwszy samolot odrzutowy- Gloster E.28/39. (1)	9
Rysunek 3-2 Przekrój silnika Jumo 004 opracowanego w zakładach Junkersa w latach 40 XX wieku. [https://erenow.net/ww/hitlers-spyplane-over-normandy-1944-worlds-first-jet/6.php , dostęp 16/03/2023]	10
Rysunek 3-3 Porównanie cyklu silnika tłokowego oraz odrzutowego. (1)	11
Rysunek 3-4 Rozróż kolejnych generacji superstopów. (4)	12
Rysunek 3-5 Ewolucja zawartości składników stopowych do połowy lat 80tych XX wieku. (4) ..	13
Rysunek 3-6 Ewolucja powłok ochronnych. (4)	14
Rysunek 3-7 Współczesna chłodzona łopatką turbiny wysokiego ciśnienia pokryta warstwą ceramiczną.	15
Rysunek 3-8 Schemat przepływu wewnętrznego chłodzonego pióra oraz możliwe konfiguracje konstrukcji wewnętrznej (9).	15
Rysunek 3-9 Przykłady pęknięć zmęczeniowo- korozyjnych z otworów chłodzących wykonywanych technologią drążenia elektro erozyjnego (12)	16
Rysunek 3-10 a) otwory kształtowe we współczesnej łopatkę turbiny silnika lotniczego oraz b) podstawowe geometrie otworów kształtowych (13)	16
Rysunek 3-11 Konceptyjne krzywe technologii chłodzenia części (2)	17
Rysunek 3-12 Wzrost temperatury wlotowej turbiny w odniesieniu do a) zmian materiałowych i konstrukcyjnych b) TET dla jednego cyklu (lotu) silnika. (16)	17
Rysunek 3-13 Wydana w 1943 roku praca B.R. Lazarenko: „Inversion of the erosion of metals and measured against contact devastation” Moskiewski Instytut Zjednoczenia, Uniwersytet Moskiewski (16)	18
Rysunek 3-14 Trójkąt ograniczenia optymalizacji procesu EDM (17)	19
Rysunek 3-15 Przebiegi napięcia w natężenia prądu w procesie EDM (17)	19
Rysunek 3-16 Cykl formowania iskry, przeskoku oraz studzenia obszaru	20
Rysunek 3-17 Zmiana bąbla gazowego oraz pomiar siły ($I=30A$, $T_e=150\mu s$, $gap=0.15mm$, anoda- miedź $\Phi 20mm$. Katoda $\Phi 20mm$) (18)	22
Rysunek 3-18 Pierwsze urządzenie wykorzystujące zjawisko elektro erozji. (19)	22
Rysunek 3-19 Schemat działania układu RC na przykładzie układu hydraulicznego. (19)	23
Rysunek 3-20 a) schemat nastawnego układu RC b) ładowanie kondensatora c) rozładowanie kondensatora połączone z wyzwoleniem iskry. (19)	23
Rysunek 3-21 Schemat układu opartego o zestaw tranzystorów. (19)	24
Rysunek 3-22 Od lewej: GF Form P350- EDM wgłębnny, Tek4 Aero- drążarka do małych otworów, Sodick AL600P- wycinarka drutowa	25
Rysunek 3-23 Priorun na pustyni Mojave [autor: Jessie Eastland - Own work, CC BY-SA 4.0, (https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44273148 , dostęp 17.03.2023)	25
Rysunek 3-24 Porównanie pracy elektrody grzebieniowej oraz elektrody rotującej	26

Rysunek 3-25 Porównanie układów otworów możliwych do wykonania elektrodą grzebieniową i elektrodą rotującą.....	27
Rysunek 3-26 Wykonanie otworów kształtowych elektrodą kształtową oraz techniką wierszowania elektrodą rotującą.....	28
Rysunek 3-27 Po lewej- wykonanie otworu bez detekcji przebicia może spowodować uszkodzenie zarówno wewnętrznej struktury kanałów jak i przeciwległej ścianki. Po prawej- system detekcji przebicia zatrzymuje elektrodę po wykonaniu otworu.	28
Rysunek 3-28 Podział strumieni energii w procesie elektro erozji (17).	29
Rysunek 3-29 Zdjęcie warstwy zmienionej wykonanej w technologii SEM (22).	30
Rysunek 3-30 Wykresy obrazujące wpływ natężenia oraz czasu trwania impulsu na występowanie mikropęknięć. (24)	30
Rysunek 3-31 Powierzchnia próbki wykonanej z IN718 po obróbce EDM, analiza a) SEI i b) BSE. Widoczna strefa przetopiona-1, zmieniona cieplnie- 2 oraz pęknięcia-3. (26)	31
Rysunek 3-32 Wpływ wewnętrznego płukania oraz budowy elektrody na wydajność procesu elektro drążenia. (29).....	32
Rysunek 3-33 Kształt wewnętrznej geometrii elektrod wykorzystanych przez Zhanga. (29)	32
Rysunek 3-34 Zmiana czasu drążenia otworów elektrodą rurkową przez Gao. (31)	33
Rysunek 3-35 Zmiana czasu drążenia otworów rurkową. (30)	34
Rysunek 3-36 Wykresy grubości warstwy zmienionej oraz zależności gęstości pęknięć od grubości warstwy przetopionej.	34
Rysunek 3-37 Porównanie iskry przy braku płukania szczeliny oraz z płukaniem. Widoczne zniekształcenie kanału plazmowego. (35)	35
Rysunek 3-38 Deformacja krateru oraz elektrody w wyniku oczyszczania obszaru roboczego sprężonym powietrzem. (35)	35
Rysunek 3-39 Wpływ wydatku dielektryka płynącego wewnątrz elektrody na efektywność drążenia. (28)	36
Rysunek 3-40 Parametry i ich wartości w pracy (27).	37
Rysunek 3-41 Przebiegi napięcia i natężenia dla parametrów wykorzystanych pacy (23).	37
Rysunek 3-42 Wykres Pareto będący podsumowaniem (37).	38
Rysunek 3-43 Otwory uzyskane przy drążeniu elektrodami mosiężnymi o różnych geometriach: a) pręta b) jednokanałowa c) dwukanałowa d) wielokanałowa (29)	39
Rysunek 3-44 Widok typowy dla materiały po obróbce EDM. Widoczny materiał rodzimy, strefa przegrzana (HAZ), oraz strefa przetopiona (white layer) (48).	40
Rysunek 3-45 Widok struktury metalu a) analiza TEM- widoczne igły martenzytyczne przecinające kolumnową strukturę austenityczną, b) analiza optyczna powierzchni próbki (48)	41
Rysunek 3-46 Wykres zmiany twardości materiału w funkcji odległości od obrabianej powierzchni. (26)	41
Rysunek 3-47 Wyniki optymalizacji dla a) grubości warstwy zmienionej (22) b) chropowatości powierzchni (23)	42
Rysunek 3-48 Kolejne fazy wykonania otworu chłodzącego z zatrzymaniem elektrody po przebiciu ścianki.	42

Rysunek 3-49 a) schemat ideowy stanowiska i sposobu pomiaru b) wykres obrazujący ciśnienie w elektrodzie jako funkcję wysokości szczeliny międzyelektrodowej c) sygnał z elektronicznego czujnika ciśnienia d) przemieszczenie elektrody (51)	43
Rysunek 3-50 Schemat koncepcji detekcji przebicia w oparciu o SSMD a) przebiegi zmiennych podczas drążeń- pionowa linia oznacza moment przebicia b) model statystyczny c) testy weryfikacyjne (50).....	44
Rysunek 3-51 Schemat usuwania materiału poprzez wierszowanie (56).....	45
Rysunek 3-52 a) degradacja końcówki elektrody- kształt zmienia się wraz z czasem obróbki b) przy braku kompensacji zmienia się długość elektrody- bez kompensacji pojawiają się charakterystyczna „piła”. (58).....	45
Rysunek 3-53 Przykład wierszowania elektro erozyjnego: a) bez kompensacji zużycia elektrody b) z kompensacją (58)	45
Rysunek 3-54 Widok otworu kształtowego z częścią dufuzora wykonaną techniką wierszowania (61).	46
Rysunek 3-55 Otwór kształtowy wykonany w stopie Inconel 718 (62).	46
Rysunek 3-56 Porównanie wymaganej trwałości komponentów oraz temperatur w jakich pracują. Źródło: (63)	47
Rysunek 3-57 Reakcje i schemat dyfuzji prowadzące do powstania zgorzeliny tlenkowej na powierzchni metalicznej. (64)	48
Rysunek 3-58 a) Głębokość korozji b) porównanie wpływu temperatury na prędkość degradacji stopów w wyniku korozji i oksydacji, (3), (63)	49
Rysunek 3-59 a) widok skorodowanej łopatki turbiny przemysłowej b) Korozja siarkowa wymaga okresu inkubacji po którym następuje gwałtowna czasem katastrofalna degradacja materiału. (67) (65).....	50
Rysunek 3-60 Łopatka turbiny z widocznymi wżerami korozyjnymi (3).....	51
Rysunek 3-61 a) mikrostruktura oraz opis faz dla procesu z dyfuzją wewnętrzną przy zastosowaniu procesu wysoko aktywnego b) mikrostruktura oraz opis faz dla pprocesu z dyfuzją wewnętrzną przy zastosowaniu procesu nisko aktywnego, w obu przypadkach materiałem bazowym był Udimet 700, (70)	52
Rysunek 3-62 Piec próżniowy do wykonywania powłok w technologii VPA.....	53
Rysunek 3-63 Wpływ zawartości aktywatora NH_4Cl na grubość powłoki wytworzonej na stopie niklowym. (3)	54
Rysunek 3-64 Wpływ zawartości glinu w złożu na grubość powłoki. (3).....	54
Rysunek 3-65 System do wytwarzania powłok w technologii CVD.	56
Rysunek 3-66 Powłoki aluminidkowe wytworzone przy pomocy procesu a) VPA, b) CVD. (71) .	57
Rysunek 3-67 Wykres zmiany masy próbek ze stopu ŻS6K 1) proces CVD, 2) VPA proces. (71)..	57
Rysunek 3-68 Zestawienie grubości warstw powłoki aluminidkowej wykonanej na różnych stopach Inconel. (10)	58
Rysunek 3-69 a) grubość oraz zawartość AL w powłokach otrzymanych przez Górala b) wyniki testów cyklicznych (78)	59
Rysunek 5-1 Przekrój silnika Catalyst.....	65

Rysunek 5-2 Schemat przepływu danych rejestrowanych w systemie CoolBox DMES	67
Rysunek 5-3 Okno danych dla wykonanej części testowej	68
Rysunek 5-4 Widok okna aplikacji CoolBox G-Code po wprowadzeniu opcji importu modeli 3D oraz widok otworów kształtowych wraz z widoczną ścieżką narzędzia.	69
Rysunek 6-1 System Alicona G5 IFC200 oraz skany otworów wykonanych w płytce testowej. ..	71
Rysunek 6-2 Wynik analizy EDS materiału elektrody	72
Rysunek 6-3 Widok na czoło elektrody o średnicy zewnętrznej 0.25mm	73
Rysunek 6-4 Zapis parametrów w procesie drążenia jednego otworu. Białym kwadratem zaznaczony jest obszar niestabilnej pracy elektrody.	74
Rysunek 6-5. Pomiary wydatków dla elektrod o średnicach 0.25mm oraz 0.5mm	74
Rysunek 6-6 Widok uszkodzonej elektrody - w wyniku zgniecenia obniżony został wydatek wody płynącej kanałem wewnętrznym.	75
Rysunek 6-7 Schemat podłączenia mikro przepływomierza.	76
Rysunek 6-8 Widok górny- wewnętrzny kanał elektrody 0.3mm o prawidłowym przepływie, widok dolny- elektroda wadliwa o małym przepływie.	76
Rysunek 6-9 Ustawienia solwera (o prawej) i modelu lepkości (po lewej) użytych w modelu elektrody swobodnej.	77
Rysunek 6-10 a) widok siatki oraz warunków brzegowych b) zgodność modeli z pomiarami	78
Rysunek 6-11 Skan średnicy wewnętrznej elektrody oraz jej wierzchołka.	78
Rysunek 6-12 Siatki użyte do modelowania przepływu w szczelnie: górny rysunek- siatka hybrydowa, dolny- siatka standardowa.	79
Rysunek 6-13 Rozkład prędkości płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.	80
Rysunek 6-14 Rozkład prędkości płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.	80
Rysunek 6-15 Rozkład ciśnienia statycznego płynu w szczelinie wierzchołkowej oraz bocznej dla trzech różnych głębokości otworu.	81
Rysunek 6-16 Widok zmiany fazowej w wewnętrznym narożu elektrody. Zmiana fazy- odparowanie płynu wynika z obniżonego ciśnienia, które w konsekwencji powoduje kawitację.	81
Rysunek 6-17 Linie prądu w okolicy wierzchołka elektrody.	82
Rysunek 6-18 Porównanie przepływów: a) model uwzględniający chropowatość, b) model z powierzchniami gładkimi.	83
Rysunek 6-19 Linie przemieszczania się drobin fazy stałej. Na grafikach b i c widoczne punkty koncentracji.	84
Rysunek 6-20 Wydatek wody płynącej wewnętrznym kanałem elektrody o średnicy zewnętrznej 0.25mm w procesie drążenia.	85
Rysunek 6-21 Wpływ zredukowanego ciśnienia na zużycie elektrody 0.25mm w procesie drążenia.	85

Rysunek 6-22 Od lewej: wyniki czasu drążenia dla kolejnych próbek (próbka E54A0105 nie jest brana pod uwagę), analiza statystyczna średnich populacji dla drążenia normalnego oraz zredukowanego, porównanie graficzne.	86
Rysunek 6-23 Porównanie wydatków płynących przez elektrody z różnych źródeł: zestaw 1 i 2- dostawca A. zestaw 3-6 dostawca B.	86
Rysunek 6-24 Czasu drążeń (przy tych samych parametrach) - nie jest widoczna różnica pomiędzy grupami 1 i 2 (dostawca A) a 3-6 (dostawca B).	87
Rysunek 6-25 Widok płytki testowej- wejścia- a), wyjścia- b) oraz c) wykres napięcia dla jednego z otworów.	88
Rysunek 6-26 a) Wpływ posuwu na średnicę wykonanych otworów, b) odchylenie standardowe czasu drążenia dla różnych posuwów i natężeń prądu, c) średni czas drążenia, d) ilość materiały osadzonego na wlocie otworu	89
Rysunek 6-27 Porównanie Fr (Feed Ratio) ze średnim czasem drążenia dla zadanego posuwu (Feed).	90
Rysunek 6-28 Metryki posuwu naniesione na wyniki drążeń dla zakresu posuwu 0.6-2 in/min.	90
Rysunek 6-29 Zmiana czasu drążenia dla różnych prędkości posuwu wrzeciona.	91
Rysunek 6-30 Porównanie drążeń dla elektrody 0.3 mm przy użyciu posuwu o stałej wartości oraz zmiennego, zależnego od długości elektrody.	92
Rysunek 6-31 Otwory wykonane tą samą średnicą elektrody, tymi samymi parametrami elektrycznymi przy tym samym obciążeniu cyklu ~40%.	93
Rysunek 6-32 Porównanie wpływu parametru cyklu na wykonywany otwór- jego średnicę, chropowatość czy ilość drobin wokół otworu.	94
Rysunek 6-33 Wyniki drążeń: a) MRR- wsp. erozji materiału, b) LTW- wsp. erozji elektrody c) AR- wsp. smukłości otworu.	96
Rysunek 6-34 rozbieżność promieniowa otworu dla poszczególnych materiałów.	97
Rysunek 6-35 Otwory wydrążone w materiałach testowych, powiększenie 160x.....	98
Rysunek 6-36 Widok krawędzi otworów- numeracja zdjęć jak na Rysunku 6-35	98
Rysunek 6-37 Skan otworów: a) widok z zewnątrz, b) widok w przekroju.	99
Rysunek 6-38 Wpływ pojemności na LTW oraz czas drążenia dla elektrody o średnicy 0.5mm.	100
Rysunek 6-39 Porównanie zmiany w zużyciu elektrody dla: a) IN718, b) N515 po zmianie pojemności w układzie generatora.....	100
Rysunek 6-40 Wpływ zwiększenia pojemności na czas drążenia a) IN718, b) N515.....	101
Rysunek 6-41 Geometria i stan powierzchni dla a) starej partii b) nowej partii elektrod.....	102
Rysunek 6-42 Porównanie zużycia elektrody oraz średniego przepływu dla dwóch producentów.	102
Rysunek 6-43 Porównanie czasów drążenia.....	103
Rysunek 6-44 Porównanie stabilności przepływu oraz odchylenia standardowego napięcia dla elektrod pochodzących z dwóch źródeł.....	103
Rysunek 6-45 Widok tzw. kształtowego otworu chłodzącego. (82)	104

Rysunek 6-46 Analiza wpływu prędkości wysuwania elektrody oraz zasięgu wysuwu na czas i geometrię wykonywanych kształtów.	104
Rysunek 6-47 Wyniki analizy pełno czynnikowej dla posuwu i współczynnika posuwu.	105
Rysunek 6-48 Geometria testowa- usuwana objętość jest zgodna z objętością docelowego dyfuzora otworu kształtowego.	105
Rysunek 6-49 Zmienność wymiarów W i L w zależności od zmiennego napięcia i natężenia. ..	106
Rysunek 6-50 Wpływ napięcia i natężenia na geometrię.....	106
Rysunek 6-51 Schematy ścieżko narzędzia.	107
Rysunek 6-52 Wyniki wierszowania dla różnych strategii. Na skanie widok otworów wykonanych strategią zlevel-xy first. Kąt Y jest pochyleniem ścianek otworu.....	107
Rysunek 6-53 Skan wraz z mapą odchyłek oraz zdjęcie elektrody.	108
Rysunek 6-54 Pomiar oraz skan kompletnego otworu kształtowego.	108
Rysunek 7-1 Płytki z Inconel 718 użyte do badania wstępnego. Widoczne są trzy grupy otworów.	110
Rysunek 7-2 Schemat pieca do procesu VPA.....	111
Rysunek 7-3 Piec próżniowy służący do wytwarzania powłoki aluminidkowej w procesie VPA w Avio Polska w Bielsku Białej.	113
Rysunek 7-4 Piec Mab FE-37 wykorzystany do testu utleniania.	114
Rysunek 7-5 Systemu BERNEX BPX Pro325S do realizacji procesu CVD: a) sterowanie wraz z generatorami zewnętrznymi (w tym AlCl ₃) b) neutralizator HCl c) chłodnica i osadnik AlCl ₃ oraz dodatkowy generator Hf/Zr d) retorta pieca z dzwonem chłodzącym, w tle piec kołpakowy. .	115
Rysunek 7-6 Schemat próbki użytej do testu głównego.....	115
Rysunek 7-7 a) próbki ustawione na stojaki b) próbki w piecu przed rozpoczęciem testu.....	116
Rysunek 7-8 Schemat położenia przekrojów na próbce oraz lokalizacja punktów pomiarowych na przekroju.	117
Rysunek 7-9 Opis nazwy pliku z wynikami pomiarowymi.	117
Rysunek 7-10 Przykład skanu wykonanego otworu oraz pomiary dla kolejnych pól.....	118
Rysunek 7-11 Próbką A-88 po wykonaniu powłoki aluminidkowej technologią VPA.....	118
Rysunek 7-12 Wypolerowany zgląd oraz powiększenia otworów A, B i C.	119
Rysunek 7-13 Widok zglądu metalograficznego otworu „A” oraz powiększenie warstwy zmienionej wraz z analizą składu.	119
Rysunek 7-14 Widok zglądu metalograficznego otworu „B” oraz powiększenie warstwy zmienionej wraz z analiza składu.	120
Rysunek 7-15 a) pomiar grubości warstwy w otworze „A” oraz b) warstw składowych.	121
Rysunek 7-16 Powiększenie zanieczyszczenia powłoki zaznaczonego na Rysunku 7-15.	121
Rysunek 7-17 Przekrój otworu typu „B” drążonego elektrodą 0.4mm; a) widok ogólny b) zanieczyszczenia warstwy.	121
Rysunek 7-18 Przekrój otworu typu „c” wierszowanego elektrodą 0.4mm; a) widok ogólny b) zanieczyszczenia warstwy.	122
Rysunek 7-19 Porównanie grubości warstw dla otworów A, B oraz C.	122
Rysunek 7-20 Analiza fazowa powierzchni próbki z użyciem markera Al ₂ O ₃	123

Rysunek 7-21 Analiza fazowa powierzchni próbki użyciem markera Al_3Ni .	123
Rysunek 7-22 a) przekrój otworu A o najmniejszej średnicy. Widoczna jest degradacja warstwy; b) zbliżenie na powłokę w miejscu występowania defektu.	124
Rysunek 7-23 Pomiar a) oraz zestawienie wyników grubości powłoki dla próbki przed i po teście oksydacyjnym.	125
Rysunek 7-24 a) próbki przed testem b) po 48 godzinach c) po 264 godzinach	126
Rysunek 7-25 Mikrostruktura powłoki CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o małej energii (X).	127
Rysunek 7-26 Mikrostruktra powłoki CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o dużej energii (Y).	128
Rysunek 7-27 Zmiana powłoki VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o małej energii (X).	129
Rysunek 7-28 Zmiana powłoki VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otwory wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).	130
Rysunek 7-29 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o małej energii (X).	131
Rysunek 7-30 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie CVD dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).	132
Rysunek 7-31 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o niskiej energii (X).	133
Rysunek 7-32 Zmiana zawartości % masy wybranych pierwiastków dla próbek z powłoką wytworzoną w procesie VPA dla przekrojów 1-4 dla czasów 0, 120 oraz 246 godzin dla otworu wykonanego parametrami o wysokiej energii (Y).	134
Rysunek 7-33 Udział % masowy glinu (Al) uśredniony po wszystkich przekrojach dla poszczególnych punktów pomiarowych. Dla każdej prezentowanej krzywej w punkcie pomiarowym np. A zsumowano udziały masowe dla wszystkich przekrojów.	135