

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA – INŻYNIERIA MECHANICZNA/
DZIEDZINA NAUK – NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

Rozprawa doktorska

mgr inż. Krzysztof Łakomiec

**Badanie wpływu cech elektrody roboczej
i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej
po stopowaniu elektroiskrowym**

Promotor

dr hab. inż. Sławomir Spadło prof. uczelni

Promotor pomocniczy

dr inż. Dorota Świercz-Oniszczyk

WARSZAWA 2023 r.

*Wyrażam serdeczne podziękowania promotorowi
dr hab. inż. Sławomirowi Spadło, prof. uczelni
za opiekę naukową, wszechstronną pomoc
i trud włożony w prowadzenie pracy
oraz promotorowi pomocniczemu
dr inż. Dorocie Oniszcuk-Świercz.*

*Dziękuję śp. prof. Bogdanowi Nowickiemu
za zainicjowanie tematyki badawczej, której
praca jest poświęcona.*

*Dziękuję również wszystkim osobom, które
pomocą i życzliwością przyczyniły się do
powstania tej pracy.*

STRESZCZENIE

Słowa kluczowe: EDM, stopowanie, elektroda robocza, warstwa wierzchnia, mikrostruktura metalograficzna, skład chemiczny.

Celem dysertacji doktorskiej było określenie wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości modyfikowanej warstwy wierzchniej metodą stopowania elektroiskrowego (EDA). Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wysnucie wniosku, że zjawiska fizyczne towarzyszące usuwaniu nadmiaru w procesie obróbki elektroerozyjnej mogą być wykorzystywane w obróbce wykończeniowej, a także do modyfikacji składu chemicznego lub nakładania powłok o zdefiniowanych właściwościach na powierzchnię obrabianą. Prace badawcze umożliwiły określenie przedziału zmienności parametrów obróbki w obszarze ograniczeń związanych ze wskaźnikami ilościowymi nanoszonych warstw (przyrost masy, chropowatość powierzchni, równomierność nanoszonych powłok). Dokonano również oceny jakościowej oraz ilościowej wpływu parametrów elektrycznych obróbki, na konstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni.

Zasadniczą część pracy stanowią wyniki badań wpływu sposobu stopowania, cech elektrod roboczych, właściwości ośrodka międzyelektrodowego oraz parametrów elektrycznych źródła zasilania na efekty stopowania prowadzonego z udziałem wyładowań elektroiskrowych, jak również porównanie efektów stopowania elektrodami kształtowymi (monolitycznymi), pręcikowymi-drgającymi oraz obrotowymi (szczotkowymi) z uwzględnieniem ich cech materiałowych. Przedmiotem opracowania są również wyniki badań materiałowych modyfikowanych warstw z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej oraz mikroanalizy rentgenowskiej dotyczące morfologii modyfikowanych warstw, ze szczególnym uwzględnieniem ich składu chemicznego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań opracowano statystyczne związki ilościowe, wiążące rzeczywiste parametry wejściowe procesu z uzyskanymi efektami technologicznymi (wydajnością procesu, chropowatością powierzchni, grubością nanoszonych powłok). Pozwala to na dobór najkorzystniejszych warunków modyfikacji powierzchni, poprzez wprowadzanie pierwiastków uszlachetniających dla założonego stanu warstwy wierzchniej i może stanowić przesłankę do ich przemysłowej implementacji.

ABSTRACT

Keywords: EDM, alloying, working electrode, surface layer, metallographic microstructure, chemical composition.

The purpose of the doctoral dissertation was to determine the impact of the working electrode characteristics and processing parameters on the properties of the modified surface layer by electro-discharge alloying (EDA). The preliminary tests carried out allowed to conclude that the physical phenomena accompanying the removal of the allowance in the electrical discharge machining process can be used in finishing machining, as well as for modifying the chemical composition or applying coatings with determined properties to the machined surface. The research work made it possible to determine the range of variability of the processing parameters in the area of limitations related to the quantitative indicators of the applied layers (mass increase, surface roughness, uniformity of the applied coatings). A qualitative and quantitative assessment of the impact of the electrical parameters of the treatment on the formation of the geometric structure of the surface was also made.

The main part of the work are the results of research on the impact of the alloying method, the characteristics of the working electrodes, the properties of the inter-electrode medium and the electrical parameters of the power source on the effects of alloying conducted with the participation of electro-spark discharges, as well as the comparison of the effects of alloying with shaped (monolithic), rod-vibrating and rotating (brush) electrodes, taking into account their material characteristics. The subject of the study is also the results of material tests of the modified layers, using scanning microscopy and X-ray microanalysis, concerning the morphology of the modified layers, with particular emphasis on their chemical composition.

On the basis of the obtained test results, statistical quantitative relationships were developed, linking the actual input parameters of the process with the obtained technological effects (process efficiency, surface roughness, thickness of the applied coatings). This allows for the selection of the most favorable conditions for surface modification by introducing enriching elements for the assumed condition of the surface layer and may be a premise for their industrial implementation.

SPIS TREŚCI

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ.....	13
WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW.....	15
WSTĘP.....	17
1. CHARAKTERYSTYKA OBRÓBKİ ELEKTROEROZYJNEJ.....	20
1.1. Klasyfikacja sposobów wytwarzania z zastosowaniem wyładowań elektrycznych.....	20
1.2. Podstawy fizyczne procesów w obróbce elektroerozyjnej	21
1.3. Przegląd obrabiarek elektroerozyjnych	25
1.4. Podstawy budowy obrabiarek elektroerozyjnych	27
1.5. Wymagania stawiane generatorom EDM	28
1.6. Przebieg napięcia i prądu w szczelinie międzyelektrodowej.....	31
1.7. Energia wyładowań elektrycznych w szczelinie międzyelektrodowej	35
1.8. Wpływ parametrów impulsu elektrycznego na proces elektroerozji.....	38
1.9. Klasyfikacja generatorów stosowanych w obróbce elektroerozyjnej.....	41
1.9.1. Klasyfikacja generatorów ze względu na sposób działania.....	43
1.9.2. Klasyfikacja generatorów ze względu na cechy konstrukcyjne	44
1.9.3. Klasyfikacja generatorów ze względu na parametry czasowe generowanych impulsów.....	45
1.10. Rozwój generatorów EDM	47
1.11. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) zespołów elektrycznych i elektronicznych obrabiarek.....	50
2. CHARAKTERYSTYKA METOD STOPOWANIA ELEKTROISKROWEGO.....	54
2.1. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod pręcikowych (SWA)	54
2.2. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych (BEDMA).....	56
2.2.1. Podstawy stopowania erozyjno-mechanicznego z zastosowaniem elektrod szczotkowych.....	57

2.2.2. Charakterystyka obszarów zastosowania metody stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych.....	58
2.2.3. Efekty stopowania elektrodą szczotkową	58
2.3. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych (EDA)	59
2.3.1. Podstawy metody stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych.....	61
2.3.2. Charakterystyka obszarów zastosowania metody stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych.....	63
3. CEL I ZAKRES PRACY	66
3.1. Cel pracy	66
3.2. Zakres pracy	66
4. WARUNKI I METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH PROCESÓW STOPOWANIA Z WYKORZYSTANIEM WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH .	68
4.1. Aparatura badawcza.....	68
4.2. Badania przebiegu napięcia w szczelinie międzyelektrodowej	78
4.3. Badania stopowania z zastosowaniem elektrody pręcikowej-drgającej (SWA)	85
4.3.1. Opis stanowiska badawczego do stopowania elektroiskrowego elektrodą pręcikową-drgającą	85
4.3.2. Charakterystyka czynników wpływających na przebieg procesu stopowania elektrodą pręcikową-drgającą (SWA)	86
4.3.3. Wyniki badań eksperymentalnych stopowania elektrodą pręcikową-drgającą	96
4.4. Badania efektów stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych (BEDMA) ..	126
4.4.1. Opis stanowiska do badań z elektrodą szczotkową	126
4.4.2. Badania stanu warstwy wierzchniej (WW) po obróbce BEDMA	131
4.5. Badania efektów stopowania elektroiskrowego elektrodą monolityczną.....	134
4.5.1. Charakterystyka procesu stopowania elektrodą monolityczną	134
4.5.2. Badania materiału próbki poddawanej modyfikowaniu	137
4.5.3. Badania efektów stopowania elektrodami monolitycznymi	139
4.5.4. Badania stanu warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą monolityczną.....	146

4.5.5. Wyniki analizy składu chemicznego w warstwie wierzchniej po stopowaniu elektrodą monolityczną.....	160
4.6. Wnioski.....	165
5. WNIOSKI O CHARAKTERZE UTYLITARNYM I POZNAWCZYM.....	166
SPIS LITERATURY	169

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

C	– pojemność kondensatora,
G_{wb}	– grubość warstw białej,
E	– energia pojedynczego wyładowania elektrycznego,
f	– liczba stopni swobody,
F	– wartość funkcji testowej Fishera-Snedecora,
F_{kr}	– wartość krytyczna funkcji testowej testu Fishera-Snedecora,
I	– natężenie prądu elektrycznego,
I_C	– natężenia prądu kondensatora,
I_g	– natężenia prądu w szczelinie,
I_R	– natężenia prądu roboczego,
I_w	– natężenia prądu wyładowania,
I_z	– natężenia prądu zapłonu,
L	– indukcyjność,
P	– Moc pojedynczego wyładowania,
R	– rezystancja,
R	– współczynnik korelacji wielorakiej,
R_a	– średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu,
R_p	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
R_q	– średnia kwadratowa rzędnych profilu,
R_{Sm}	– średnia szerokość rowków elementarnych profilu,
R_t	– całkowita wysokość elementów profilu (wewnątrz odcinka pomiarowego),
R_z	– wysokość profilu chropowatości według 10-ciu punktów,
S_t	– całkowita wysokość nierówności powierzchni,
S_v	– głębokość najniższego wgłębienia powierzchni,
S_z	– wysokość nierówności powierzchni według 10-ciu punktów,
s	– wymiar szczeliny międzyelektrodowej,
t	– czas, wartość testowa funkcji t-studenta,
t_d	– czas opóźnienia wyładowania,
t_w	– czas wyładowania,
t_i	– czas impulsu,
t_0	– czas przerwy,

t_r – czas narastania impulsu,
 t_f – czas opadania impulsu,
 t_{rg} – czas narastania napięcia w szczelinie,
 t_{ob} – czas obróbki,
 U – napięcie,
 U_0 – napięcie źródła zasilania,
 U_g – napięcie graniczne,
 U_R – napięcie robocze,
 U_w – napięcie wyładowania,
 U_z – napięcie zapłonu,
 Δ – różnica w czasach ograniczonych prostymi na oscyloskopie,
 Δm – przyrost masy,
 ρ – gęstość właściwa.

WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

- 2D* – oznaczenie dotyczące układu dwuwymiarowego,
- 3D* – oznaczenie dotyczące układu trójwymiarowego,
- AEDG* – Abrasive Electrical Discharge Grinding – szlifowanie ścierno elektroerozyjne,
- BEDMA* – Brush Electrical Discharge Mechanical Alloying – elektroiskrowe stopowanie powierzchni elektrodą szczotkową,
- BEDMM* – Brush Electrical Discharge Mechanical Machining – obróbka erozyjno mechaniczna elektrodą szczotkową,
- CNC* – Computerized Numerical Control – obrabiarka sterowana numerycznie,
- ECM* – Electrochemical Machining – obróbka elektrochemiczna,
- EDA* – Electrical Discharge Alloying – stopowanie elektroiskrowe,
- EDM* – Electrical Discharge Machining – obróbka elektroiskrowa,
- EDS* – Energy Dispersive Spectroscopy – spektroskopia dyspersji energii
- EMC* – Electromagnetic Compatibility – kompatybilność elektromagnetyczna,
- ER* – elektroda robocza,
- IGBT* – Insulated Gate Bipolar Transistor – tranzystor bipolarny z izolowaną bramką,
- MMR* – Material Removal Rate – wydajność obróbki,
- PO* – przedmiot obrabiany,
- RC* – generator zależny prądu stałego,
- SEDM* – Sink Electrical Discharge Machining,
- SGP* – struktura geometryczna powierzchni,
- SEM* – Scanning Electron Microscope – skaningowy mikroskop elektronowy,
- SWA* – Single Wire Alloying – stopowanie elektrodą pręcikową,
- SWC* – strefa wpływów cieplnych,
- TWR* – Tool Wear Rate – współczynnik zużycia elektrody roboczej,
- TWW* – technologiczna warstwa wierzchnia,
- WEDM* – Wire Electrical Discharge Machining – wycinanie elektroerozyjne,
- WW* – warstwa wierzchnia.

WSTĘP

Ostatnie dekady przyniosły bezprecedensowy rozwój technologiczny w zakresie obróbki materiałów trudnoobrabialnych. Rozwój inżynierii materiałowej i opracowanie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych stymuluje stosowanie nowych metod obróbek ubytkowych oraz wykończeniowych. Zagadnienia dotyczące obróbki wykończeniowej, modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej np. poprzez wprowadzanie do niej pierwiastków chemicznych poprawiających cechy użytkowe elementów maszyn, narzędzi itp. [16], stają się szczególnie trudne w przypadku części o relatywnie niskiej dokładności geometrycznej (np. powierzchni odlewów) oraz o złożonej makrogeometrii. Niekonwencjonalne techniki obróbki stosowane są zarówno w przypadkach, gdy zachodzi konieczność usunięcia nadmiaru materiału np. w odlewach, połączeniach spawanych czy też elementach kształtowanych metodami obróbki plastycznej, jak również w sytuacjach, gdy zachodzi potrzeba nałożenia niewielkiej warstwy materiału (np. w procesach regeneracji), a także w wypadkach konieczności poprawy cech użytkowych danego elementu.

W technologii maszyn wykorzystywanych jest wiele rodzajów obróbek ubytkowych, zarówno konwencjonalnych związanych z usuwaniem naddatku obróbkowego zaawansowanymi metodami obróbki skrawaniem [8, 9], obróbki ścierniej [30], jak również niekonwencjonalnych technik wytwarzania między innymi laserowych [71, 72], obróbki elektrochemicznej [63, 64, 65] czy też zaawansowanych technik obróbki wykończeniowej [105].

Jednym ze sposobów stosowanych do usuwania naddatku obróbkowego w celu nadania kształtu przedmiotowi obrabianemu jest obróbka elektroerozyjna – EDM. Analiza literatury oraz przeprowadzone badania wstępne autora pozwoliły na wysnucie wniosku, że zjawiska fizyczne towarzyszące usuwaniu naddatku w procesie obróbki elektroerozyjnej mogą być wykorzystywane w obróbce wykończeniowej, a także w celu modyfikacji składu chemicznego lub nakładania powłok o zdefiniowanych właściwościach na powierzchnię obrabianą. Modyfikację powierzchni w opisywanych warunkach korzystnie jest prowadzić z zastosowaniem elektrod roboczych elastycznych. Prace w tym zakresie prowadzone były na obecnym Wydziale Mechanicznym Technologicznym w zespole profesora Bogdana Nowickiego z udziałem promotora niniejszej pracy prof. Sławomira Spadło. Wymiernym efektem prowadzonych prac było opracowanie technologii stopowania powierzchni z wykorzystaniem elektrod szczotkowych, które sfinalizowane zostało uzyskaniem patentu „Sposób wytwarzania warstw wierzchnich z zastosowaniem wyładowań elektrycznych” [53]. Proces przenoszenia materiału elektrody roboczej – anody na powierzchnię obrabianego elementu określany jest

jako stopowanie elektroiskrowe – EDA. Określenie warunków przenoszenia masy pomiędzy elektrodami oraz uzyskiwanych efektów stanowią istotne elementy badanej technologii.

B. R. Lazarenko i N. N. Lazarenko są uznawani za twórców obróbki elektroerozyjnej oraz stopowania elektroiskrowego [36]. W Polsce prekursorem obróbki elektroerozyjnej był prof. K. Albiński [4]. Modyfikowanie powierzchni metodami elektrycznymi było stosowane w procesach produkcyjnych już w latach 70. XX wieku. Analiza literatury przedmiotu [31, 41, 48, 52] wskazuje na ponowny wzrost zainteresowania efektywnymi metodami modyfikacji powierzchni wykorzystującymi wyładowania elektryczne (EDM, EDA). Zastosowanie tej technologii łączy się z wieloma korzystnymi okolicznościami związanymi zarówno z warunkami technicznymi, ekonomicznymi, jak również środowiskowymi. W przypadku analizowanych procesów modyfikacja materiału dotyczy wyłącznie warstwy wierzchniej i umożliwia zmniejszenie kosztów wytwarzania elementów, pozwalając uzyskać żądane właściwości użytkowe części maszyn przy zapewnieniu wymaganych cech struktury geometrycznej powierzchni. Do zalet związanych z modyfikacją powierzchni z zastosowaniem wyładowań elektrycznych zaliczyć można możliwość wytwarzania warstw wierzchnich o pożądanych właściwościach, między innymi warstw kompozytowych, gradientowych. Ponadto poprzez właściwy dobór parametrów obróbki możliwe jest modyfikowanie rozkładu naprężeń własnych w WW. W przypadku zastosowania w końcowej fazie procesu obróbki kontaktowej przy niskiej wartości napięcia możliwe jest uzyskiwanie naprężeń ściskających [89].

Z uwagi na złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi obróbki prace badawcze w tym zakresie nie ograniczają się do pojedynczych zagadnień. Prowadzone są w wielu obszarach związanych między innymi z możliwościami aplikacyjnymi przedmiotowej technologii. Realizowane badania dotyczą m. in. wpływu składu chemicznego nanoszonych w warunkach wyładowań elektrycznych powłok na odporność korozyjną powierzchni modyfikowanych [78, 79, 80], kształtu, rodzaju elektrod roboczych (monolityczne, pręcikowe) na efekty procesu stopowania [28, 102, 104] czy możliwości zastosowania obróbki w zautomatyzowanych systemach obróbkowych.

Obróbka elektroerozyjna klasyfikowana jest jako jeden ze sposobów niekonwencjonalnych metod wytwarzania elementów maszyn [83]. Wyróżnia się dwie podstawowe odmiany obróbki elektroerozyjnej EDM (ang. Electrical Discharge Machining) [19, 32, 33, 70, 106, 107] oraz WEDM (ang. Wire Electrical Discharge Machining) [37]. W literaturze szeroko opisywane są hybrydowe odmiany obróbki z zastosowaniem kilku oddziaływań fizycznych na przedmiot obrabiany np. BEDMM (ang. Brush Electrical Discharge Mechanical Machining) [54, 57, 97], AEDG (ang. Abrasive Electrical Discharge Grinding) [34]. Cechą charaktery-

styczną obróbki elektroerozyjnej materiałów jest występowanie impulsowych wyładowań elektrycznych pomiędzy elektrodami oraz skutków cieplnych i gazodynamicznych towarzyszących tym wyładowaniom. Jedną z elektrod w obróbce elektroerozyjnej stanowi przedmiot obrabiany (PO), a drugą elektroda robocza (ER). Proces obróbki przebiega w środowisku ośrodka roboczego (dielektryka) [36]. Powstający, w wyniku wyładowań elektrycznych, pomiędzy elektrodami kanał plazmowy i towarzyszący temu wzrost temperatury powoduje lokalne topnienie i odparowanie materiału elektrod [48].

Obróbka elektroerozyjna znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle przy kształtowaniu części maszyn wykonywanych z materiałów trudno skrawalnych, a w szczególności o złożonej makrogeometrii [23, 84, 98, 108]. W wielu przypadkach ekonomicznie uzasadnione jest również zastosowanie tej metody obróbki do wytwarzania części maszyn z materiałów o dobrej skrawalności, ale o bardzo skomplikowanym kształcie lub o małej sztywności elementu obrabianego np. stateczników do amunicji rakietowej z tego powodu trudnych i pracochłonnych do wykonania metodami konwencjonalnymi. Główne zastosowania obróbki elektroerozyjnej związane są z wytwarzaniem wszelkiego rodzaju narzędzi specjalnych oraz oprzyrządowania technologicznego [50], np.: matryce kuźnicze, formy wtryskowe, kokile odlewnicze, wykrojniki i stemple, oczka ciągarskie, narzędzia z węglików spiekanych z powłokami z polikrystalicznego diamentu (PCD) [32, 67], przyrządy obróbkowe itp. Obróbka elektroerozyjna stosowana jest do wykonywania bardzo małych otworów [47, 92], np. we wtryskiwaczach silników wysokoprężnych, cięcia prętów paliwowych w energetyce jądrowej oraz do obróbki elementów konstrukcyjnych rozdzielaczy hydrauliki siłowej. Szeroko stosowana jest w przemyśle lotniczym [11, 59, 76] i rakietowym do obróbki części ze stopów żarowytrzymałych jak: łopatki turbin i sprężarek, kanałów w dyskach turbin odśrodkowych, przecinania obejm kierowniczych i drażnienia otworów kształtowych do mocowania łopatek kierowniczych w silnikach przepływowych, drażnienia kanałów łopatkowych w wirnikach turbopomp itp. Również szerokie zastosowanie EDM znalazła w przemyśle energetycznym do wytwarzania części z materiałów trudno skrawalnych [32, 67], a także militarnym np. do wykonywania trudnych z technologicznego punktu widzenia, z uwagi na gabaryty i położenie, powierzchni mechanizmów ryglujących w armatohaubicach czy otworów w blachach pancernych o znacznej grubości.

1. CHARAKTERYSTYKA OBRÓBKİ ELEKTROEROZYJNEJ

1.1. Klasyfikacja sposobów wytwarzania z zastosowaniem wyładowań elektrycznych

Analiza zjawisk fizycznych występujących w procesach EDA i EDM jako metod wytwarzania warstw wierzchnich [53] oraz stosowanych do tego celu urządzeń technologicznych, pozwala zakwalifikować je do metod cieplno-chemicznych.

Wraz z rozwojem badań i technologii rozwinęło się kilka rodzajów obróbek elektroerozyjnych:

- WEDM – drążenie przez wycinanie drutem [11, 18, 37],
- SEDM – drążenie wgłębne,
- μ EDM – mikro drążenie EDM [15, 27, 50, 51, 85, 110],
- Wet EDM – drążenie na mokro w otoczeniu dielektryka ciekłego,
- Dry EDM – drążenie na sucho w otoczeniu dielektryka gazowego,
- Near Dry EDM – prawie na sucho, z małą ilością dielektryka [82],
- *PMEDM Powder mixed EDM* – wykorzystująca zawiesiny odpowiednich proszków w dielektryku [13, 73, 74, 109].

Przedstawionym powyżej metodom towarzyszą oddziaływania fizyczne skoncentrowane na powierzchni przedmiotu obrabianego, tworzące charakterystyczne dla danego sposobu obróbki technologicznej warstwy wierzchnie o właściwościach zmienionych w odniesieniu do materiału rodzimego [2, 10]. Rezultatem uzyskiwanym w zakresie dotyczącym modyfikacji warstwy wierzchniej mogą być powłoki o określonej grubości, właściwościach chemicznych, eksploatacyjnych oraz przeznaczeniu np. w celu regeneracji części maszyn [21, 39, 49, 86, 16]. Opisane powyżej metody modyfikacji warstwy wierzchniej mogą być stosowane jako pojedyncze zabiegi technologiczne, jak również w różnych ich kombinacjach. Przykładem tego rodzaju oddziaływania na powierzchnię materiału stanowi np. połączenie nakładania powłok metodami elektroerozyjnymi z późniejszym przetapianiem warstwy z wykorzystaniem techniki laserowej.

We współczesnych technikach wytwarzania zakres wykorzystywania obróbki elektroerozyjnej jest szeroki. Oprócz obróbki metali i spieków [112] stosuje się ją, m.in. do usuwania

naddatku obróbkowego materiałów ceramicznych [40], kompozytów metalowo ceramicznych np. w celu kondycjonowania narzędzi ściernych supertwardych [55].

Zainteresowania badawcze dotyczące obróbki elektroerozyjnej dotyczą również badań wpływu warunków obróbki na dokładność kształtowo-wymiarową [93, 94, 95, 96, 97, 99].

1.2. Podstawy fizyczne procesów w obróbce elektroerozyjnej

Istotą obróbki elektroerozyjnej jest zainicjowanie wyładowania elektrycznego (iskry) pomiędzy elektrodami – przedmiotem obrabianym i elektrodą roboczą, któremu towarzyszy powstawanie kanału plazmowego. Warunkiem zainicjowania wyładowania jest spełnienie pewnych warunków w układzie międzyelektrodowym tj. występowanie szczeliny między elektrodami, przyłożenie napięcia elektrycznego o odpowiedniej wartości, które umożliwia zjonizowanie środowiska między elektrodami i powstanie łuku elektrycznego [36].

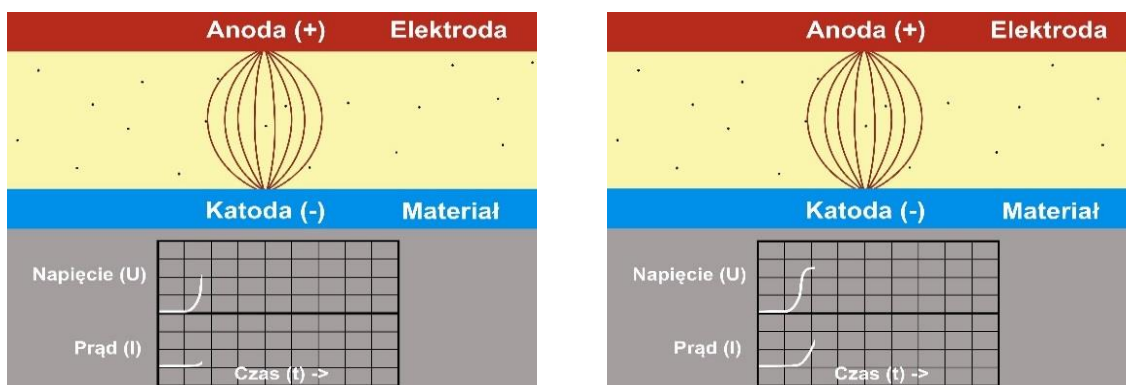
Wszystkie metody obróbek elektroerozyjnych oparte są na jednym z dwóch sposobów inicjacji wyładowania iskrowego poprzez:

- zmniejszanie odległości międzyelektrodowej przez zbliżanie do siebie elektrod, aż do chwili gdy szczelina jest na tyle mała, że przyłożone napięcie między elektrodami będzie w stanie zjonizować przestrzeń między elektrodami i zainicjować kanał wyładowczy. Ten sposób inicjacji wyładowań występuje w drążeniu elektrodami monolitycznymi EDM i wycinaniu elektrodami drutowymi WEDM oraz stopowaniu z zastosowaniem elektrod monolitycznych,
- rozerwanie kontaktu między elektrodami – polegające na tym, że elektrody w chwili początkowej są ze sobą zwarte elektrycznie, na skutek ruchu jednej lub obu elektrod następuje rozerwanie kontaktu elektrycznego między elektrodami (powstaje szczelina), a napięcie międzyelektrodowe umożliwia inicjację i rozwój kanału wyładowczego. Tego typu metody inicjacji wyładowań iskrowych występują w warunkach stopowania elektrodą wibrującą prowadzoną w sposób manualny (najszerzej badana metoda) lub elektrodą szczotkową.

Rozwój kanału iskrowego w szczelinie międzyelektrodowej

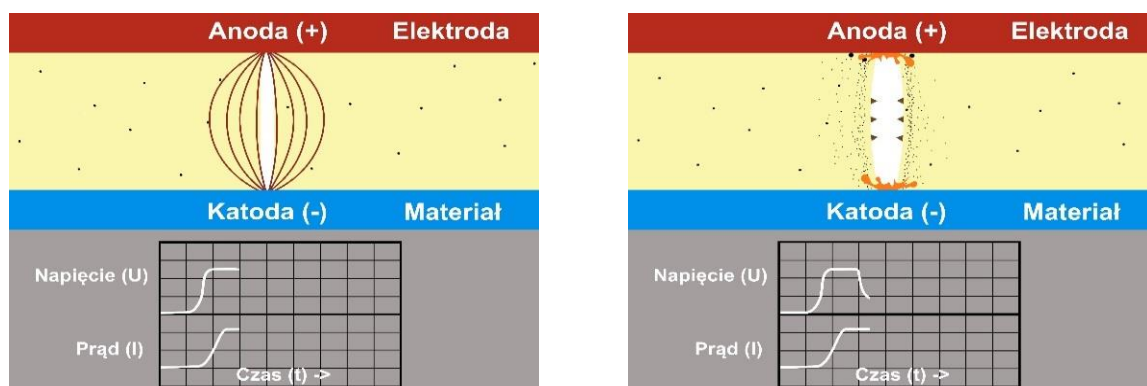
Po przyłożeniu napięcia elektrycznego z generatora zasilającego do elektrod – anody i katody oraz wystąpieniu w szczelinie roboczej warunków niezbędnych, następują zjawiska

fizyczne prowadzące do wyładowania elektrycznego. Wyładowanie między elektrodami umieszczonymi w płynnym dielektryku może być zainicjowane po przyłożeniu napięcia warunkującego powstanie w szczelinie międzyelektrodowej pola elektrycznego o znacznym natężeniu (rzędu 10^5 - 10^6 V/cm). Niejednorodność rozkładu pola elektrycznego w szczelinie roboczej wywołana jest nierównościami geometrycznymi powierzchni elektrod, niejednorodną grubością szczeliny oraz niejednorodnością właściwości ośrodka międzyelektrodowego, składającego się z ciekłego dielektryka i produktów erozji w postaci zawiesiny. Jednym z czynników ułatwiających zainicjowanie wyładowania elektrycznego w miejscach, w których natężenie pola elektrycznego przyjmuje największą wartość jest koncentracja cząstek stanowiących kontaminację dielektryka (głównie produktów erozji) obniżających wytrzymałość dielektryczną ośrodka międzyelektrodowego (rys. 1.1).



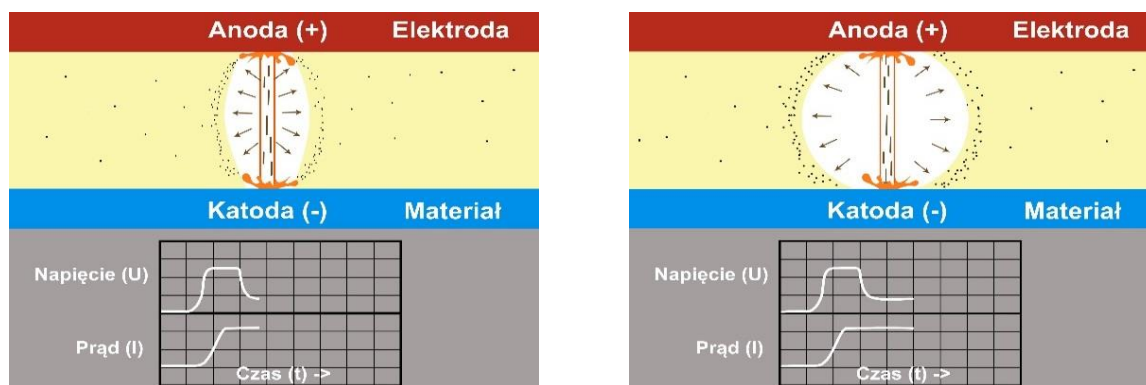
Rys. 1.1. Rozwój wyładowania elektrycznego – skutki wzrostu natężenia pola elektrycznego w wyniku narastającego napięcia międzyelektrodowego

Przy wystarczającej wartości natężenia pola elektrycznego odpowiadającego napięciu U_g zwanemu granicznym, następuje przebiecie elektryczne ośrodka międzyelektrodowego rozpoczynające się emisją elektronów z katody. Elektrony przyspieszone w polu elektrycznym zderzają się z atomami ośrodka powodując ich lawinową jonizację udarową. W efekcie tworzy się wąski kanał plazmowy wypełniony jonami i elektronami. Opisywane fazy powstawania kanału plazmowego zilustrowano na rysunku (rys. 1.2).



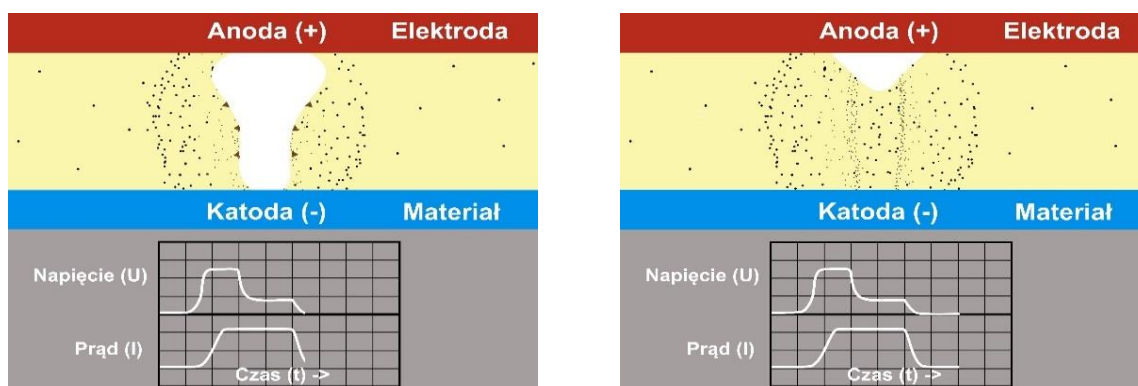
Rys. 1.2. Formowanie kanału plazmowego w szczelinie międzyelektrodowej

Przepływający przez kanał plazmowy prąd elektryczny powoduje wydzielanie się ciepła, w wyniku oddziaływań cieplnych następuje parowanie ośrodka i utworzenie wokół kanału wyładowczego pęcherza gazowego o powiększającej się w funkcji czasu średnicy (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Tworzenie pęcherza gazowego i ewakuacja mikroobjętości roztopionego lokalnie materiału

Typowe przebiegi zmian napięcia i natężenia prądu w czasie wyładowania pokazane są na poszczególnych rysunkach ilustrujących rozwój kanału wyładowczego w dolnej części rysunków. Energia elektronów uderzających w powierzchnię anody, a jonów w powierzchnię katody zamieniana jest na ciepło, co powoduje gwałtowny lokalny wzrost temperatury materiału elektrod do wartości przekraczających temperaturę topności, a często i temperaturę wrzenia. Prowadzi to do topnienia i intensywnego parowania materiału. Proces przemian fazowych materiału w obszarze wyładowania charakteryzuje się dużą intensywnością zmian, towarzyszą mu między innymi zjawiska gazodynamiczne związane z powstawaniem pęcherza gazowego (rys. 1.4).

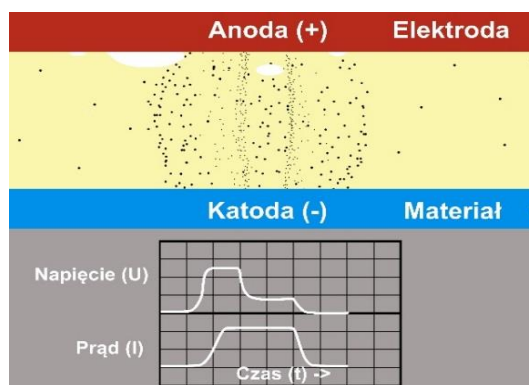


Rys. 1.4. Początek kontrakcji kanału plazmowego, ewakuacja produktów erozji ze szczeliny międzyelektrodowej

Początkowo w objętości powstającego pęcherza ciśnienie gwałtownie rośnie, a następnie po zakończeniu wyładowania spada, co stanowi czynnik intensyfikujący parowanie roztopionego metalu. W wyniku opisywanych zjawisk fizycznych do przestrzeni międzyelektrodowej wyrzucane są strugi i pary ciekłego metalu, skutkiem opisywanych oddziaływań jest powstawanie krateru. W tym czasie następuje spadek napięcia oraz natężenia prądu elektrycznego w szczelinie roboczej i zanik wyładowania.

Po wyładowaniu pęcherz gazowy ulega kontrakcji i dzieli się na dwie główne usytuowane przy elektrodach objętości. Powstałe pęcherzyki zamykają się implozyjnie, co sprzyja usuwaniu części roztopionego metalu z krateru. Pozostały w kraterze metal ulega zakrzepnięciu tworząc na jego powierzchni cienką warstwę o strukturze i właściwościach różniących się od materiału rodzimego przedmiotu obrabianego.

Następnym etapem jest dejonizacja kanału międzyelektrodowego i przywrócenie w szczelinie międzyelektrodowej stanu sprzed wyładowania. Kolejne wyładowania powtarzają się w miejscach, w których istnieją najkorzystniejsze warunki do ponownej jonizacji przestrzeni międzyelektrodowej (rys. 1.5), są to głównie wierzchołki mikronierówności.



Rys. 1.5. Dejonizacja dielektryka i chłodzenie krateru

W wyniku wielu następujących po sobie wyładowań na powierzchni powstaje zbiór charakterystycznych dla tego typu obróbki kraterów [36, 60, 70]. W wyniku cyklicznie powtarzających się aktów wyładowań elektrycznych konstituowana jest technologiczna warstwa wierzchnia obrabianego materiału cechująca się określoną chropowatością [20, 45, 46, 69], rozkładem naprężeń własnych [17], mikrostrukturą metalograficzną warstwy przetopionej oraz strefą oddziaływań cieplnych na materiał rodzimy (podłoże) [7]. Badania produktów erozji wyrzuconych do dielektryka wykazują obecność mikroskopijnych cząstek materiału elektrod o zarysach zbliżonych do powierzchni sferycznych (litych i pustych wewnątrz), niekiedy występują cząstki, które nie uległy przetopieniu, a w sposób mechaniczny zostały oderwane od elektrod. Świadczy to o tym, że w pewnych warunkach mechaniczne oddziaływanie skutków wyładowania elektrycznego oraz powstające naprężenia cieplne w materiale mogą mieć znaczący wpływ na efekt końcowy obróbki (zwłaszcza w przypadku obróbki materiałów bardzo kruchych).

W efekcie postępującego procesu erozji elektrycznej, podczas kolejnych wyładowań, w miarę dosuwania elektrody roboczej, następuje kształtowanie przedmiotu obrabianego. Równoległe z usuwaniem materiału przedmiotu obrabianego następuje erozja elektrody roboczej, której naturalnym skutkiem jest jej zużycie i zmiana pierwotnych wymiarów.

Przebieg wyładowań w procesach obróbki elektroerozyjnej jest charakterystyczny dla każdej z odmian obróbki oraz stopowania elektroiskrowego.

Analiza dostępnej literatury [66, 75, 81] wskazuje, że prowadzone były badania dotyczące opisu zjawisk towarzyszących wyładowaniom w szczelinie międzyelektrodowej [26]. Badania miały na celu określenie temperatury kanału plazmowego [5], modelowanie zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi EDM [22], symulacje metodą MES wpływu warunków obróbki na stan warstwy wierzchniej w zakresie dotyczącym odkształceń, naprężeń oraz mikrostruktury materiału [17].

1.3. Przegląd obrabiarek elektroerozyjnych

Obrabiarki elektroerozyjne dzielą się na dwa podstawowe typy: drążarki wgłębne EDM (SEDM) (*ang.* Die-Sink Electrical Discharge Machine) oraz przecinarki/wycinarki drutowe WEDM (*ang.* Wire Electrical Discharge Machine). Obok nich można wyróżnić jeszcze inne urządzenia tego rodzaju, jak obrabiarki hybrydowe np. łączące w procesie usuwania materiału czynniki związane z elektroerozją oraz proces elektrochemiczny (ECDM) [77], wier-

tarki EDM (*ang.* Drilling EDM) [14] czy obrabiarki ścierno-elektroerozyjne AEDG (*ang.* Abrasive Electro-Discharge Grinding) [34].

Obrabiarki elektroerozyjne posiadają najczęściej numeryczne systemy sterowania i oprogramowanie CNC. Obok zaawansowanych technologicznie modeli obrabiarek na rynku obecnie oferowane są także tańsze urządzenia o gorszych parametrach przeznaczone do mniej złożonych lub mniej dokładnych prac.

Liczącymi się na rynku producentami obrabiarek elektroerozyjnych są firmy takie jak: Makino, Sodick [114], +GF+ AgieCharmilles [113], Zimmer & Kreim (rys. 1.6), Mitsubishi Electric, Knuth, Creator Precision, Sarix, Exeron, Fanuc.



Rys. 1.6. Przykłady obrabiarek wiodących firm światowych, a) Makino (<https://www.makino.com> [online: 17.01.2023]), b) Sodick (<http://www.sodick.com> [online:17.01.2023]), c) +GF+ AgieCharmilles (<http://www.gfms.com> [online: 17.01.2023]), d) Zimmer & Kreim (<https://apx.pl> [online: 17.01.2023])

W chwili obecnej krajowym producentem obrabiarek elektroerozyjnych jest ZAP BP (Zakład Automatyki Przemysłowej B. P.) w Końskich [115] – produkujący drążarki wgłębne oraz wycinarki (rys. 1.7).



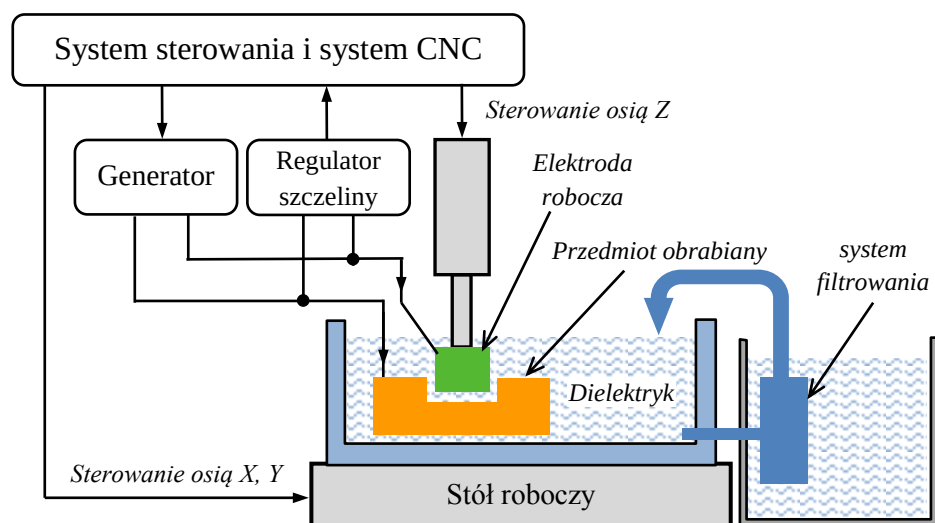
Rys. 1.7. Przykłady obrabiarek elektroerozyjnych polskiego producenta ZAP BP Kutno-Końskie (<http://www.zapbp.com.pl> [online: 17.01.2023])

1.4. Podstawy budowy obrabiarek elektroerozyjnych

Obrabiarka elektroerozyjna zbudowana jest z kilku podzespołów mechanicznych, elektrycznych, elektronicznych, hydraulicznych oraz pneumatycznych. Do sterowania procesem obróbki wymagane jest także oprogramowanie komputerowe oraz układy wykonawcze sterowania. Typowe obrabiarki elektroerozyjne posiadają następujące komponenty:

- stół roboczy związany z przestrzenią obróbką,
- generator mocy zasilający obwód roboczy (szczelinę międzyelektrodową) w energię elektryczną o wymaganej charakterystyce,
- regulator szczeliny międzyelektrodowej,
- system podawania i filtrowania dielektryka,
- zespół serwonapędów obrabiarki do przemieszczania osi,
- układ zasilania maszyny,
- komputerowy system sterowania CNC,
- interfejs użytkownika do komunikacji z obrabiarką.

Uproszczony schemat blokowy drążarki wgłębnej przedstawiony jest na rys. 1.8.



Rys. 1.8. Uproszczony schemat blokowy elektrodrążarki wgłębnej

1.5. Wymagania stawiane generatorom EDM

W procesie drążenia elektroerozyjnego niezwykle istotnym elementem związanym z obróbką jest osiągnięcie ścisłych zależności między parametrami obróbki a jej efektami. Opisywane zależności osiągnąć są w wyniku dostarczania przez generator odpowiedniej ilości energii elektrycznej do szczeliny międzyelektrodowej w określonym czasie. Właściwy dobór parametrów procesu pozwala na uzyskanie zamierzonego efektu końcowego w postaci właściwej chropowatości powierzchni przedmiotu czy odpowiedniej wydajności obróbki. W trakcie obróbki w szczeliny międzyelektrodowej może dochodzić do niepożądanych zjawisk takich jak stan zwarcia czy jarzenie się łuku elektrycznego, co wpływa w negatywny sposób na proces obróbki, w tym na cechy struktury geometrycznej powierzchni przedmiotu obrabianego czy niekontrolowany lokalny ubytek materiału. Opisywane czynniki są bardzo istotne z punktu widzenia jakimi cechami powinien charakteryzować się generator mocy zasilający obwód roboczy obrabiarki (szczelinę międzyelektrodową). Można wyspecyfikować pożądane cechy generatorów zasilających obwody robocze obrabiarek elektroerozyjnych istotne przy ich projektowaniu lub doborze:

- możliwość zadawania wybranej wartości napięcia zapłonu,

- wydajność prądowa układu zasilania, od pojedynczych amperów po setki amperów, z możliwością ustawiania ograniczenia wartości prądu,
- stabilność napięcia zapłonu w funkcji czasu i obciążenia szczeliny,
- stabilność napięcia zasilającego generator w trakcie procesu elektroerozji,
- możliwość zmiany polaryzacji elektrod,
- możliwość generowania impulsów o zadanym przez operatora czasie, od pojedynczych mikrosekund po milisekundy, dla procesu mikro-drażenia czas impulsu poniżej mikrosekund,
- możliwość generowania przerwy pomiędzy impulsami o zadanym przez operatora czasie, od pojedynczych mikrosekund po milisekundy. Czas trwania impulsu i czas trwania przerwy ma duży wpływ na jakość procesu obróbki,
- możliwość doboru nastaw parametrów elektrycznych w zależności od rodzaju obróbki – zgrubna, dokładana, wykończeniowa,
- dostarczenie odpowiedniej wartości prądu elektrycznego do szczeliny międzyelektrodowej, ograniczenie wartości maksymalnej prądu przepływającego przez szczelinę roboczą, a tym samym dostarczenie do szczeliny określonej energii w zadanym czasie, która zostanie wykorzystana w procesie drażenia,
- współpraca z układem wstępnej polaryzacji szczeliny (napięcie DC o wartości od kilku do kilkunastu woltów) w celu wykrycia styku elektrycznego pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą np. w procesie bazowania (pozycjonowania) przedmiotu obrabianego względem układu odniesienia,
- współpraca z układem do analizy warunków panujących w szczelinie roboczej (np. poprzez badanie stanu dielektryka, badanie stanów przedzwarciovych) w trakcie przerwy pomiędzy impulsami lub w trakcie pozycjonowania przedmiotu obrabianego,
- odporność układu na stany zwarcia, które w sposób losowy występują w trakcie drażenia,
- możliwość szybkiego wyłączenia napięcia zasilającego obwód roboczy np. w przypadku zwarcia lub sytuacjach awaryjnych,
- możliwość uzyskania pożądanego przebiegu prądu,
- powtarzalność przebiegów napięcia i prądu w obwodzie roboczym,
- możliwość kontrolowania szybkości narastania prądu do wartości zadanej i szybkości opadania prądu,
- odporność na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne (EMC),

- ograniczony poziom zakłóceń EMC generowanych przez układ zasilający,
- wpływ generatora na współpracę z siecią energetyczną,
- wpływ wahań napięcia w sieci energetycznej na parametry impulsów wyjściowych (prądu i napięcia),
- wpływ generatora na sieć energetyczną w chwili włączania (soft start), stanu zwarcia, stanu jałowego,
- sprawność energetyczna generatorów, moc cieplna tracona na elementach elektrycznych i elektronicznych,
- impedancja wewnętrzna generatora,
- wpływ kabli połączeniowych na pracę generatora i obrabiarki,
- wpływ generatora na pozostałe układy elektryczne i elektroniczne (układy elektroniczne i komputerowe) w elektrodrażarce,
- możliwość pomiaru spadku napięcia w szczelinie i pomiar prądu szczeliny,
- sygnalizacja stanów alarmowych i awaryjnych (brak napięcia zasilania, przekroczenie temperatury elementów składowych),
- izolacja galwaniczna od sieci energetycznej oraz od innych układów sterowania i kontroli w drążarce,
- zachowanie norm bezpieczeństwa elektrycznego.

Przy doborze lub projektowaniu generatora należy uwzględnić również inne wymagania o charakterze mechanicznym czy ekonomicznym:

- masa układu generatora,
- wymiary, gabaryty, sposób montażu,
- sposób wentylowania i chłodzenia,
- wpływ temperatury, wilgotności, zapylenia, innych czynników środowiska miejsca pracy,
- wpływ drgań i wibracji mechanicznych towarzyszących pracy generatora,
- łatwość montażu i czynności serwisowych, przyjazność obsługi,
- awaryjność, koszt serwisowania i napraw,
- łatwość naprawy, dostępność do dokumentacji, dostępność elementów zamiennych,
- koszt eksploatacji,
- koszt projektu, koszt wykonania, koszt zakupu.

W tabeli 1 przedstawiono typowe wartości parametrów pracy generatorów dla różnych odmian obróbki elektroerozyjnej obejmujące napięcie zapłonu, prąd w szczelinie oraz czas impulsu.

Tabela 1. Typowe zakresy parametrów elektrycznych generatorów dla różnych rodzajów obróbki elektroerozyjnej

Rodzaj obróbki	Napięcie zapłonu V	Prąd szczeliny A	Czas impulsu t_i i czas przerwy t_0 μs
Nano EDM	50 – 100	0,001 – 0,01	0,01 – 1
Mikro EDM	50 – 120	0,01 – 1	0,1 – 10
(S)EDM	100 – 400	1 – 1000	1 – 1000
WEDM	50 – 250	1 – 1000	0,1 – 10

1.6. Przebieg napięcia i prądu w szczelinie międzyelektrodowej

Przebieg napięcia w szczelinie międzyelektrodowej jest zależny od typu generatora oraz szeregu uwarunkowań o charakterze elektrycznym i mechanicznym.

Na przebieg napięcia i natężenia prądu w szczelinie mają wpływ następujące czynniki:

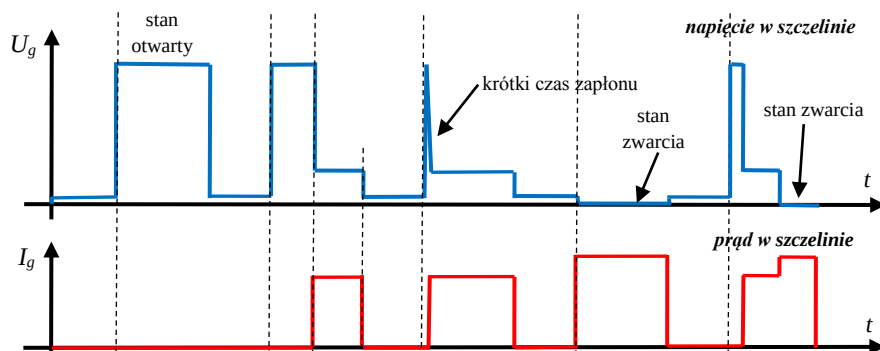
- konstrukcja generatora i jego parametry elektryczne, takie jak impedancja wyjściowa w trakcie impulsu i w trakcie przerwy, szybkość włączania/wyłączania łączników, parametry pasożytnicze stopnia wyjściowego generatora, pojemność i indukcyjność połączeń elektrycznych,
- parametry elektryczne kabla połączeniowego, pojemność i indukcyjność pasożytnicza,
- parametry czasowe impulsu sterującego (czas impulsu, czas przerwy),
- parametry elektryczno-mechaniczne szczeliny, (pojemności układu elektrod, indukcyjność elektrod, materiał elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego, konduktancja dielektryka).

W procesie drążenia można wyróżnić następujące charakterystyczne stany panujące w szczelinie międzyelektrodowej (rys. 1.9):

- stan drążenia – stan pożądany,
 - po podaniu impulsu napięciowego na układ elektrod następuje zapłon z opóźnieniem od kilkuset nanosekund do kilku mikrosekund. Przez obwód roboczy, a zatem szczelinę międzyelektrodową, zaczyna przepływać prąd elektryczny i nastę-

puje zainicjowanie właściwego procesu drażenia. Po wyłączeniu impulsu, napięcie i prąd w szczelinie zanikają;

- stan zwarcia w przypadku braku napięcia zapłonu,
 - układ elektrod zasilany jest napięciem polaryzacji wstępnej. Występowanie stanu zwarcia oznacza bezpośredni kontakt elektryczny (styk) pomiędzy elektrodą roboczą a przedmiotem obrabianym. Dalsze dosuwanie elektrody lub przedmiotu spowoduje uszkodzenia mechaniczne elementów;
- stan zwarcia w przypadku aktywnego napięcia zapłonu,
 - stan zwarcia może powstać w chwili podania napięcia zapłonu lub w trakcie przebiegu właściwego procesu elektroerozji. Zwarcie spowodowane jest zbyt małą odległością pomiędzy elektrodami lub produktami elektroerozji, które nie zostały całkowicie wypłukane ze szczeliny;
- stan otwarty,
 - po podaniu impulsu napięciowego nie następuje zapłon w szczelinie roboczej. Stan ten występuje w przypadku gdy elektroda i przedmiot obrabiany są oddalone od siebie na zbyt dużą odległość i nie są spełnione warunki niezbędne do zainicjowania wyładowania;
- stan otwarty w trakcie procesu,
 - po wystąpieniu zapłonu i pojawieniu się prądu drażenia, następuje przerwanie procesu przed zakończeniem impulsu. Może to być spowodowane oddaleniem się elektrody od przedmiotu obrabianego w wyniku działania układu regulacyjnego szczeliny;
- krótki czas opóźnienia zapłonu lub jego brak,
 - zapłon następuje bardzo szybko po pojawieniu się impulsu napięciowego. Czas opóźnienia zapłonu jest bardzo krótki (czasy nanosekundowe) lub prawie nie występuje. Przyczyną tego stanu jest zbyt mała szerokość szczeliny międzyelektrodowej. Zbyt krótki czas może wskazywać na występowanie łuku elektrycznego w szczelinie, co jest zjawiskiem niekorzystnym w przypadku obróbki elektroerozyjnej.



Rys. 1.9. Przykłady przebiegów napięcia i prądu w szczelinie międzyelektrodowej dla stanu otwartego obwodu roboczego, stanu drążenia oraz zwarcia

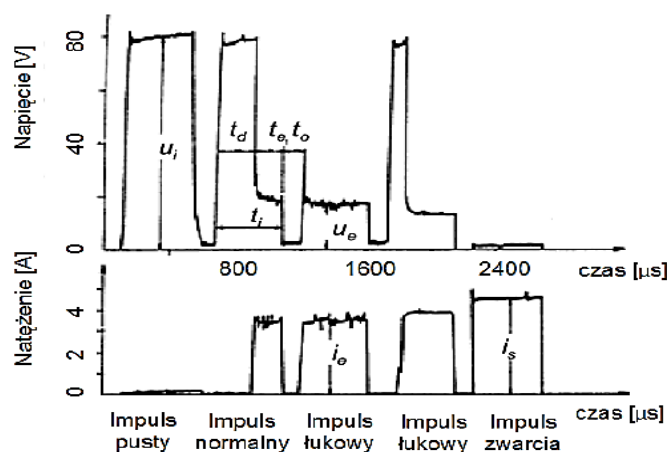
Monitorowanie stanów występujących w szczelinie międzyelektrodowej jest istotne z uwagi na prawidłowe funkcjonowanie układu sterowania generatorem oraz układu regulatora szczeliny roboczej. W celu wykrycia stanu otwartego, stanu zwarcia lub stanu właściwego wyładowania wykorzystywane są zespoły komparatorów napięciowych porównujących napięcie panujące w szczelinie międzyelektrodowej z napięciami odniesienia. W przypadku występowania łuku elektrycznego wymagane jest zastosowanie bardziej skomplikowanych metod, które pozwalają na jego identyfikację. Należą do nich następujące sposoby:

- pomiar czasu opóźnienia zapłonu, zbyt krótki czas lub jego całkowity brak świadczy o występowaniu łuku,
- pomiar napięcia w szczelinie po wystąpieniu zapłonu, jeżeli napięcie posiada mniejszą wartość w porównaniu do wartości odniesienia, to stan ten może wskazywać na występowanie łuku. Występują także przypadki, że proces erozyjny zaczyna się z właściwą wartością napięcia w szczelinie, a po pewnym czasie przechodzi w łuk elektryczny,
- pomiar szybkości opadania napięcia od chwili wystąpienia zapłonu, duża stromość sygnału może wskazywać na występowanie łuku elektrycznego,
- pomiar zawartości harmoniczných w sygnale napięcia w szczelinie, pojawienie się określonych częstotliwości w widmie sygnału napięciowego może świadczyć o występowaniu łuku elektrycznego.

Zastosowanie opisanych powyżej metod analizy sygnałów napięciowych wiąże się z odpowiednim ustawieniem i dostrojeniem parametrów elektrycznych obróbki materiału elektrody roboczej i przedmiotu obrabianego oraz parametrów dielektryka dla danego generatora.

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele danych na temat przebiegów napięcia i prądu w obróbce elektroerozyjnej [29, 87]. Wartość poznawcza, w analizowanych pozycjach, zależy od zastosowanej przez autorów metodyki oraz warunków prowadzenia pomiarów takich jak: dokładność, pasmo przenoszenia systemu pomiarowego, a także sposób wykonania pomiaru.

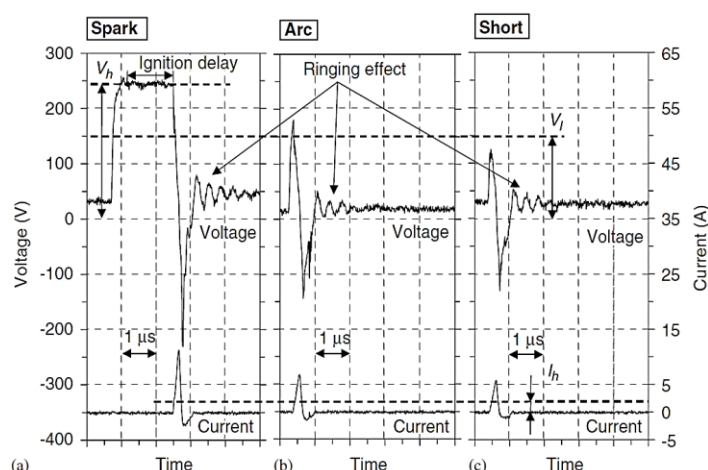
Przedstawione na rys. 1.10 i rys. 1.11 wykresy ilustrują przykładowe przebiegi napięcia i prądu w szczelnie międzyelektrodowej.



Rys. 1.10. Przykład identyfikacji różnych stanów wyładowań w szczelinie roboczej na podstawie kształtu przebiegu wartości prądu oraz napięcia elektrycznego w szczelinie roboczej [87]

Snoeys, Dauw, Kruth [87] zaproponowali podział impulsów występujących w EDM na pięć kategorii: impulsy napięcia, impulsy puste (bez przepływu prądu), normalne wyładowanie elektryczne, wyładowanie łukowe pierwszego i drugiego typu, impulsy zwarcia.

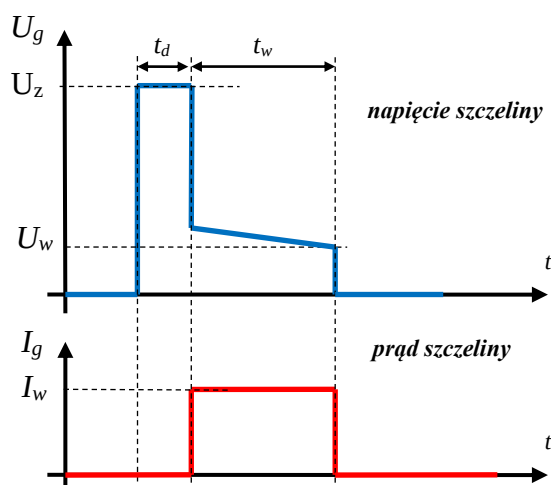
Kao i Shih [29] dokonali analizy poszczególnych fragmentów sygnałów elektrycznych układu międzyelektrodowego i na tej podstawie rozpoznali stan otwarty, wyładowanie właściwe, stan zwarcia i wyładowanie łukowe. Widać na nich szumy objawiające się krótkimi wahaniami wartości napięcia i prądu w trakcie drażenia, oscylacje oraz przełączenia.



Rys. 1.11. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu w trakcie procesu elektroerozyjnego dla poszczególnych stanów. a) *Spark* – wyładowanie prawidłowe, b) *Arc* – wyładowanie łukowe, c) *Short* – zwarcie [29]

1.7. Energia wyładowań elektrycznych w szczelinie międzyelektrodowej

W czasie procesu drążenia energia elektryczna z generatora jest podawana do układu elektrod, zasilając w ten sposób szczelinę międzyelektrodową, gdzie inicjowane są wyładowania elektryczne odpowiedzialne za proces elektroerozji. Obróbka elektroerozyjna jest metodą wymagającą dostarczenia znacznej ilości energii. Zużycie jednostkowe może osiągnąć ok. 1000 J/mm^3 , co w porównaniu do konwencjonalnych obróbek np. skrawania, gdzie analizowany parametr osiąga wartość ok. 4 J/mm^3 [48], jest znaczną wartością. Przyjmując wyidealizowane kształty przebiegów napięcia i prądu w szczelinie międzyelektrodowej, takie jak na rys. 1.12, możliwe jest wyliczenie ilości energii dostarczanej z generatora zasilającego obwód roboczy obrabiarki.



Rys. 1.12. Uproszczone przebiegi napięcia i natężenia prądu w szczelinie międzyelektrodowej dla przypadku prawidłowego przebiegu wyładowania

Energię pojedynczego impulsu wyładowania można policzyć ze wzoru:

$$W = \int_0^{t_w} (U_w \cdot I_w) dt \quad (1.1)$$

gdzie:

- U_w - wartość napięcia w szczelinie w trakcie wyładowania (napięcie wyładowania),
- I_w - wartość natężenia prądu w szczelinie (prąd wyładowania),
- t_w - czas wyładowania.

Przyjmując wyidealizowane kształty przebiegu napięcia i wartości prądu w szczelinie międzyelektrodowej w funkcji czasu erozji t_w , wyrażenie 1.1 można przedstawić w uproszczonej postaci:

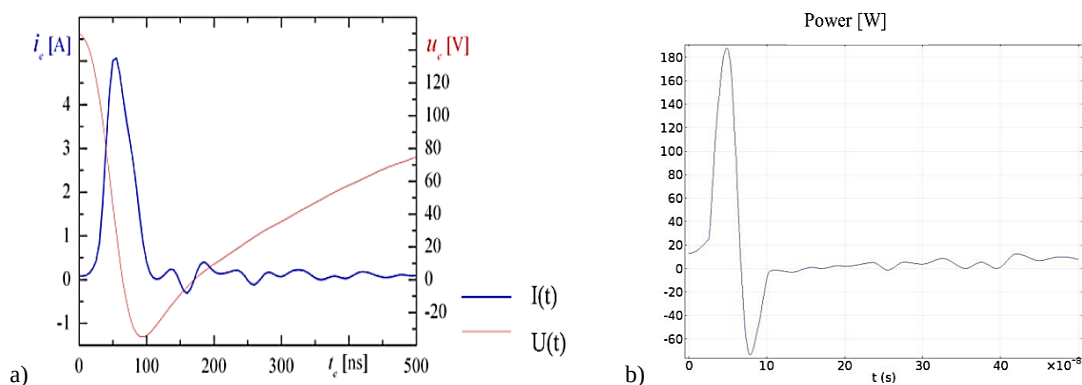
$$W = U_w \cdot I_w \cdot t_w \quad (1.2)$$

gdzie:

- U_w - średnie napięcie w szczelinie w trakcie wyładowania,
- I_w - średnia wartość natężenie prądu w szczelinie międzyelektrodowej,
- t_w - czas wyładowania.

Analiza wyrażenia 1.2 wskazuje, że kontrolowanie energii dostarczanej do szczeliny międzyelektrodowej może odbywać się poprzez zmianę wartości natężenia prądu wyładowania I_w i czasu wyładowania t_w . Napięcie wyładowania U_w w procesie obróbki elektroerozyjnej zmienia się w niewielkim zakresie w przedziale od 20 V do 30 V. Wartość średnia natężenia prądu pojedynczego wyładowania nie odwzorowuje w pełni zjawisk towarzyszących procesowi wyładowania elektrycznego. Kształt przebiegu wartości natężenia prądu wpływa w znaczący sposób na parametry wynikowe obróbki (parametry struktury geometrycznej powierzchni, wydajność procesu). W wycinarkach drutowych stosuje się bardzo krótkie impulsy nanosekundowe i mikrosekundowe, lecz o bardzo dużych wartościach szczytowych np. setek amperów. W drążarkach wgłębnych natomiast impulsy o dłuższym przebiegu, ale o mniejszej wartości szczytowej natężenia prądu. W procesie obróbki elektroerozyjnej pożądana jest stała wartość energii poszczególnych impulsów z generatora, bowiem w istotny sposób wpływa to na stan warstwy wierzchniej, w tym wynikową chropowatość powierzchni obrabianej.

Na podstawie przebiegu mocy pobieranej przez szczelinę, którego przykład jest przedstawiony na rys. 1.13, można modelować zjawiska cieplne zachodzące w materiale dla pojedynczego impulsu [24].

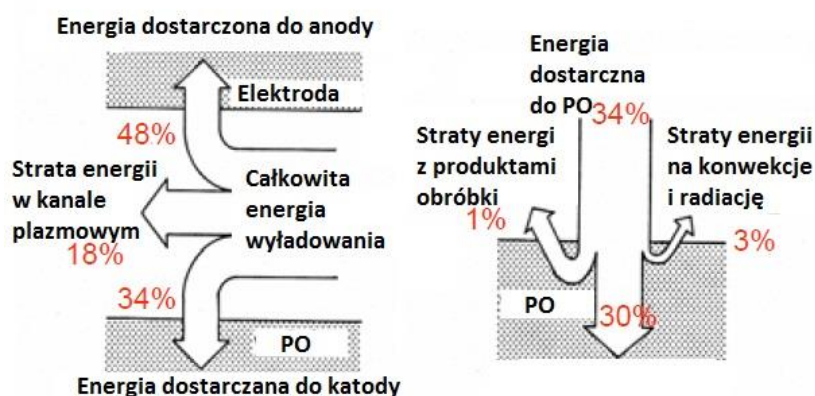


Rys. 1.13. Przykład przebiegu natężenia prądu i napięcia w szczelinie międzyelektrodowej dla pojedynczego impulsu (a), obliczony wykres mocy dla tych przebiegów (b), zastosowany generator szpilekowy [24]

Zadanie odpowiednich wartości parametrów energetycznych impulsu w obrabiarkce oraz ich rozkład w trakcie pojedynczego aktu wyładowania określonych poprzez czas impulsu, czas przerwy impulsu, to najbardziej istotne czynniki, które wpływają na efekty końcowe procesu obróbki elektroerozyjnej. W niektórych przypadkach producenci obrabiarek udostępniają dane dotyczące nastaw czasowych i operator obrabiarki może dokonywać ich doboru – definiując w ten sposób warunki prowadzenia procesu do obróbki wybranego materiału obrabianego, materiału elektrody i rodzaju obróbki (np. wstępna, zgrubna lub wykończeniowa).

Rozwój technologii materiałowej związany jest z opracowywaniem nowych materiałów cechujących się większą twardością, większą (niekiedy mniejszą) przewodnością. Wymaga to doboru nastaw parametrów generatora w celu osiągnięcia pożądanych parametrów wynikowych obróbki.

Istotnym zagadnieniem będącym przedmiotem wielu badań jest rozkład energii w przestrzeni międzyelektrodowej. Analiza wyników tych badań wskazuje, że tylko część dostarczonej do szczeliny energii jest wykorzystywana do usuwania materiału obrabianego, część odbierana jest przez elektrodę roboczą, a pozostała część energii jest tracona w wyniku procesów wymiany ciepła z otoczeniem (rys. 1.14) [35, 48].



Rys. 1.14. Przykładowy rozkład energii cieplnej w procesie erozji [111]

Schemat przedstawiony na rys. 1.14. ilustruje, że tylko 34% energii trafia do materiału obrabianego, z tego 30% trafia do materiału w wyniku przewodzenia ciepła, kolejne 3% stanowi bilans wymiany ciepła w wyniku zjawisk konwekcji i promieniowania. Pozostałe 1% energii jest odprowadzane z przestrzeni międzyelektrodowej wraz z produktami erozji do dielektryka. Rozpływ ciepła i rozkład temperatury w przedmiocie obrabianym jest kolejnym ważnym zagadnieniem, zwłaszcza w miejscu gdzie następuje przeskok iskry. Zagadnienia dotyczące wymiany ciepła i masy mają szczególne znaczenie z uwagi na wydajność procesu obróbki oraz jakość powierzchni ukształtowanej w wyniku skutków oddziaływań wyładowań elektrycznych [111].

Oprócz właściwego przebiegu impulsu napięciowego i prądowego w trakcie procesu dochodzi do lokalnych zwarć, jarzenia się łuku elektrycznego – te stany również wpływają na wzrost wartości prądu w obwodzie roboczym obrabiarki, a w efekcie mocy pobieranej z generatora, zwiększając energochłonność procesu elektrodrążenia.

1.8. Wpływ parametrów impulsu elektrycznego na proces elektroerozji

Badania procesu elektroerozji w zakresie dotyczącym obróbki ubytkowej materiałów pozwoliły na określenie szeregu zależności pomiędzy parametrami impulsów zasilających obwód roboczy obrabiarki a efektami obróbki. Charakterystyki napięciowo-prądowe przedstawione na rys. 1.10 umożliwiają analizę podstawowych zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami impulsów tj. przebiegami napięcia, natężenia prądu (parametrami energetycznymi) oraz parametrów czasowych impulsu, a skutkami ich oddziaływań w procesie elektroerozji. Poniżej zestawiono ocenę wpływu poszczególnych parametrów impulsu na efekty obróbki.

Wartość napięcia zapłonowego (U_z):

- wyższa wartość napięcia obwodu otwartego powoduje, że zapłon wystąpi przy większej szerokości szczeliny, w konsekwencji łatwiej jest przepłukać i oczyścić szczelinę roboczą z produktów erozji;

Wartość napięcia wyładowania (U_w):

- wyższa wartość napięcia wyładowania powoduje, że proces przebiega przy większej wartości szerokości szczeliny roboczej, skutkuje to zwiększeniem parametrów chropowatości powierzchni, większą wydajnością usuwania nadmiaru obróbkowego, łatwiejszą ewakuacją produktów erozji ze szczeliny międzyelektrodowej oraz łatwiejszym jej przepłukiwaniem przez dielektryk;

Wartość natężenia prądu wyładowania (I_w):

- wyższa wartość natężenia prądu wyładowania powoduje zwiększenie wydajności obróbki, powstawanie większych kraterów na powierzchni obrabianej oraz większą chropowatość powierzchni;

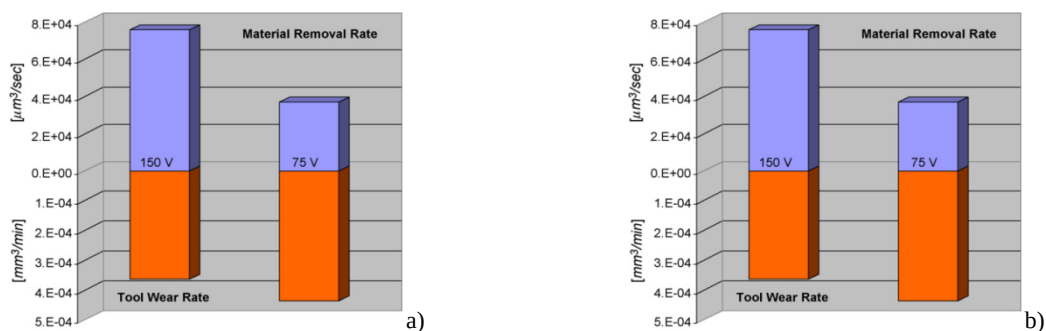
Czas impulsu prądu t_i :

- zwiększanie czasu impulsu powoduje dostarczanie większej ilości energii do szczeliny, co powoduje zwiększenie objętości wyerodowanego materiału, a w konsekwencji zwiększenie chropowatości obrabianej powierzchni. W wyniku przewodzenia ciepła wnika głębiej w materiał powodując zmiany strukturalne i wzrost naprężeń własnych;

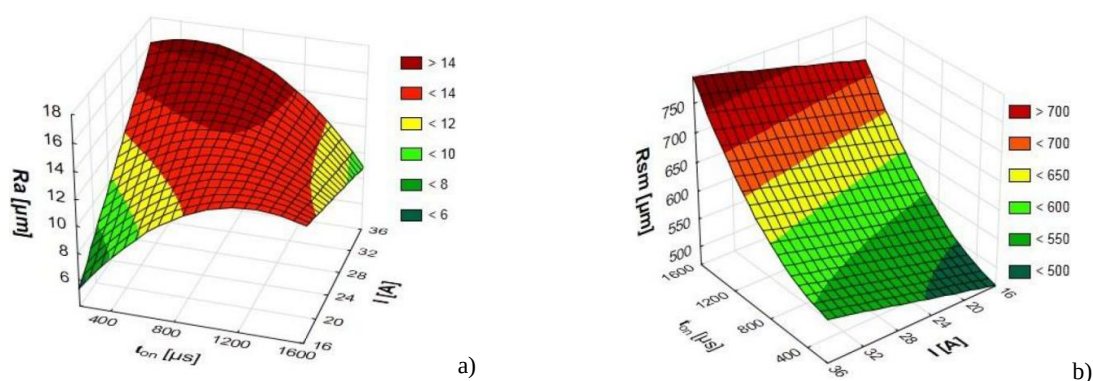
Czas przerwy t_0 :

- zwiększanie czasu przerwy pomiędzy impulsami prądu umożliwia lepsze przepłukanie szczeliny, powoduje łatwiejszą ewakuację produktów erozji, umożliwia dejonizację kanału wyładowania. Niepożądanym skutkiem jest zmniejszenie wydajności objętościowej procesu oraz wydłużenie czasu obróbki.

Oprócz ogólnej wiedzy dotyczącej wpływu poszczególnych parametrów energetycznych impulsu na efekt końcowy obróbki, istotna jest wiedza dotycząca charakteru zależności pomiędzy parametrami wejściowymi procesu a efektami obróbki – oraz jaki charakter mają przebiegi funkcji wiążące parametry wejściowe procesu z efektami obróbki. Przykładowe charakterystyki ilustrujące zależności pomiędzy parametrem impulsu a parametrami wyjściowymi obróbki przedstawiono na rys. 1.15, rys. 1.16, rys. 1.17.

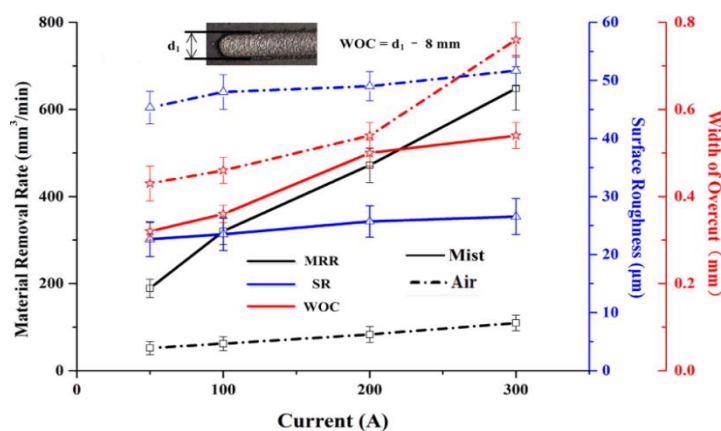


Rys. 1.15. Wpływ wartości napięcia zapłonu (a) i wartości prądu drążenia (b) na efektywność usuwania materiału (MRR) i zużycia elektrody (TWR) [88]



Rys. 1.16. Wpływ czasu impulsu i wartość prądu na parametry chropowatości powierzchni a) Ra oraz b) Rsm obrabianego materiału [61, 62]

Przytoczone wyniki badań pozwalają na ocenę jakościową skutków oddziaływań wyładowań elektrycznych na wydajność obróbki oraz konstituowanie technologicznej warstwy wierzchniej. Opracowane statystycznie wyniki badań stanowią podstawę do budowy modeli statystycznych wiążących parametry wejściowe procesu obróbki z efektami technologicznymi obróbki dla konkretnej elektrodrażarki oraz materiału.



Rys. 1.17. Wpływ wartości prądu drążenia na efektywność usuwania materiału (MRR), chropowatość powierzchni (SR) i szerokość cięcia (WOC) dla drążenia na sucho (Dry EDM), w przypadku gdy dielektrykiem jest powietrze (Air) lub mieszanina powietrza i wody dejonizowanej (mist) [82]

Należy podkreślić, że w wyniku analizy literaturowej dotyczącej opisu zjawisk fizycznych występujących w procesach obróbki elektroerozyjnej, brak jest dostępnych uniwersalnych modeli matematycznych opisujących w sposób kompleksowy zjawiska fizyczne występujące w szczelinie międzyelektrodowej.

1.9. Klasyfikacja generatorów stosowanych w obróbce elektroerozyjnej

Metoda obróbki elektroerozyjnej wymaga zastosowania układu zasilania dostarczającego odpowiednią ilość energii elektrycznej o wymaganej charakterystyce do przestrzeni międzyelektrodowej. Zastosowanie wymaganych wartości parametrów obróbki powoduje zainicjowanie i rozwój procesu wyładowania elektrycznego i umożliwia uzyskanie wymaganych parametrów wynikowych obróbki. W początkowej fazie rozwoju obróbki elektroerozyjnej stosowano proste rozwiązania układów generatorów, w tym układów elektromechanicznych. Do realizowania typowych przypadków obróbki elektroerozyjnej nadal wykorzystywane są proste układy zasilające obwody robocze obrabiarki takie jak generatory typu RC, zbudowane z zasilacza stałoprądowego, rezystora ograniczającego wartość prądu i kondensatora gromadzącego ładunek elektryczny.

Wraz z rozwojem inżynierii materiałowej i opracowaniem nowych materiałów stanowiących przedmiot obróbki elektroerozyjnej wzrastały wymagania dotyczące jakości układów zasilających obwody mocy obrabiarek elektroerozyjnych. Szeroko stosowanymi rozwiązaniami stały się układy kontrolujące moc, wartość natężenia prądu oraz napięcie podawane do układu elektrod. W rozwiązaniach generatorów stosowane były również układy sterujące łącznikami mocy. W wyniku wieloletnich prac badawczych opracowano nowe rozwiązania o stabilnych wartościach parametrów prądowo-napięciowych przy równoczesnej możliwości ich kontrolowania. Egzemplifikacją nowoczesnej technologii w zastosowaniach przemysłowych są generatory, których zasada pracy bazuje na impulsowych przekształtnikach rezonansowych z zaawansowanym układem sterowania [12, 25].

Współczesny przemysł, w zależności od postawionych wymagań, stosuje różne rodzaje generatorów do zasilania obrabiarek elektroerozyjnych, począwszy od prostych rozwiązań, po bardzo zaawansowane technicznie. Większość firm produkujących obrabiarki elektroerozyjne nie ujawnia stosowanych przez nie rozwiązań, część z nich chroniona jest patentami. Użytkownicy, poza wiedzą niezbędną do obsługi obrabiarek, nie mają możliwości poznania ani budowy, ani dokładnych parametrów elektrycznych układów zasilających. Określenia

stosowane w dokumentacji technicznej obrabiarek są zwykle lakoniczne, np. generator Mosfet, generator tranzystorowy, generator RC czy generator bezrezystorowy (*ang.* resistorsless power supply). Nie ujawniane są również algorytmy sterowania obrabiarek w zakresie dotyczącym funkcjonowania obwodów roboczych.

Na cechy użytkowe generatora wpływa wiele czynników począwszy od układowego rozwiązania stopnia mocy generatora, metody pomiaru np. prądu i napięcia w szczelinie międzyelektrodowej, algorytmy sterowania i kontroli elementów mocy, wreszcie jakość użytych w generatorze elementów elektrycznych i elektronicznych.

Z uwagi na fakt, że stosowane obecnie generatory pracują w zakresie częstotliwości przełączania tranzystorów rzędu setek kHz i MHz, istotna jest również konstrukcja elektro-mechaniczna, połączenia kablowe generatora, występujące pojemności, indukcyjności, sprzężenia magnetyczne, sprzężenia pojemnościowe czy elementy pasożytnicze obwodu elektrycznego, mające negatywny wpływ na jego funkcjonowanie.

Odpowiednia jakość i dobór komponentów składowych jest niezbędna nawet w przypadku mało skomplikowanych generatorów RC, gdy wymagania stawiane wobec nich dotyczą bardzo krótkich impulsów prądowych rzędu dziesiątek i setek nanosekund. Również taki układ wymaga stosownego połączenia elementów i krótkich (o niskiej indukcyjności) połączeń z układem elektrod.

Zróżnicowane wymagania dla poszczególnych rodzajów obróbki elektroerozyjnej pozwalają dokonać podziału generatorów na stosowane w wycinarkach drutowych (WEDM), w drążarkach wgłębnych (EDM) oraz w przypadku mikroobróbki elektroerozyjnej (μ EDM).

Literatura przedmiotu, dotycząca generatorów, umożliwia usystematyzowanie pewnych cech, którymi powinien charakteryzować się układ zasilania. Właściwy dobór parametrów związany jest głównie ze zwiększeniem wydajności obróbki przy uzyskiwanej wymaganej chropowatości powierzchni, w połączeniu z mniejszym zużyciem elektrody roboczej oraz mniejszym zużyciu energii elektrycznej [3]:

- w przypadku wycinarek drutowych ważne jest osiągnięcie bardzo dużych wartości szczytowych natężenia prądu (nawet powyżej tysiąca amperów), w bardzo krótkim impulsie (setki nanosekund i pojedyncze mikrosekundy),
- dla układów zasilania stosownych do drążarek wgłębnych ważne jest, aby generator dostarczał dużych wartości szczytowych natężenia prądu (na poziomie setek amperów), czas impulsu powinien być zadawany w dużym przedziale zmienności od setek nanosekund do tysięcy mikrosekund,

- dla mikro obróbki EDM ważne są bardzo krótkie impulsy rzędu dziesiątek i setek nanosekund,
- dla wycinarek oraz drążarek wgłębnych, w przypadku których moce generatorów są powyżej setek watów, ważnym parametrem jest sprawność energetyczna układu generatora,
- dla każdego rodzaju obróbki pożądane jest, aby generator mógł dostarczać krótkie impulsy, ale z możliwie dużą częstotliwością, tak aby czas pomiędzy impulsami był jak najkrótszy, a zarazem możliwy do ustawienia.

Doświadczenie własne autora umożliwia dokonanie analizy stosowanych obecnie rozwiązań układowych generatorów, a także dokonania ich klasyfikacji z uwagi na:

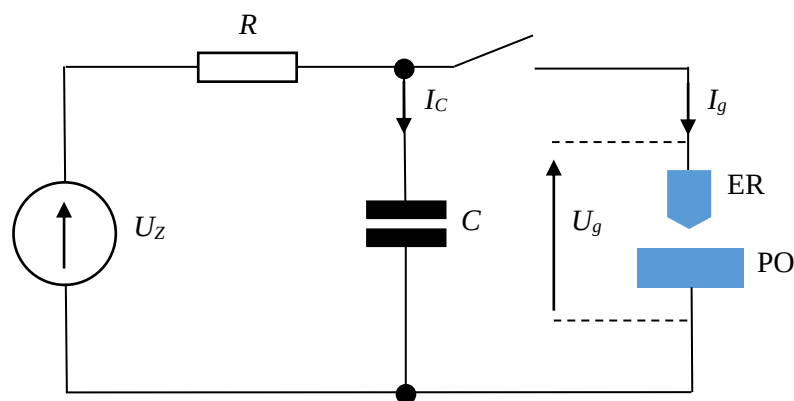
- sposób (tryb) działania – relaksacyjne i statyczne,
- konstrukcję elektryczno-elektroniczną i rodzaj zastosowanych elementów – RC, RLC, RLCD, tranzystorowe, impulsowe,
- parametry czasowe impulsów wyjściowych – izoczęstotliwościowe, izoenergetyczne,
- podział generatorów można dokonać z uwagi na zastosowanie i przeznaczenie (WEDM, EDM, SEDM, mikroEDM, ECM),
- kształt impulsu prądowego – prawie prostokątny, trójkątny, szpilkowy,
- charakter pracy jako źródła energii – napięciowy lub prądowy.

1.9.1. Klasyfikacja generatorów ze względu na sposób działania

Podstawowe kryterium podziału generatorów obejmujące sposób ich działania, pozwala dokonać klasyfikacji na:

- generatory relaksacyjne,
- generatory statyczne.

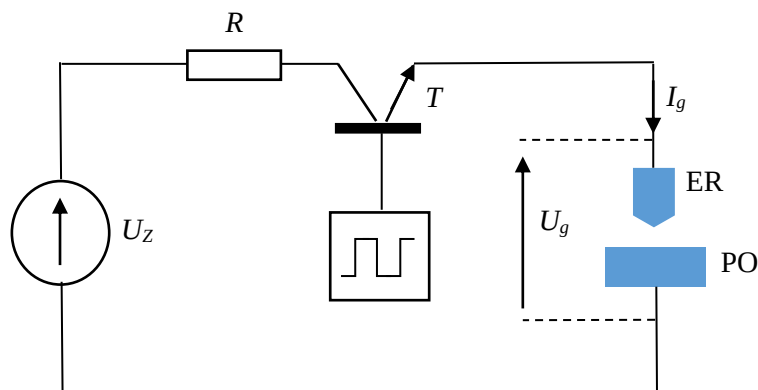
Generatory RC były pierwszymi układami relaksacyjnymi (rys. 1.18). Częstotliwość generowanych impulsów, a tym samym czas impulsu i czas przerwy w generatorach tego typu jest zależny od stałej czasowej elementów RC oraz od stałej czasowej RC szczeliny międzyelektrodowej. Opisany układ umożliwia samodzielne ładowanie i rozładowanie kondensatora, w zależności od warunków panujących w szczelinie międzyelektrodowej. Główna wada układu związana jest z tym, że uzyskanie wpływu na parametry czasowe impulsów jest możliwe jedynie poprzez zmianę wartości parametrów elementów RC.



Rys. 1.18. Podstawowy schemat generatora relaksacyjnego RC

Źródłem energii w generatorach relaksacyjnych może być kondensator (dotyczy to układu RC), indukcyjność (dotyczy to układu RLC), kombinacja kondensatora oraz indukcyjności (układ RLCD lub LC).

Generatory statyczne np. tzw. generatory tranzystorowe z rezystorem szeregowym, którego podstawowy schemat przedstawiono na rys. 1.19, pozwalają na ustawienie niemal dowolnego czasu impulsu i czasu przerwy. Ograniczenia pracy w tego typu generatorach występują w przypadku krótkich impulsów (przy wysokich częstotliwościach przełączania, rzędu megaherców). Charakterystyki czasowe tranzystorów (szybkość przełączania) oraz występowanie elementów pasożytniczych w postaci indukcyjności oraz pojemności, ograniczają stromości narastania i opadania wartości napięcia oraz prądu w obwodzie mocy.



Rys. 1.19. Podstawowy schemat tzw. generatora tranzystorowego, statycznego

1.9.2. Klasyfikacja generatorów ze względu na cechy konstrukcyjne

Podziału generatorów można dokonać z uwagi na zastosowane w nich cechy konstrukcyjne, takie jak elementy elektryczne, elektroniczne i rozwiązania układowe.

Z uwagi na powyższe kryterium rozwiązania układowe bazują na:

- podstawowych elementach elektrycznych – generatory RC lub RLC,

- podstawowych elementach elektrycznych RC, RLC i elementach półprzewodnikowych mocy, (diodach i łącznikach półprzewodnikowych typu tyrystor, tranzystor bipolarny, tranzystor unipolarny Mosfet, tranzystor IGBT) – są to generatory RLCD z łącznikami tranzystorowymi,
- wyłącznie na rezystorach i elementach półprzewodnikowych mocy, (diodach i łącznikach typu tyrystor, tranzystor bipolarny, tranzystor Mosfet, tranzystor IGBT), rezystory służą do ograniczenia wartości natężenia prądu – są to generatory tzw. tranzystorowe lub statyczne,
- układach, w których stosowane są elektroniczne źródła prądowe, w których tranzystory mocy pracują jako elementy liniowe (stabilizacja prądu w trakcie procesu),
- układach, w których stosowane są elektroniczne źródła prądowe, zbudowanych na bazie rozwiązań z wykorzystaniem przekształtników impulsowych, w których występują elementy indukcyjne (L), a tranzystory pracują jako łączniki z tzw. twardym przełączaniem,
- układach, w których stosowane są elektroniczne źródła prądowe zbudowane w oparciu o rozwiązania z rezonansowymi przekształtnikami impulsowymi, w których występują elementy indukcyjne i pojemnościowe (LC), a tranzystory pracują jako łączniki z tzw. miękkim przełączaniem – są to układy rezonansowe.
- układach wzmacniaczy mocy wysokiej częstotliwości.

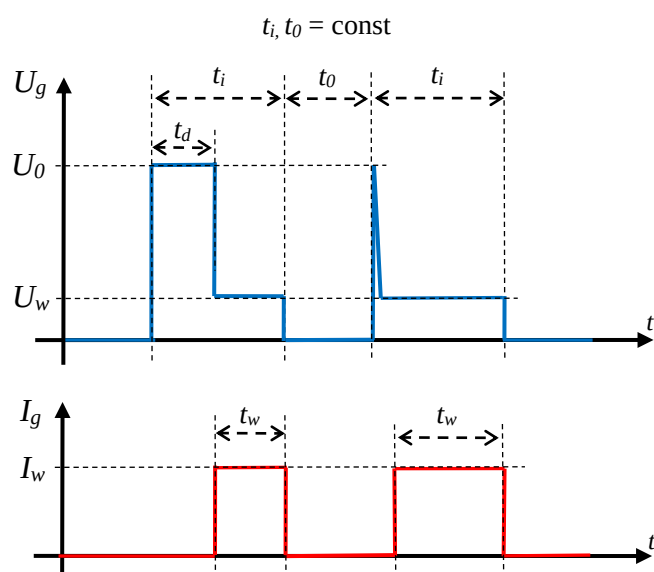
1.9.3. Klasyfikacja generatorów ze względu na parametry czasowe generowanych impulsów

Generatory można też podzielić ze względu na parametry czasowe generowanych impulsów na dwa podstawowe typy:

- generatory izoczęstotliwościowe – o stałej częstotliwości impulsów,
- generatory izoenergetyczne – o stałym czasie wyładowania.

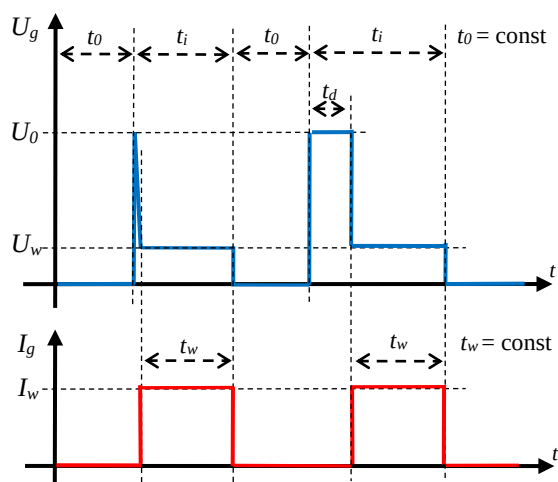
Generatory izoczęstotliwościowe (stało częstotliwościowe) wytwarzają impulsy elektryczne o określonych parametrach – czasie przerwy t_0 i czasie impulsu t_i , ale zmiennym czasie wyładowania t_w zależnym od przebiegu procesu elektroerozyjnego (rys. 1.20). Generatory tego rodzaju nie zapewniają stałej energii impulsów. Właściwość ta skutkuje tym, że wyładowania elektryczne posiadają różną energię i powodują powstawanie kraterów o różnej obję-

tości wyerodowanego materiału z powierzchni obrabianej, zależą one od czasu impulsu prądu z generatora, który nie ma stałej wartości.



Rys. 1.20. Przebiegi impulsów generatora izoczęstotliwościowego; I_w - natężenie prądu wyładowania, U_0 - napięcie jałowe, U_w - napięcie wyładowania, t_i - czas impulsu, t_0 - czas przerwy, t_w - czas wyładowania, t_d - czas opóźnienia wyładowania

Generatory izoenergetyczne (stało energetyczne) charakteryzują się niezmiennością czasu wyładowania t_w i zapewniają stałą wartość energii impulsu wyładowania w warunkach, gdy wystąpi właściwy zapłon i rozwój procesu wyładowania (rys. 1.21). Czasy przerwy t_0 oraz impulsu wyładowania t_w posiadają stałą wartość, a ciągłym zmianom podlega parametr czasu impulsu t_i . W generatorze izoenergetycznym układ sterowania generatora oczekuje do chwili gdy wystąpi zapłon, od tej chwili odliczany jest czas t_w .



Rys. 1.21. Przebiegi generowanych impulsów generatora izoenergetycznego I_w - natężenie prądu wyładowania, U_0 - napięcie jałowe, U_w - napięcie wyładowania, t_i - czas impulsu, t_0 - czas przerwy, t_w - czas wyładowania, t_d - czas opóźnienia wyładowania

Zjawiska fizyczne zachodzące w procesie elektroerozji mają charakter stochastyczny i zależne są w głównej mierze od warunków panujących w szczelinie międzyelektrodowej w danej chwili. Opisywany stan stanowi przyczynę dla którego nie wszystkie impulsy doprowadzane do układu elektrod powodują właściwe wyładowania elektryczne. Część wyładowań nie jest inicjowana w ogóle lub następuje z pewnym opóźnieniem t_d .

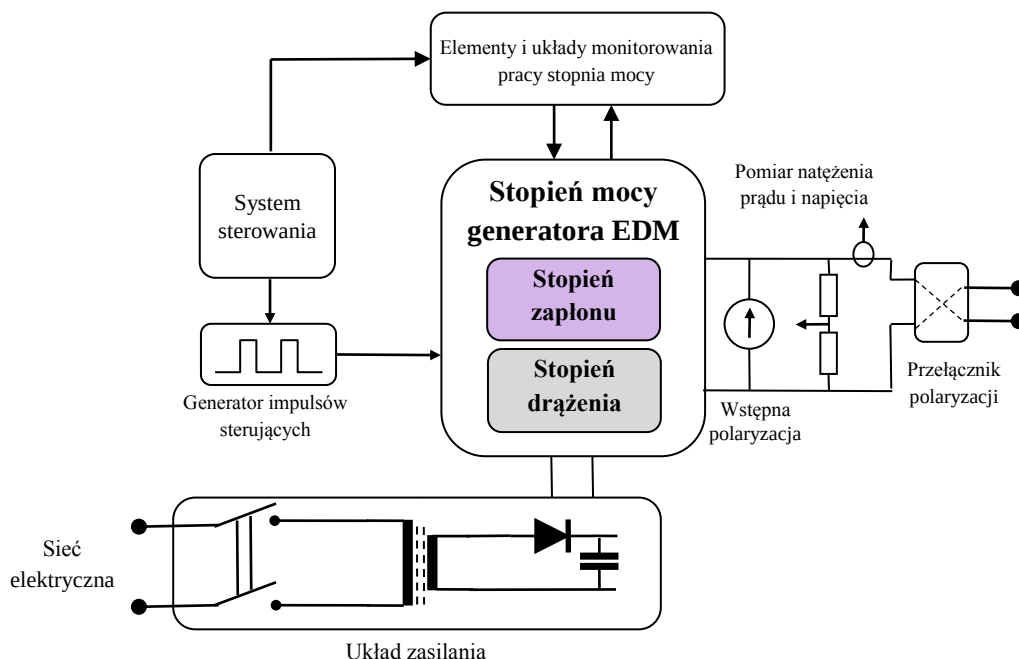
Na wydajność procesu jak również niezawodność obróbki ma wpływ stan szczeliny międzyelektrodowej związany z lokalnymi zwarciami, spowodowanymi między innymi obecnością produktów erozji w szczelinie międzyelektrodowej oraz powstającymi wyładowaniami łukowymi między przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą. Ich efektem może być uszkodzenie powierzchni elektrody roboczej lub materiału obrabianego.

Cechy konstrukcyjne generatora determinują czy może on pracować jako generator izoczęstotliwościowy lub izoenergetyczny. Jako generatory izoczęstotliwościowe lub izoenergetyczne najlepiej sprawdzają się generatory tranzystorowe albo generatory, które działają jako źródła prądowe. W opisywanym przypadku od układu sterowania zależy w jakim trybie będzie pracował. Generatory RC lub RLC albo zbudowane na bazie zasilaczy impulsowych mają ograniczone możliwości ustawiania czasu impulsu i czasu przerwy.

1.10. Rozwój generatorów EDM

Generatory EDM stosowane są od wielu lat. Wraz z rozwojem rynku obrabiarek elektroerozyjnych oraz szerszym ich zastosowaniem w przemyśle czynione są postępy w rozwoju rozwiązań układowych generatorów zasilających.

Typowy zespół generatora stosowanego w obrabiarkach elektroerozyjnych jest skomplikowanym układem składającym się z wielu podzespołów i elementów. Główną część generatora stanowi układ mocy. Schemat blokowy generatora zasilającego obwód mocy (roboczy) obrabiarki elektroerozyjnej przedstawiono na rys. 1.22.



Rys. 1.22. Główne elementy składowe generatora zasilającego obrabiarki EDM

Generator zasilający obrabiarkę składa się z następujących bloków funkcjonalnych, są to:

- obwód doprowadzający zasilanie z sieci energetycznej,
- obwód transformatora sieciowego, który zapewnia izolację galwaniczną od napięcia sieciowego i obniżający to napięcie,
- zespół prostownikowy,
- właściwy obwód stopnia mocy,
- zasilacz niskonapięciowy małej mocy do obwodów sterujących i kontrolujących pracę generatora,
- układ sterowania i kontroli,
- elementy i układy do monitorowania i sygnalizacji stanu pracy generatora i wybranych układów oraz elementów,
- układ do zmiany polaryzacji (biegunowości) napięcia wyjściowego,
- układ do polaryzacji wstępnej szczeliny,
- układy i elementy do rozładowania energii w indukcyjnościach i pojemnościach w obwodzie mocy,
- układy i elementy do rejestracji i archiwizacji głównych parametrów generatora w czasie pracy maszyny.

Proste generatory zasilające do obrabiarek posiadają tylko niektóre z wymienionych bloków funkcyjnych, niezbędne do realizacji konkretnych zastosowań. Niezależnie od

producenta obrabiarki najważniejszy jest stopień mocy generatora, sposób jego sterowania i kontroli. W tym celu dobierane lub opracowywane są odpowiednie rozwiązania układowe. Obrabiarki elektroerozyjne najbardziej zaawansowanych producentów posiadają większość z wymienionych powyżej bloków.

Odnosząc się w głównej mierze do czynników związanych z zastosowaniem generatorów za najkorzystniejsze i najbardziej efektywne rozwiązanie należałoby uznać generatory umożliwiające dowolne kształtowanie przebiegu impulsu prądu lub energii dostarczanej do szczeliny międzyelektrodowej, w trakcie pojedynczego wyładowania elektrycznego.

W generatorach bazujących o przekształtniki impulsowe istnieje możliwość kształtowania impulsów o długości powyżej kilkunastu mikrosekund, w tym rozwiązaniu występuje także możliwość regulacji wartości średniej natężenia prądu elektrycznego w impulsie.

Kształtowanie charakterystyk prądowych możliwe jest w wyniku łączenia równoległego dwóch lub trzech generatorów zasilających jeden układ elektrod.

W przypadku dotyczącym projektowania generatorów do wycinarek drutowych, w celu zminimalizowania występowania warstwy białej, pożądane jest uzyskiwanie bardzo krótkich impulsów prądowych o dużej wartości szczytowej. Opisywane rozwiązanie może być zrealizowane poprzez zastosowanie szybkich łączników tranzystorowych i zminimalizowaniu indukcyjności połączeń pomiędzy generatorem, a układem elektrod tworzących szczelinę międzyelektrodową.

W przypadku dotyczącym rozwoju generatorów przeznaczonych do drążarek wgłębnych badania ukierunkowane są na uzyskiwanie długich czasów impulsów oraz dużych wartości natężenia prądu.

Współczesne badania ukierunkowane są na rozwój technologii generatorów stosowanych w procesach mikroobróbki EDM, gdzie wymagane są impulsy o bardzo krótkim czasie rzędu dziesiątek nanosekund o kontrolowanej energii i o wysokiej częstotliwości powtarzania. Osiągnięcie bardzo krótkich impulsów prądu jest możliwe w generatorach relaksacyjnych, w których zminimalizowano połączenie kablowe pomiędzy wyjściem generatora a elektrodami.

Prace dotyczące miniaturyzacji układów zasilania i ich większej efektywności energetycznej przyczyniły się do wprowadzenia na rynek nowych generatorów zbudowanych na bazie przekształtników impulsowych oraz przekształtników impulsowych rezonansowych. Konwencjonalne generatory RC lub RLC są nadal stosowane między innymi jako dodatkowy moduł zasilający w obrabiarkach produkowanych przez firmę ZAP BP.

Jednym z kierunków prac badawczych są dążenia do zmniejszenia skutków oddziaływań procesu EDM na środowisko pracy, czynniki te wpłynęły na rozwój generatorów dedykowanych w systemach obróbczych prowadzonych na sucho lub prawie na sucho. Opisywane rozwiązania są obecnie przedmiotem zainteresowań badawczych [38].

1.11. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) zespołów elektrycznych i elektronicznych obrabiarek

Podczas pracy obrabiarki elektroiskrowe narażone są na zewnętrzne zakłócenia (np. obce pola magnetyczne), jak również same generują zakłócenia elektromagnetyczne powodowane wyładowaniami elektrycznymi w szczelinie międzyelektrodowej. Obrabiarki posiadają rozbudowane i skomplikowane układy elektroniczne, którym należy zapewnić poprawne działanie w otaczającym środowisku. Wymaga to zminimalizowania do niezbędnego poziomu zakłóceń generowanych przez te urządzenia, jak również wysokiej odporności na zakłócenia pochodzące z otoczenia [100, 103]. Zagadnienia te związane są z kompatybilnością elektromagnetyczną (EMC), która określa zdolność urządzenia elektrycznego, elektronicznego lub systemu do działania w środowisku elektromagnetycznym w sposób określony warunkami technicznymi bez jednoczesnego generowania zaburzeń elektromagnetycznych, które byłyby niedopuszczalne dla innych urządzeń pracujących w tym środowisku [43, 100, 101].

Od 1 stycznia 1996 roku wszystkie urządzenia elektryczne lub elektroniczne, a także każdy wyrób zawierający elementy elektryczne lub elektroniczne, nie mogą być wprowadzane do sprzedaży lub eksploatacji w krajach Unii Europejskiej bez certyfikatu CE. Uzyskanie znaku CE uzależnione jest od spełnienia wymagań Dyrektywy 89/366 dotyczącej kompatybilności elektromagnetycznej [42, 44].

Zakłócenia pracy urządzeń są wynikiem istnienia sygnałów pasożytniczych, które najczęściej powstają w skutek niedoskonałości materiałów konstrukcyjnych lub niewłaściwego działania urządzenia bądź wystąpienia zjawisk zbędnych do funkcjonowania danego urządzenia, lecz jednocześnie nieuniknionych. Ważną grupą źródeł zakłóceń są zjawiska naturalne, z których najistotniejsze z punktu kompatybilności elektromagnetycznej są wyładowania atmosferyczne oraz wyładowania elektrostatyczne [43].

Zasadniczo każde zmienne w czasie pole elektromagnetyczne, oprócz swojego zamierzonego zastosowania użytkowego, może wykazywać oddziaływanie utrudniające prawidłowe funkcjonowanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Układ wytwarzający zakłóce-

niowe pole elektromagnetyczne stanowi źródło zakłóceń. Głównymi źródłami zakłóceń w pracy obrabiarek są:

- silniki elektryczne,
- przekształtniki energoelektroniczne,
- prądy zwarciove i prądy rozruchowe.

Silniki elektryczne wskutek ciągłych przebiegów łączyeniowych w czasie obrotu wirnika powodują emisję sygnałów zakłócających o szerokim widmie częstotliwości.

W przekształtnikach energoelektronicznych mających za zadanie zamianę napięcia zmiennego na stałe lub stałego na zmiennie o innej wartości lub innej częstotliwości powstają zakłócenia napięciowe, których widmo liniowe oprócz częstotliwości podstawowej sieci zawiera częstotliwości harmoniczne.

Jeżeli w sieci zasilającej występuje zwarcie to wywołane nim wartości prądu mogą być wielokrotnością prądu znamionowego. W chwili pojawienia się prądu zwarcia o dużej wartości występuje znaczny spadek napięcia na indukcyjności przewodów, a napięcie sieciowe spada do małej wartości.

Wysokie wartości prądów występują także podczas włączania urządzeń, takich jak: silniki elektryczne, transformatory, kondensatory o dużej pojemności. Zakłócenia powstające podczas włączania urządzeń o dużej mocy są krótkotrwałe, natomiast podczas pracy ustalonej są zakłóceniami ciągłymi. Zakłócenia krótkotrwałe z powodu sporadycznego występowania w systemach są trudniejsze do wykrycia.

Sygnały zakłócające mogą spowodować wadliwe działanie urządzenia lub jego zniszczenie jeżeli między źródłem zakłóceń a urządzeniem istnieje sprzężenie elektromagnetyczne. Sprzężenie może następować przez przewodzenie za pomocą indukcyjności lub pojemności albo poprzez pole elektromagnetyczne.

Sygnał zakłóceńowy dochodzący do urządzenia wrażliwego wskutek różnorodnego charakteru sprzężeń nakłada się na sygnał użyteczny. W schemacie zastępczym pracy urządzenia wrażliwego możemy to uwzględnić w postaci źródła napięciowego lub prądowego, umieszczonego w obwodzie wyjściowym. Zdefiniowanie parametrów tych źródeł umożliwia zaprojektowanie skutecznych metod ich likwidacji. Skuteczność minimalizacji skutków zakłócenia jest tym mniejsza, im częstotliwość sygnałów zakłóceńowych jest zbliżona do częstotliwości sygnałów użytecznych. Jeżeli częstotliwość zakłóceńowa leży powyżej zakresu częstotliwości roboczych urządzenia, to można się jej pozbyć za pomocą czułych filtrów obwodów wyjściowych. W związku z tym, dla częstotliwości wyższych od roboczych, urządzenia są mniej wrażliwe. Jednakże przy wyższych częstotliwościach zmniejsza się tłumienność

ekranowania obudowy, a zwiększa impedancja transferu kabla, co powoduje zwiększenie się wpływu sygnałów zakłócających na urządzenia zakłócanie.

Wpływ sygnałów zakłócających na analogowe układy odbywa się poprzez przesunięcie punktów pracy tranzystorów. Przesunięcie punktu pracy tranzystora może spowodować między innymi:

- pozorny, nagły spadek wzmocnienia,
- wzmocnienie osiągające szybko wartości graniczne,
- nieoczekiwane duże wahania napięcia przy jego regulacji.

Efekty przesunięcia punktu pracy tranzystora mogą zostać pogłębione przy oddziaływaniu sygnałów zakłócających wysokiej częstotliwości, modulowanych sygnałem małej częstotliwości.

Ciągłe sygnały zakłócające wysokiej częstotliwości wpływają przede wszystkim na analogowe układy, natomiast pojedyncze tzn. impulsowe zakłócenia mogą utrudniać pracę obwodów cyfrowych. Jeżeli w obwodach cyfrowych lub mikroprocesorowych zostanie wzbudzone zakłócenie impulsowe, to obwody te mogą pracować nieprawidłowo także po wygaśnięciu zakłócenia. Tego typu zakłócenia mogą spowodować w mikroprocesorach opuszczenie programu inicjującego i przejście do nieskończonej, zamkniętej pętli działania. Powrót do programu może nastąpić poprzez otrzymanie sygnału RESET lub poprzez wyłączenie i ponowne włączenie.

Zakłócenia pracy urządzeń wrażliwych można rozdzielić na odwracalne i niszczące. Z zakłóceniem odwracalnym mamy do czynienia wówczas, gdy układ elektroniczny samodzielnie przestawia się na prawidłową pracę po zaniku zakłócenia. Dotyczy to przede wszystkim układów analogowych np. przetworników, wzmacniaczy. Z zakłóceniami niszczącymi mamy do czynienia wówczas, gdy nastąpi nieodwracalne zniszczenie elementów elektronicznych pod wpływem wysokoenergetycznych impulsów napięcia udarowego.

Zakres badań EMC

Obrabiarki elektroiskrowe poddaje się badaniom odporności na zakłócenia elektromagnetyczne EMC. Podstawowym dokumentem podczas badań kompatybilności elektromagnetycznej są normy międzynarodowe opracowane przez IEC (Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna) i CISPR (Międzynarodowy Komitet Specjalny ds. Zakłóceń Radioelektronicznych) z siedzibą w Genewie [44].

Zakres badań obejmuje:

- pomiar emisji zakłóceń,
- badanie odporności na zakłócenia,
- oddziaływanie wyładowań elektrostatycznych ESD,
- zakłócenia od stanów łączeniowych,
- zakłócenia częstotliwości radiowych,
- zakłócenia sieciowe niskiej częstotliwości,
- oddziaływanie obcych pól magnetycznych.

Pomiary emisji zakłóceń służą ustaleniu zdolności urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do emisji zakłóceń w znormalizowanych warunkach, w celu porównania uzyskanych wyników z dopuszczalnymi wartościami maksymalnymi tzw. wartościami granicznymi. W czasie badania zdolności obiektu do emitowania zakłóceń urządzenie musi być tak eksploatowane, aby osiągnęło najwyższy oczekiwany w trakcie normalnej eksploatacji poziom emisji zakłóceń.

W środowisku elektromagnetycznym, w którym pracują urządzenia elektryczne i elektroniczne można wyróżnić dwie grupy sygnałów zakłócających:

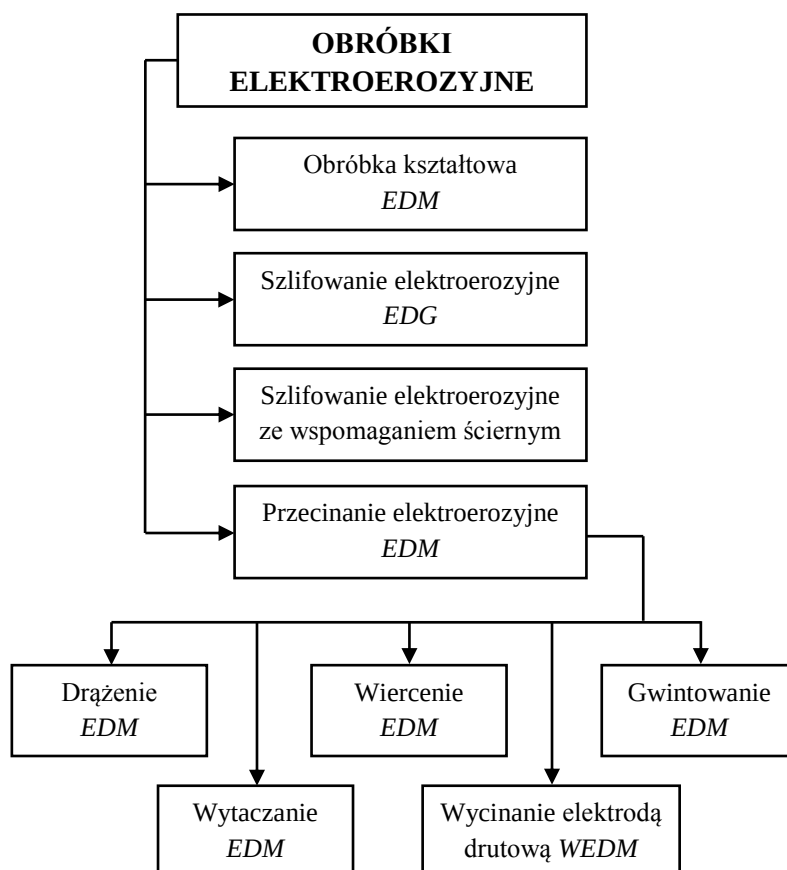
- długotrwałe sygnały sinusoidalne wywołane na przykład przez nadajniki radiowe, urządzenia teletransmisji radiowej lub urządzenia do przesyłania energii; długotrwałe sygnały impulsowe wytwarzane na przykład przez układy prostownicze, zasilacze, urządzenia radarowe, jak również sygnały impulsowe spowodowane zjawiskiem ulotu w liniach wysokiego napięcia,
- pojedyncze sygnały impulsowe pochodzące na przykład od wyładowań atmosferycznych, wyładowań elektrostatycznych, przebiegów łączeniowych lub zapadów napięcia.

Do badania zakłóceń sieciowych niskiej częstotliwości stosuje się dwa rodzaje symulatorów zakłóceń sieciowych:

- transformator regulacyjny z wyłącznikiem elektronicznym – zaletą tego rozwiązania jest niższa cena oraz możliwość używania przy dużych prądach (dochodzących do 500A) wymaganych podczas ponownego załączenia zasilania badanego urządzenia po uprzednim zaniku napięcia,
- układ ze wzmacniaczem mocy – występuje dobre odsprężenie od sieci, jak również zwrotne oddziaływanie na sieć nie przekracza dopuszczalnych granic.

2. CHARAKTERYSTYKA METOD STOPOWANIA ELEKTROISKROWEGO

Opisywane w literaturze obróbki elektroerozyjne dotyczą wielu odmian obróbek wykorzystujących wyładowania elektryczne do usuwania mikroobjętości, a w konsekwencji kolejnych warstw materiału z przedmiotu obrabianego. Ogólny podział metod obróbek elektroerozyjnych przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat podziału metod obróbki elektroerozyjnej

2.1. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod pręcikowych (SWA)

Wykorzystanie w procesie stopowania elektrod pręcikowych jest powszechnie stosowane w przypadkach, w których wykorzystywane są układy wprowadzające ruch drgający elektrody stopującej. Elektroda robocza wprawiana w ruch drgający (wibracje) powoduje po-

wstawanie warunków do chwilowego przebicia szczeliny międzyelektrodowej, w wyniku czego generowane są wyładowania elektryczne.

Proces stopowania zazwyczaj prowadzony jest z zastosowaniem napięć o wartościach w przedziale $U = 15 - 200 \text{ V}$, przy czym częstotliwość drgań anody zawiera się w granicach $50 - 300 \text{ Hz}$, a amplituda wibracji nie przekracza $0,2 - 0,5 \text{ mm}$. Przebicie szczeliny międzyelektrodowej przy wykorzystywanej wartości napięcia ma miejsce dla odległości międzyelektrodowej mieszczącej się w przedziale $0,01 - 10 \text{ }\mu\text{m}$ lub w wyniku zrywania kontaktu elektrod przy małych wartościach napięcia zasilającego U . Częstotliwość wibracji elektrody stopującej (anody) można ustawić w przedziale od kilkunastu do dziesiątków Hz . Dla przykładu przy wartości napięcia zasilającego $U \geq 100 \text{ V}$, gdy grubość szczeliny międzyelektrodowej jest $l > 1 \text{ }\mu\text{m}$, w zależności od czasu impulsów wyładowanie może przebiegać całkowicie w gazowym środowisku międzyelektrodowym lub rozpoczynać się w środowisku gazowym, a kończyć w warunkach kontaktu elektrod. W przypadku napięcia zasilającego układ elektrod $U < 100 \text{ V}$ wyładowanie możliwe jest w przypadku bezpośredniego kontaktu elektrod. Metoda SWA (Single Wire Alloying – stopowanie elektrodą pręcikową) stosowana jest m.in. do modyfikowania powierzchni np. w celu uzyskania pożądanych cech eksploatacyjnych.

W opisywanym procesie utwardzania często wykorzystuje się manualny sposób prowadzenia elektrody roboczej z wykorzystaniem prostego oprzyrządowania technologicznego w postaci wibratora z układem elektromagnetycznym i wymiennymi elektrodami wykonanymi z materiału uszlachetniającego powierzchnię.

Elektrodę wibrującą należy zorientować prostopadle do modyfikowanej powierzchni. Siła docisku elektrody roboczej do stopowanej powierzchni powinna mieć stałą wartość. W przypadku modyfikacji (utwardzania) narzędzi skrawających, zaleca się przemieszczanie elektrody stopującej ruchem postępowo-zwrotnym przebiegającym równolegle do krawędzi tnącej narzędzia z prędkością, która umożliwiałaby maksymalną zwartość nanoszonej powłoki (tj. $0,5 - 1 \text{ cm/s}$).

W bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi tnącej modyfikowanej powierzchni wymagane jest zachowanie ostrożności, aby uniknąć naruszenia jej geometrii. Korzystnie jest gdy powierzchnia modyfikowana posiada chropowatość (Ra) nie większą niż $1,6 \text{ }\mu\text{m}$.

W przypadku stosowania, w procesie stopowania powierzchni, urządzeń zasilających o niewielkiej mocy konieczne są krótkotrwałe przerwy w pracy urządzenia ($10 - 15 \text{ s}$) na każde $2 - 3 \text{ min}$ jego pracy. Do obniżenia temperatury zespołu elektrody roboczej można wykorzystywać chłodzenie wodne lub sprężone powietrze.

Zastosowanie lokalnych oddziaływań elektrody stopującej w procesie utwardzania elektroimpulsowego zmniejsza ryzyko uszkodzenia obrabianych części maszyn, narzędzi tnących lub oprzyrządowania technologicznego. Warunki prowadzenia procesu stopowania z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych, związane są z występowaniem korzystnego rozkładu pola temperatur sprzyjającego procesom dyfuzji pomiędzy nakładaną warstwą a modyfikowanym podłożem. W tych warunkach powstaje modyfikowana warstwa silnie związana z podłożem, charakteryzująca się podwyższonymi cechami eksploatacyjnymi w odniesieniu do materiału podłoża.

Zastosowanie urządzenia EDA W-8 umożliwia uzyskanie powłok o grubości do 0,06 mm, w tych granicach lub poprzez nakładanie kolejnych warstw możliwa jest regeneracja wyeksploatowanych powierzchni narzędzi skrawających. Istotnym elementem skuteczności opisywanej metody – elektroimpulsowego utwardzania, są kwalifikacje operatora.

Do typowych wad powłok nakładanych w sposób manualny należą:

- niska zwartość i nierównomierność pokrycia,
- obecność przypaleń i barw nalotowych,
- niska adhezja powłok i występujące delaminacje.

2.2. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych (BEDMA)

Podstawową trudnością przy mechanizacji operacji obróbki wykończeniowej, w tym modyfikacji warstwy wierzchniej poprzez wprowadzanie do warstwy wierzchniej pierwiastków stopowych w przypadku elementów maszyn o złożonych kształtach i niskiej lub średniej dokładności, takich jak odlewy, konstrukcje spawane lub kształtowane plastycznie elementy pomp, podajników, maszyn energetycznych, budowlanych itp., jest: brak baz technologicznych, niepowtarzalność kształtu, występowanie nadlewów, wypływek, spoin itp. oraz zła obrabialność większości materiałów, z których wykonywana jest część tych elementów.

Wymagania stawiane powierzchniom tego typu elementów zawierają się w bardzo szerokich granicach, np. wymagana wysokość profilu chropowatości powinna mieścić się w przedziale $Ra = 0,5 - 5 \mu m$, dokładność wykonania od dziesiątych części milimetra do pojedynczych milimetrów. W wielu przypadkach konieczne jest usunięcie w procesie obróbki naskórka odlewniczego, wypływek, wad powierzchni typu guzy odlewnicze, wżery, strupy, a dopiero w kolejnych etapach obróbki wykończeniowej mogą nastąpić operacje poprawiają-

ce cechy eksploatacyjne warstwy wierzchniej np. poprzez modyfikacje jej składu chemicznego. Opisywana kategoria części maszyn to zwykle elementy o złożonej geometrii, których znaczna część powierzchni jest krzywoliniowa.

Poszukując metody obróbki tej klasy elementów zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania w procesie stopowania cech elektrod roboczych w postaci szczotek metalowych związanych z elastycznością poszczególnych drutów, które dostosowują swój kształt do kształtu obrabianej powierzchni.

Zastosowanie w obróbce erozyjno-mechanicznej elastycznych elektrod szczotkowych wykonanych z materiałów uszlachetniających umożliwia, w zależności od parametrów procesu (napięcia zasilania, ugięcia elementów elektrody szczotkowej), zastosowanie tego samego narzędzia do obróbki wstępnej związanej z intensywnym wprowadzaniem składników stopowych do warstwy wierzchniej modyfikowanych elementów oraz wykończeniowej, prowadzonej przy niskich wartościach napięcia roboczego (obróbka elektrostrykowa) lub w przypadku braku napięcia poprzez oddziaływanie mechaniczne elementów szczotki. W każdym z opisywanych przypadków występują odmienne mechanizmy oddziaływania pomiędzy przedmiotem obrabianym i elektrodą roboczą.

Publikowane prace dotyczące elektrod szczotkowych obejmują analizę oddziaływań mechanicznych z powierzchnią obrabianą [58, 90], wpływ nacisków oraz kinematyki elektrod na efekty obróbki [54, 56, 61].

2.2.1. Podstawy stopowania erozyjno-mechanicznego z zastosowaniem elektrod szczotkowych

W procesie stopowania metodą BEDMA [53, 56, 58, 68] wykorzystywane są elektrody robocze o charakterystycznym kształcie szczotki w postaci dysku, wykonanej ze sprężystych drutów z materiału modyfikującego warstwę wierzchnią (stopującego). W trakcie stopowania elektroda szczotkowa wykonuje ruch obrotowy z dużą prędkością. Podczas wirowania elementy sprężyste (druty) elektrody szczotkowej stykają się z powierzchnią elementu obrabianego. W chwili zerwania kontaktu poszczególnych drutów elektrody z powierzchnią stopowaną następują kolejne po sobie rozwarcia obwodu elektrycznego i wskutek występującej w nim indukcyjności inicjowane są wyładowania elektryczne. W wyniku wydzielanego ciepła następuje topnienie anody i przenoszenie jej materiału na powierzchnię obrabianą (katodę).

Stopowanie może odbywać się w różnych środowiskach: gazowym (gazy szlachetne np. argon, dwutlenek węgla, powietrze) lub ciekłym (naftcie, wodzie dejonizowanej).

W trakcie procesu stopowania zachodzi jednocześnie oddziaływanie mechaniczne elektrody szczotkowej z powierzchnią katody. Poszczególne druty elektrody ślizgają się po powierzchni przedmiotu obrabianego (w miejscu gdzie nastąpiło wyładowanie), powodując deformację (wygładzenie) krateru. Ten rodzaj oddziaływania określa się jako obróbkę elektromechaniczną. Zachodzi ona w warunkach występowania nacisku poszczególnych elementów elektrody szczotkowej, przy małych wartościach napięcia zasilającego układ obróbczy.

Jako najprostsze układy zasilające do stopowania elektrodami szczotkowymi stosowane są źródła prądu stałego o dużej wydajności prądowej i napięciu poniżej wartości 30 V.

Niniejsza praca, w części, stanowi rozwinięcie opracowanego w Zakładzie Obróbek Erozyjnych i Wykańczających pod kierunkiem prof. B. Nowickiego we współautorstwie z prof. S. Spadło sposobu wytwarzania warstw wierzchnich z zastosowaniem wyładowań elektrycznych, rozwiązania chronionego patentem PL 183045 [53] oraz opracowanego przez prof. S. Spadło sposobu obróbki gładkościowej powierzchni, zwłaszcza o złożonych kształtach (patent PL 172559) z zastosowaniem obróbki erozyjno-mechanicznej [89].

2.2.2. Charakterystyka obszarów zastosowania metody stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych

Metoda BEDMA ze względu na cechy elektrody roboczej znajduje zastosowanie zarówno w przypadku obróbki elementów o prostej geometrii, jak również przedmiotów o skomplikowanych kształtach. Możliwość mechanizacji i automatyzacji procesu stopowania rozszerza zakres obróbki metodą BEDMA. Cechą charakterystyczną opisywanej metody, z uwagi na elastyczność stosowanego narzędzia, jest brak konieczności występowania ścisłych związków kinematycznych w układzie obróbczym w procesie stopowania.

2.2.3. Efekty stopowania elektrodą szczotkową

Efekt stopowania w procesie BEDMA jest zależny nie tylko od energii i czasu wyładowań, ale również związany jest z występowaniem wielokrotnych wyładowań w tych samych lub zbliżonych lokalizacjach, dużej zmienności częstotliwości i energii wyładowań

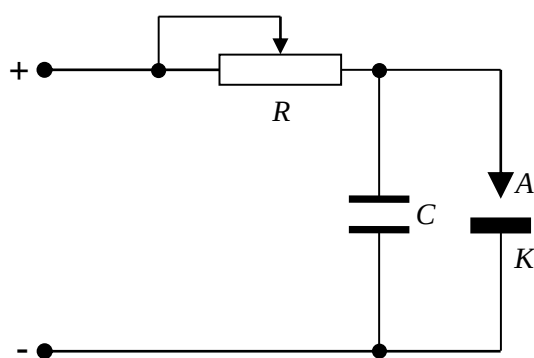
oraz mechanicznych oddziaływań elektrody szczotkowej na stopowaną powierzchnię [57, 58, 54]. Wspomniane cechy umożliwiają tworzenie warstw silnie związanych z podłożem o grubości do kilkuset μm .

2.3. Charakterystyka stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych (EDA)

Stopowanie elektroiskrowe jest jedną z elektrofizycznych metod obróbki materiałów polegających na wykorzystywaniu skoncentrowanych strumieni energii. Metoda obróbki elektroerozyjnej została opracowana przez B. R. Lazarenko i N. N. Lazarenko [36]. Główne różnice pomiędzy stopowaniem elektroiskrowym w odniesieniu do obróbki elektroerozyjnej polegają na tym, że:

- w obróbce elektroerozyjnej, która prowadzona jest w ciekłym dielektryku następuje, w wyniku procesów fizycznych towarzyszących wyładowaniom elektrycznym, oddzielanie mikroobjętości materiału elektrody (przedmiotu obrabianego),
- w przypadku EDA, proces zwykle przeprowadza się w środowisku gazowym, w wyniku wyładowań elektrycznych następuje przenoszenie i osadzanie wyerodowanego materiału elektrody roboczej (anody) na powierzchnię przedmiotu obrabianego (katody) i wzbogacenie jej pierwiastkami wchodzącymi w skład materiału anody.

Schemat elektryczny układu wykorzystywanego do realizacji procesu EDA pokazany jest na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Schemat elektryczny układu z generatorem RC do stopowania EDA. A – anoda (elektroda robocza), K – katoda (przedmiot obrabiany), C – kondensator, R – rezystor nastawny

Zaprezentowany na rysunku (rys. 2.2) schemat przedstawia generator RC, w którym przedmiot obrabiany włączony jest w obwód elektryczny jako katoda. Podstawowy układ elektryczny generatora relaksacyjnego przeznaczonego do kształtowania impulsowych wyła-

dowań składa się z następujących elementów: A – anoda (elektroda robocza), K – katoda (przedmiot obrabiany), C – kondensator, R – rezystor nastawny (potencjometr). Zasada pracy generatora polega na tym, że kondensator C ładuje się ze źródła prądu stałego przez układ rezystorów. Proces EDA rozpoczyna się od zbliżenia elektrody roboczej do przedmiotu obrabianego. Po osiągnięciu grubości szczeliny międzyelektrodowej równej lub mniejszej od wartości odpowiadającej warunkom przebicia powstaje impulsowe wyładowanie, które kończy się w chwili kontaktu elektrod. Po przebiciu szczeliny międzyelektrodowej, w wyniku rozładowania zgromadzonej w kondensatorze energii, na powierzchni elektrod powstają lokalne ogniska topnienia i parowania materiału elektrod. Zjawiska polarne w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni elektrod powodują, że następuje przenoszenie wyerodowanego materiału anody na powierzchnię katody powodując tworzenie (kształtowanie) na powierzchni przedmiotu powłoki posiadającej pożądane właściwości fizyko-chemiczne. Mechanizm stopowania związany jest z występowaniem w przestrzeni międzyelektrodowej fazy ciekłej materiału elektrody stopującej powstałej w wyniku oddziaływania energii cieplnej, będącej efektem wyładowania elektrycznego pomiędzy elektrodami.

Cząstki materiału anody, które uległy stopieniu po osiągnięciu powierzchni katody zgrzewają się z jej powierzchnią, a część materiału dyfunduje w głąb elementu obrabianego. Należy zauważyć, że w opisywanej metodzie stopowania w wyniku vibracji elektrody roboczej, najczęściej anody, następuje mechaniczne uderzanie anody o powierzchnię katody. Przyczynia się to dodatkowo do przebicia ewentualnych warstw powierzchniowych (np. tlenkowych) pokrywających powierzchnię modyfikowaną, ułatwiając w ten sposób proces inicjacji wyładowań elektrycznych oraz wymianę masy pomiędzy elektrodami. Po rozładowaniu kondensatora układu zasilającego i zakończeniu wyładowania rozpoczyna się oddalanie anody od katody, kończące się rozerwaniem kontaktu elektrycznego i zakończeniem cyklu, po czym cykl rozpoczyna się od początku.

Oprócz stopowania z wykorzystaniem elektrody wibrującej, w procesie stopowania, mogą być stosowane elektrody monolityczne. W tym przypadku anoda wykonywana jest z materiałów zawierających pierwiastki stopowe. W przypadku przedmiotów o relatywnie małych rozmiarach elektroda robocza może być tak ukształtowana, aby odzwierciedlała kształt katody (była ekwidystantą), której powierzchnia będzie modyfikowana.

2.3.1. Podstawy metody stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych

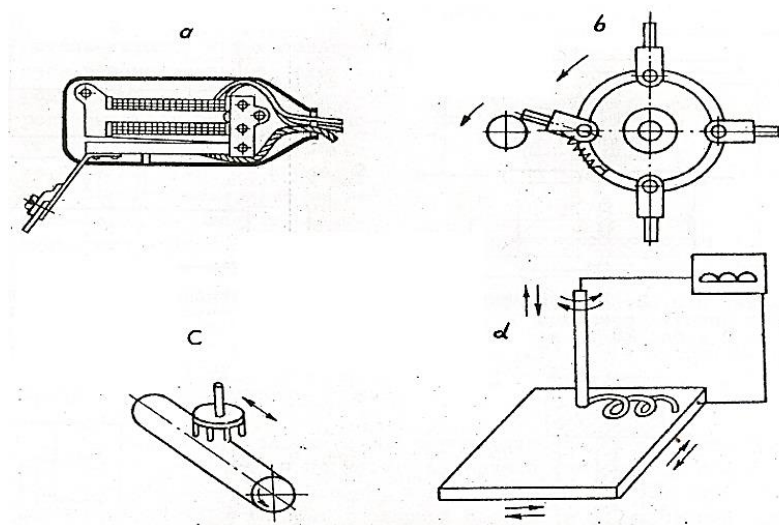
Proces stopowania metodą EDA może być przeprowadzany zarówno na urządzeniach uniwersalnych jak i specjalistycznych. Typowy układ elektryczny urządzenia składa się z: generatora impulsów napięciowych, bloków sterujących napędami elektrod i ruchem przedmiotu obrabianego, elementów wykonawczych odpowiedzialnych za przemieszczanie elektrod i automatycznego regulowania szczeliny międzyelektrodowej. Do konstrukcji mechanicznej urządzenia zamontowana jest elektroda robocza, mechanizmy posuwu elektrody roboczej oraz ruchu przedmiotu obrabianego. Zespół elektrody składa się z układu napędowego oraz doprowadzenia prądu.

Pierwsze urządzenia dla EDA były opracowane i wykonane przez prekursorów prowadzących badania stopowania B.R. i N.J. Lazarenko [36]. Urządzenia te zasilane były generatorem RC, a łączenie i rozwieranie przepięciowego łuku elektrycznego odbywało się metodą manualną wibrującą elektrodą.

Rozwijane w ostatnich latach techniki obróbki EDM i stopowania metodą elektroiskrową przyniosły nowe rozwiązania w zakresie stosowanych urządzeń. Ich rozwój przebiegał zarówno w kierunku dotyczącym kształtu i łączenia elektrod oraz źródeł energii potrzebnej do wygenerowania wyładowań iskrowych – generatorów mocy. Obecnie najbardziej rozpowszechnione urządzenia do modyfikowania powierzchni wyposażone są w generatory impulsowe prądu. Do tej grupy zaliczamy generatory typu RC, tranzystorowe oraz programalne.

Istotą procesu stopowania jest przenoszenie materiału elektrody roboczej na powierzchnie przedmiotu obrabianego. W procesie stopowania w trakcie pojedynczego wyładowania ilość materiału anody przenoszzonego na powierzchnię katody jest bardzo niewielka. Związane to jest z faktem, że typowa wartość energii wyzwanej w szczelinie roboczej podczas pojedynczego wyładowania zawiera się w granicach $(2-3)10^{-6}$ J [36]. W związku z tym, w celu wytworzenia na powierzchni przedmiotu obrabianego warstwy o pożądanej grubości, niezbędne jest wielokrotne nakładanie warstw uszlachetniających, co w układach technicznych realizowane jest w połączeniu z zaplanowaną kinematyką układu elektrodowego w odniesieniu do powierzchni przedmiotu obrabianego. Okresowe łączenie anody z katodą realizowane jest przy pomocy układów wibracyjnych o różnych konstrukcjach. Przytoczone założenia mogą być realizowane między innymi poprzez zastosowanie wykonujących ruch obro-

towy dysków z zamocowanymi na ich obwodzie elektrodami w postaci płytek lub drucików albo czołowo zamocowanych do dysku prętów elektrod, które kontaktują się w sposób periodyczny z powierzchnią katody wskutek wibracji lub docisku pionowego automatycznego regulatora odległości między elektrodami. Stosuje się także bardziej złożone ruchy elektrody roboczej względem przedmiotu obrabianego np. poprzez połączenie ruchu postępowego z wibracją elementów czynnych elektrody roboczej. Zapewnienie odpowiednich warunków generowania wyładowań elektrycznych, w połączeniu z odpowiednią kinematyką elektrod, umożliwia prowadzenie procesu EDA w sposób stabilny i umożliwiający poprawę właściwości modyfikowanej warstwy. Przykładowe rozwiązania techniczne głowic roboczych urządzeń służących do stopowania wraz z zasadą ich funkcjonowania pokazano na rys. 2.3. Na rysunku a) przedstawiono głowicę wibracyjną stosowaną do modyfikowania niewielkich powierzchni, rysunek b) przedstawia wieloelektrodową głowicę z rozłożonymi obwodowo płytkami elementów stopujących, stosowaną do modyfikowania powierzchni o zarysach obrotowych, rysunek c) przedstawia głowicę elektrodową z elementami prętowymi mocowanymi doczołowo, przykład rozwiązania na rysunku d) przedstawia elektrodę pręcikową uniwersalną wykonującą ruch złożony.



Rys. 2.3. Różne typy głowic roboczych urządzeń służących do stopowania: a) głowica wibracyjna, b) wieloelektrodowa głowica z rozłożonymi obwodowo płytkami elementów stopujących, c) elektrody prętowe mocowane czołowo, d) elektroda pręcikowa uniwersalna wykonująca ruch złożony

Zarówno kształt elektrody stopującej (anody), jak i jej kinematyka może być bardziej złożona niż przedstawiono to na rys. 2.3. W konkretnych sytuacjach technicznych konieczne jest opracowanie kształtu elektrody roboczej, jak również dobranie parametrów stopowania związanych z zastosowaniem określonego systemu EDA.

W przypadku manualnego sposobu stopowania EDA wykorzystywane są wibratory o częstotliwości wibracji 50 – 400 Hz, a do procesu prowadzonego w sposób zmechanizowany – dyski z elektrodami płytkowymi. W prostych systemach do modyfikacji powierzchni lub regeneracyjnego nakładania powłok, jako źródło zasilania w obwodzie mocy wykorzystywane są generatory typu RC. We współczesnych rozwiązaniach urządzeń do stopowania równolegle z układami z generatorem typu RC stosowane są tranzystorowe impulsowe źródła zasilania o częstotliwości pracy od kilkudziesięciu herców do setek kiloherców.

2.3.2. Charakterystyka obszarów zastosowania metody stopowania z zastosowaniem elektrod monolitycznych

Analiza literatury dotycząca modyfikacji warstwy wierzchniej prowadzonej w warunkach wyładowań elektrycznych, wskazuje na możliwość poprawy jej właściwości w wyniku wprowadzania do niej składników stopowych. Metody modyfikacji warstw powierzchniowych z wykorzystaniem wyładowań elektroiskrowych charakteryzują się, w porównaniu z innymi metodami nanoszenia powłok lub obróbki powierzchni, wieloma istotnymi cechami i wynikającymi z nich możliwościami zastosowań analizowanych w niniejszej pracy sposobów modyfikacji warstwy wierzchniej.

Główne zalety metody EDA:

1. Możliwość wykorzystania, w celu zmiany właściwości warstw powierzchniowych, różnorodnych materiałów (czystych metali, stopów, spieków metali) pozwalających kształtować w szerokich granicach ich właściwości mechaniczne, elektryczne, termiczne, tribologiczne i inne cechy użytkowe powierzchni. Możliwość wykorzystania w procesie formowania warstw powierzchniowych medium międzyelektrodowego, w jeszcze większym zakresie poszerza granice celowych, ukierunkowanych zmian właściwości modyfikowanych warstw;
2. Sposób realizacji procesu nanoszenia powłok metodą EDA nie wymaga skomplikowanych urządzeń technologicznych i jest ekonomiczny, szczególnie odnosi się to do metody manualnej EDA;
3. Naniesiona metodą EDA warstwa ma bardzo dobrą przyczepność do podłoża;
4. Przy zastosowaniu metody EDA nie zachodzi konieczność uprzedniego przygotowania powierzchni;

5. Możliwość lokalnego modyfikowania powierzchni elementów maszyn o dużych gabarytach.

Do głównych wad stopowania powierzchni metodą EDA należą:

1. Niska wydajność procesu;
2. Nieznaczna grubość zmodyfikowanej warstwy (w większości przypadków nie przekraczająca 0,1 – 0,2 mm);
3. Zwiększenie chropowatości powierzchni, szczególnie niekorzystne w przypadku obróbki przedmiotów posiadających powierzchnie współpracujące w parach kinematycznych, gdzie wymagana jest wysoka gładkość powierzchni;
4. Relatywnie niska powtarzalność właściwości otrzymywanych powłok, co szczególnie widoczne jest przy wykorzystywaniu metody manualnej EDA;
5. Występowanie, z uwagi na „gorący” model, formowania wynikowych naprężeń rozciągających w warstwie modyfikowanej metodą EDA, staje się niedopuszczalne dla wielu elementów maszyn i narzędzi pracujących w warunkach cyklicznego obciążenia.

Zastosowanie procesu EDA umożliwia modyfikowanie w szerokim zakresie właściwości warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów.

Metoda EDA umożliwia:

1. Zwiększenie trwałości, żaroodporności oraz odporności korozyjnej;
2. Regenerację narzędzi, mechanizmów i elementów maszyn;
3. Zmianę elektrycznych właściwości stykających się elementów i zdolności emisyjnej powierzchni;
4. Przeprowadzenie na obrabianej powierzchni procesów mikrometalurgicznych w celu wytworzenia na niej pożądanych faz międzymetalicznych lub związków chemicznych;
5. Wykonanie na powierzchni warstw określonej chropowatości (teksturowanie powierzchni) np. w celu zwiększenia intensywności wymiany ciepła;
6. Nanoszenie izotopów promieniotwórczych;
7. Nanoszenie powłok dekoracyjnych.

Jednym z istotnych zadań w technologii maszyn jest wybór optymalnej metody oddziaływania na powierzchnie przedmiotów obrabianych, w wyniku której uzyskiwane są warstwy o pożądanych właściwościach. Modyfikacja właściwości warstw powierzchniowych może być osiągnięta przez zastosowanie różnorodnych procesów technologicznych. W celu zwiększenia twardości, wytrzymałości, odporności na korozję oraz zmiany innych cech powierzchni możliwe jest zastosowanie takich metod jak: EDA, napylenie plazmowe, obróbka

laserowa itd. Tylko szczegółowa analiza warunków pracy obrabianych przedmiotów, w połączeniu z charakterystyką poszczególnych metod modyfikacji warstwy wierzchniej (WW) oraz ocena czynników ekonomicznych i środowiskowych, umożliwia dokonanie optymalnego wyboru sposobu formowania właściwości warstwy wierzchniej w odniesieniu do każdego konkretnego przypadku.

Efektywność zastosowania metody EDA w warunkach przemysłowych zależy głównie od technicznych możliwości regulowania w szerokim zakresie parametrów pracy urządzenia, prawidłowego wyboru materiału anody w powiązaniu ze składem chemicznym materiału modyfikowanego oraz przewidywanymi rezultatami procesu stopowania. W przypadku manualnego sposobu modyfikowania powierzchni rezultat stopowania zależy od kwalifikacji operatora.

3. CEL I ZAKRES PRACY

3.1. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie kompleksowych badań dotyczących wpływu cech elektrod roboczych i parametrów obróbki na właściwości modyfikowanej warstwy wierzchniej. Badania dotyczą wpływu sposobu stopowania, cech elektrod, właściwości ośrodka międzyelektrodowego oraz parametrów elektrycznych źródła zasilania na możliwości stopowania prowadzonego w warunkach wyładowań elektroiskrowych, jak również porównanie efektów stopowania elektrodami kształtowymi (monolitycznymi), pręcikowymi-drgającymi oraz obrotowymi (szczotkowymi).

Biorąc pod uwagę wielowątkowość tej pracy wyznaczono następujące cele:

- określenie możliwości zastosowania stopowania elektroiskrowego powierzchni kształtowych elektrodami monolitycznymi wykonanymi z materiałów stopowych, jako potencjalnego sposobu ulepszania powierzchni np. gniazd matryc kuźniczych,
- określenie zakresów wartości parametrów elektrycznych przy których zachodzi efektywny transport masy,
- ocena wpływu rodzaju elektrod (pręcikowe, monolityczne, szczotkowe) na efektywność obróbki i stan warstwy wierzchniej,
- ocena wpływu ośrodka (ciecz, gaz) na stan warstwy wierzchniej,
- określenie możliwości wykorzystania typowych zasilaczy stosowanych w obrabiarkach EDM do stopowania przez zmianę polaryzacji zasilania elektrod,
- opracowanie podstaw racjonalnego wyboru sposobu stopowania elektroiskrowego i jego parametrów w zależności od celu i wymaganych efektów obróbki.

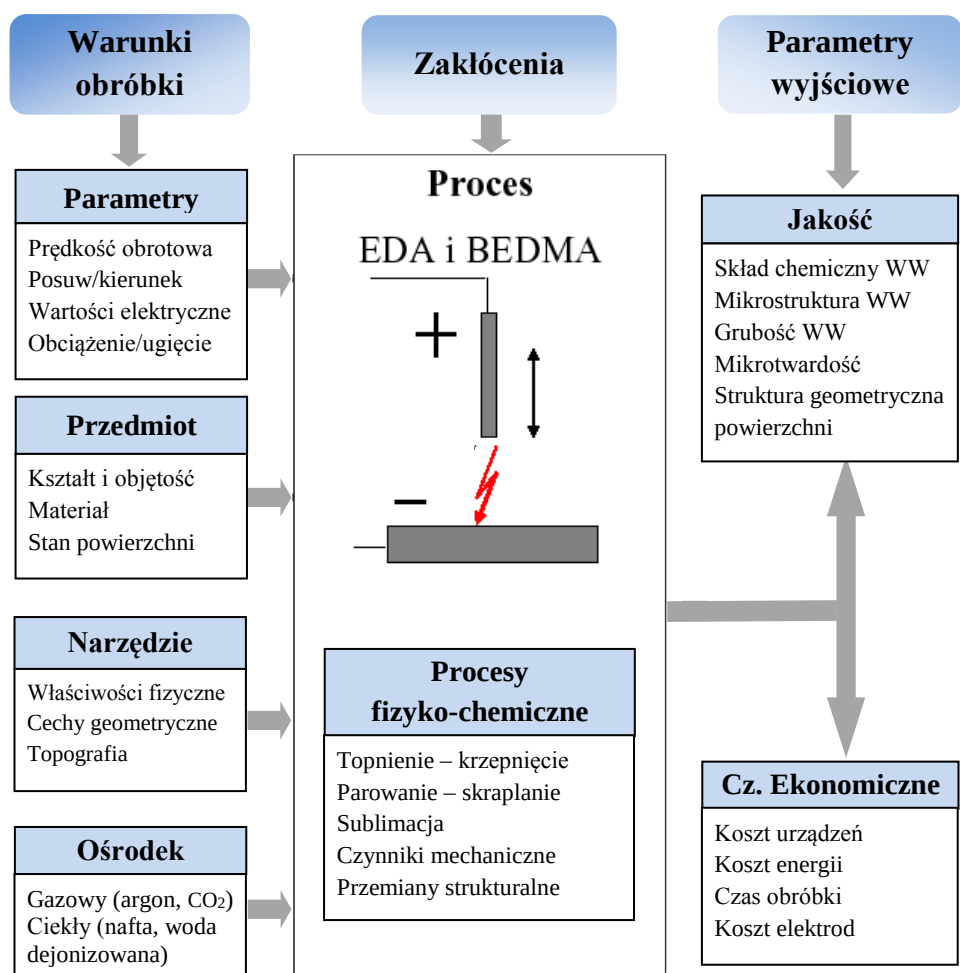
3.2. Zakres pracy

Badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej dysertacji, koncentrują się na analizie metod stopowania elektrodami kształtowymi (monolitycznymi), pręcikowymi-drgającymi oraz obrotowymi (szczotkowymi).

Zakres prac badawczych obejmuje określenie wpływu warunków stopowania na stan warstwy wierzchniej:

- grubość, równomierność nanoszenia powłok,
- mikrostrukturę metalograficzną modyfikowanych warstw,
- skład chemiczny warstwy wierzchniej,
- chropowatość powierzchni,
- mikrotwardość,
- wydajność,
- rodzaj i postać materiału anody (stal X10CrNi18-8 (1H18N9), wolfram, WC – węgiel spiekany wolframu, WC – węgiel wolframu natryskiwany plazmowo),
- parametry obróbki: U , I , t_i , t_0 , t_{ob} .

Na rysunku (rys. 3.1) zestawiono czynniki występujące w procesie obróbki elektroerozyjnej.



Rys. 3.1. Schemat procesu stopowania metodami EDA i BEDMA jako obiektu badań

4. WARUNKI I METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH PROCESÓW STOPOWANIA Z WYKORZYSTANIEM WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH

4.1. Aparatura badawcza

Realizacja prac badawczych dotyczących stopowania wymagała wykonania analizy czynników wpływających na przebieg prowadzonego procesu i wytypowania stanowiska badawczego umożliwiającego wykonanie badań eksperymentalnych.

Istotną częścią przygotowań do przeprowadzenia badań było również określenie wymaganych charakterystyk aparatury pomiarowej, niezbędnej do pomiaru wybranych parametrów procesu oraz monitorowania parametrów elektrycznych obróbki. W celu określenia wskaźników jakościowych oraz ilościowych rezultatów badań wytypowano aparaturę niezbędną do przygotowania zglądów metalograficznych próbek, obserwacji mikrostruktury metalograficznej, mikroanalizy rentgenowskiej oraz pomiarów mikrotwardości, zmiany masy i cech struktury geometrycznej powierzchni.

Centrum obróbcze Roboform 30

Centrum obróbcze Roboform 30 (rys. 4.1) jest obrabiarką elektroerozyjną do drażenia wgłębnego – EDM. Urządzenie wyposażone jest w generator tranzystorowy izoenergetyczny, posiada układ sterowania CNC i umożliwia obróbkę w czterech osiach. Wykorzystanie tej obrabiarki do prac badawczych wymagało zmiany polaryzacji elektrod (biegunowości) na odpowiadającą warunkom stopowania elektroiskrowego. Przedmioty poddawane stopowaniu elektroiskrowemu mocowane były do stołu centrum obróbczego z zastosowaniem przystosowanych do tego celu uchwytów. Elektrode roboczą mocowano w uchwycie firmy EROVA, zapewniającym równoległość powierzchni próbki i elektrody roboczej. Jako ośrodek roboczy, w którym przeprowadzano badania zastosowano naftę kosmetyczną firmy Charmilles Technologies.

Centrum obróbcze składa się z drążarki z magazynem elektrod i sondy pomiarowej. Parametry mechaniczne obrabiarki umożliwiają obróbkę elementów o maksymalnych wymiarach 500x400x400 mm i masie do 500 kg. ROBOFORM 30 jest drążarką elektroerozyjną dedykowaną do drażenia dokładnych i złożonych matryc, form oraz innych elementów

o skomplikowanych kształtach w materiałach trudnoobrabialnych. Obrabiarka posiada funkcję orbitującego wykańczania, np. ostrych naroży wewnętrznych, konturów i innych elementów geometrycznych. Centrum obróbcze umożliwia osiągnięcie powierzchni o chropowatości $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. Jako układ zasilający obwód roboczy obrabiarki wykorzystywany jest generator tranzystorowy izoenergetyczny.



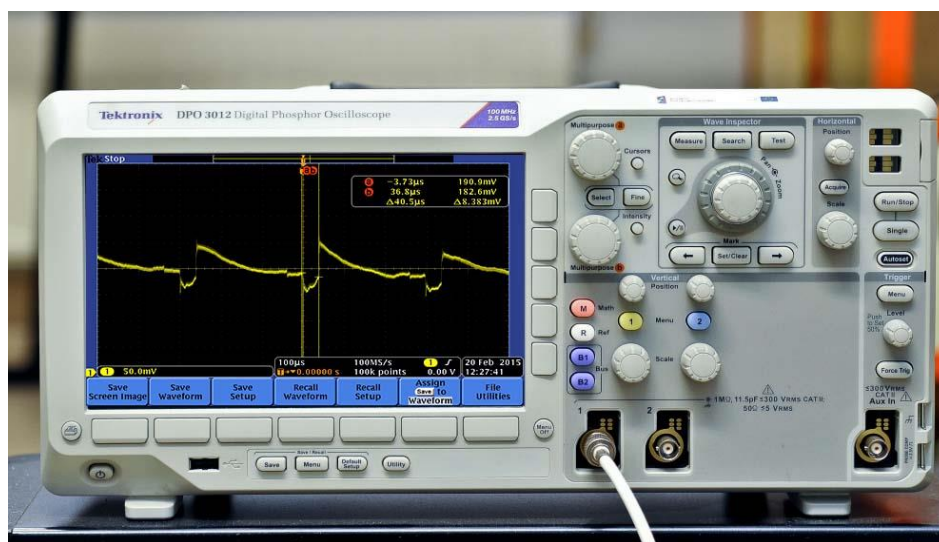
Rys. 4.1. Fotografia stanowiska badawczego Roboform 30 firmy CHARMILLES TECHNOLOGIES

Charakterystyka techniczna drążarki Roboform 30:

- zakres nastaw wartości natężenia prądu $I = 4 - 64 \text{ A}$,
- zakres nastaw czasu trwania impulsu $t_i = 100 \mu\text{s} - 6400 \mu\text{s}$,
- zakres nastaw czasu trwania przerwy $t_0 = 100 \mu\text{s} - 6400 \mu\text{s}$,
- wartość napięcia w szczelinie roboczej $U \approx 200 \text{ V}$,
- wartość natężenia przepływu cieczy roboczej 6 l/min ,
- zasilanie 3-fazowe $380/400\text{V}$,
- maksymalna masa przedmiotu obrabianego 500 kg .

Oscyloskop DPO 3012 firmy Tektronix

Do obserwacji i rejestracji przebiegów sygnałów elektrycznych użyto oscyloskopu cyfrowego DPO3012 firmy Tektronix (rys. 4.2). Układ pomiarowy oscyloskopu został wyposażony w elementy niezbędne do kondycjonowania sygnałów elektrycznych. Parametry techniczne oscyloskopu przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 4.2. Oscyloskop cyfrowy firmy Tektronix DPO 3012

Tabela 2. Wybrane parametry techniczne oscyloskopu Tektronix DPO3012

Parametr	Zakres zmienności
Kanały analogowe	2
Pasma analogowe (-3dB)	100 MHz
Obliczeniowy czas narastania przy 5 mV/dz	3,5 ns
Częstotliwość próbkowania (kanały analogowe)	2,5 GS/s
Sprzętowe ograniczenia pasma	20 MHz lub 150 MHz
Impedancja wejściowa	1MΩ±1%, 75Ω±1%, 50Ω±1%,
Zakres czułości wejścia, 1MΩ	1 mV/dz do 10 V/dz
Zakres czułości wejścia, 75Ω, 50Ω	1 mV/dz do 1 V/dz
Rozdzielczość pionowa	8 bitów (11 bitów w trybie HiRes)
Max napięcie wejściowe, 1MΩ	300 V _{RMS} z impulsem ≤±450 V
Max napięcie wejściowe, 75Ω, 50Ω	5 V _{RMS} z impulsem ≤±20 V
Dokładność wzmacnienia DC	±1,5% przy offsecie 0 V
Maksymalna długość rekordu (wszystkie kanały)	5M punktów

Parametr	Zakres zmienności
Maksymalna częstotliwość próbkowania (wszystkie kanały)	2,5 GS/s
Maksymalny rejestrowany odcinek czasu przy maksymalnym próbkowaniu (wszystkie kanały)	2 ms
Zakres podstawy czasu (s/dz)	1 ns do 1000s
Zakres opóźnienia podstawy czasu	10 działek do 5000 s.
Zakres przesunięcia czasu pomiędzy kanałami	±100 ns.
Dokładność podstawy czasu	-10 działek do 5000 s
Zakres przesunięcia czasu pomiędzy kanałami	±100 ns
Dokładność podstawy czasu	±10 ppm w każdym ≥1 ms interwale

Profilometr skaningowy FORM Talysurf 2

Pomiary parametrów chropowatości wykonano przy użyciu profilometru skanującego FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson GB (rys. 4.3). Urządzenie przeznaczone jest do zaawansowanych pomiarów 3D stereometrii powierzchni, profili 2D oraz konturów. Podstawowe parametry urządzenia zestawiono w tabeli 3. Badania chropowatości powierzchni 2D wykonano dla każdego z badanych elementów. Analizę parametrów profilu umożliwia dedykowane oprogramowanie Talymap dostarczone z urządzeniem. Profilometr daje możliwość pomiarów parametrów wysokościowych, horyzontalnych, a także kształtu, rozkładu wierzchołków oraz udziału nośnego chropowatości (R), falistości (W) i profilu niefiltrowanego (P) [116].

Przykładowe standardowe parametry charakteryzujące powierzchnie:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4.1)$$

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |y_{max,i}| + |y_{min,i}| \quad (4.2)$$

$$Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Sm_i \quad (4.3)$$

gdzie:

Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu;

Rz – największa wysokość profilu;

Sm – średnia szerokość rowków elementów profilu.



Rys. 4.3. Profilometr FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson GB

Tabela 3. Podstawowe parametry techniczne profilometru FORM TALYSURF Series 2 firmy Taylor Hobson GB

Parametr	Wartość
Zakres pomiaru profilometru	+/- 0,5 mm
Rozdzielczość	0,6 nm
Odcinek pomiarowy do L	50 mm
Zakres przesuwu w osi Y	50 mm
Promień igły pomiarowej	2 μm
Sterowanie	CNC
Klasa dokładności	1

Profilometr optyczny Talysurf CCI Lite firmy TAYLOR HOBSON

Do badań przestrzennych cech struktury geometrycznej powierzchni wykorzystywano, przedstawiony na rys. 4.4, bezstykowy profilometr optyczny Talysurf CCI Lite firmy Taylor Hobson.



Rys. 4.4. Profilometr optyczny Talysurf CCI Lite

Parametry techniczne profilometru:

- zakres pomiarowy w osi Z – 2,2 mm,
- rozdzielczość – 10 pm,
- ilość punktów pomiarowych – 1024x1024.

System pomiarowy wyposażony jest w oprogramowanie do analizy wyników pomiarów firmy Taylor Hobson.

Mikroskopy skaningowe

Mikrofotografie SEM powierzchni oraz mikroanalizę rentgenowską wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI S-3500N (rys. 4.5) z systemem mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego. Urządzenie daje możliwość uzyskiwania obrazów elektronowych powierzchni próbek o rozdzielczości 0,4 nm przy napięciu przyspieszającym 30 kV i poniżej 2 nm przy napięciu 1 kV.



Rys. 4.5. Fotografia mikroskopu skaningowego HITACHI S-3500N

Badania struktury metalograficznej oraz badania ilościowe dotyczące składu chemicznego modyfikowanych warstw przeprowadzono z wykorzystaniem techniki analizy rentgenowskiej metodą EDS (Energy Dispersive Spectrometry), z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego JEOL JSM 7100F (rys. 4.6) z emisją polową o dużej rozdzielczości (Schottky'ego) i analizatorem mikrorentgenowskim OXFORD XRD. Podstawowe parametry mikroskopu: maksymalny wymiar próbek – 25 mm, zakres powiększeń od 10x do 1 000 000x, stolik mikroskopu zmotoryzowany w 5 osiach.



Rys. 4.6. Fotografia mikroskopu skaningowego Jeol JSM 7100F z mikroanalizatorem rentgenowskim OXFORD XRD

Mikroskop metalograficzny typu odwróconego Eclipse MA 200 firmy Nikon

W celu wykonania badań mikrostruktury metalograficznej warstw stopowanych, topografii powierzchni, kraterów powstałych w wyniku stopowania elektroiskrowego oraz rejestracji ich obrazu wykorzystywano technikę mikroskopii świetlnej – mikroskop metalograficzny typu odwróconego Nikon Eclipse MA200 (rys. 4.7).

Podstawowe parametry techniczne:

- zakres powiększeń – 10x do 1000x (układ obiektywów ze zmieniaczem),
- pełna motoryzacja stolika w 3 osiach,
- kamera cyfrowa do rejestracji obrazu,
- cyfrowy system analizy obrazu NIS 4.2.

Wykorzystanie zmotoryzowanej osi ogniskowania umożliwia wykonywanie obrazów składanych o (wynikowej) dużej głębi ostrości oraz ich pomiarów wysokościowych i horyzontalnych.



Rys. 4.7. Mikroskop metalograficzny świetlny typu odwróconego Nikon Eclipse MA 200 z systemem cyfrowej analizy obrazu NIS 4.2

Aparatura do przygotowania próbek metalograficznych

W celu dokonania obserwacji mikroskopowych modyfikowanych warstw przygotowano próbki według standardowych procedur.

Do wykonania przekrojów poprzecznych wykorzystano przecinarkę Mecatome T202 firmy Persi przedstawioną na fotografii (rys. 4.8).

W celu przygotowania zglądów metalograficznych próbek ze stopowaną powierzchnią wykorzystywano polerkę metalograficzną firmy STRUERS LABOPOL-5 (rys. 4.9). Jako ścierniwo stosowano zawiesiny diamentowe.



Rys. 4.8. Przecinarka Mecatome T202 firmy Persi



Rys. 4.9. Polerka STRUERS LABOPOL-5

Waga analityczna AS 160/X firmy RADWAG

Pomiar masy badanych próbek wykonano wagą analityczną AS 160/X firmy RADWAG (rys. 4.10) z systemem kalibracji wewnętrznej o zakresie pomiarowym do 160 g, z dokładnością pomiaru do 0,1 mg.



Rys. 4.10. Waga analityczna AS 160/X firmy RADWAG

Mikrotwardościomierz Innovatest Nexus 4000

Do pomiaru mikrotwardości wykorzystano mikrotwardościomierz typu PMT-2 (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Mikrotwardościomierz Innovatest Nexus 4000

Tester tribologiczny T-01M

Do oceny właściwości tribologicznych wykorzystano urządzenie T-01M ze skojarzeniem kula-tarcza (rys. 4.12). Z jego pomocą wykonano badania odporności na zużycie oraz współczynnika tarcia powierzchni po stopowaniu. Umożliwia on badanie par kinematycznych pracujących w ruchu ślizgowym, w zależności od prędkości poślizgu i nacisków powierzchniowych. Tester T-01M spełnia warunki prowadzenia badań zgodnie z wymogami norm

ASTM G 99 oraz DIN 50324. W badaniach prowadzonych na potrzeby niniejszej pracy wykorzystywano skojarzenie składające się z nieruchomej kuli dociskanej siłą do obracającej się z zadaną prędkością tarczy z naniesioną powłoką.



Rys. 4.12. Tester tribologiczny T-01M

Urządzenie T-01M wyposażone jest w system pomiarowo-sterujący.

Podstawowe parametry techniczne urządzenia:

- rodzaj ruchu: ślizgowy,
- geometria styku: kula-tarcza,
- nominalna średnica kuli: 10 mm,
- nominalna średnica tarczy: 42 mm,
- prędkość poślizgu: do 1 m/s,
- obciążenie: do 100 N,
- promień tarcia: do 18 mm.

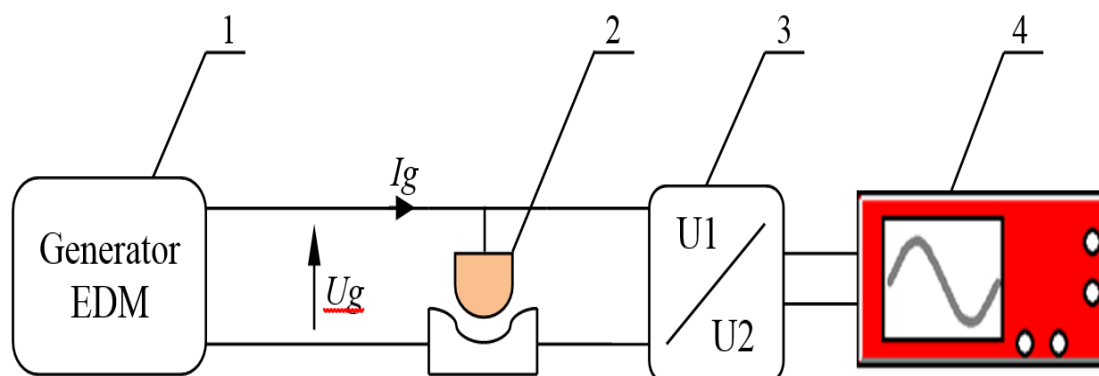
4.2. Badania przebiegu napięcia w szczelinie międzyelektrodowej

Przebieg napięcia w szczelinie międzyelektrodowej jest zależny od typu generatora i szeregu warunków fizycznych panujących w przestrzeni międzyelektrodowej.

W celu obserwacji i rejestracji w czasie rzeczywistym przebiegów napięcia i prądu elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej zbudowano układ pomiarowy składający się

z generatora obrabiarki EDM, układu elektrod (ER i PO), układu kondycjonującego sygnały pomiarowe, sondy napięciowej Techtronix i oscyloskopu Tektronix DPO3012.

Schemat układu pomiarowego wraz z układem kondycjonującym przedstawiono na rys. 4.13.



Rys. 4.13. Schemat układu pomiarowego: 1 – generator impulsów EDM; 2 – układ elektrod - ER i PO; 3 – układ kondycjonujący sygnały elektryczne; 4 – oscyloskop z funkcją rejestracji przebiegu impulsów

Sondę oscyloskopu podłączono przez dzielnik napięcia w celu zabezpieczenia układu wejściowego ze względu na wysokie wartości napięć stosowanych w czasie obróbki. Jego zadaniem jest zmniejszenie napięcia do wartości bezpiecznych wg. zależności (4.4):

$$U_2 = U_1/N \quad (4.4)$$

gdzie:

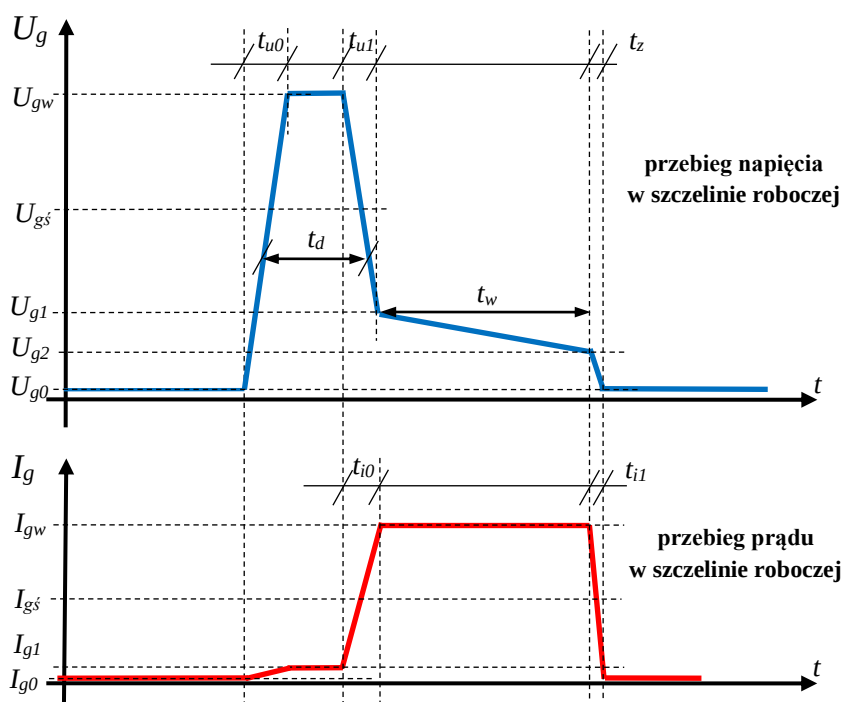
U_1 – napięcie wejściowe;

U_2 – napięcie wyjściowe;

N – wartość ustawiona na dzielniku napięcia (podczas badań wynosiła 100).

Rejestrowane przebiegi napięcia podczas obróbki zostały zapisane w pamięci oscyloskopu. Ich analiza umożliwiała ocenę parametrów elektrycznych (napięcia i natężenia prądu) podczas procesu obróbki. Dzięki obserwacjom można było zbadać i porównać wartości nastaw oraz rzeczywiste wartości czasu przerwy i czasu impulsu.

W celach porównawczych scharakteryzowano wyidealizowane przebiegi impulsów napięciowego oraz prądowego zilustrowane na rys. 4.14.



Rys. 4.14. Przykład wyidealizowanego przebiegu napięcia i prądu elektrycznego w szczeliny międzyelektrodowej

Na wykresach można zaobserwować punkty charakterystyczne przebiegów czasowych napięcia oraz prądu wyładowania:

- U_{g0} – wartość napięcia w trakcie przerwy impulsu przy otwartym obwodzie. Napięcie może mieć wartość od kilku do kilkunastu woltów i stanowi ono napięcie wstępnej polaryzacji, potrzebne do wykrywania styku (kontaktu elektrycznego) pomiędzy elektrodą roboczą i przedmiotem obrabianym,
- U_{gw} – właściwe napięcie zapłonu, (nazywane napięciem obwodu otwartego, napięciem biegu luzem) napięcie w trakcie trwania impulsu, ale przed chwilą wystąpienia zapłonu, wartość tego napięcia zależy od rodzaju obróbki, rodzaju obrabiarki,
- U_{g1} – wartość napięcia bezpośrednio po wystąpieniu zapłonu,
- U_{g2} – wartość napięcia w końcowej fazie impulsu. Zwykle jest to wartość napięcia zbliżona lub mniejsza od poziomu U_{g1} . W trakcie drążenia przebieg napięcia w szczeliny międzyelektrodowej (po zapłonie) nie jest w pełni gładki jak to przedstawiono na wyidealizowanym wykresie, posiada szumy i oscylacje spowodowane głównie zjawiskami zachodzącymi w szczeliny i sposobem pracy generatora,
- $U_{gś}$ – wartość średnia napięcia w szczeliny,

- t_{u0} – czas narastania napięcia w szczelinie międzyelektrodowej, głównie zależny od czasu narastania napięcia podawanego z generatora oraz od impedancji wyjściowej generatora i pojemności pasożytniczych w połączeniu kablowym pomiędzy generatorem mocy a układem elektrod,
- t_d – czas opóźnienia zapłonu, jego analiza umożliwia oszacowanie szerokości szczeliny międzyelektrodowej. Niektóre regulatory szczeliny korzystają właśnie z tego czasu opóźnienia do sterowania serwonapędami podczas procesu drażenia. Czas opóźnienia może posłużyć do wykrywania łuku elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej,
- t_{u1} – czas opadania napięcia w szczelinie międzyelektrodowej po wystąpieniu zapłonu. Szybkość opadania tego napięcia jest zdecydowanie większa od czasu narastania napięcia zapłonu t_{u0} ,
- t_w – czas trwania właściwego procesu elektrodrażenia, w czasie którego napięcie ulega obniżeniu. Czas ten może się zmieniać w zależności od czasu opóźnienia zapłonu t_d w generatorach izoczęstotliwościowych lub będzie stały dla każdego poprawnego impulsu dla generatorów izoenergetycznych,
- t_z – czas zaniku napięcia w szczelinie, ma związek z procesem rozładowania pojemności i indukcyjności w obwodzie generator-szczelina,
- I_{g0} – wartość prądu w trakcie przerwy impulsu przy otwartym obwodzie – bardzo mały prąd, rzędu μA lub mA , związany z napięciem wstępnym U_{g0} w szczelinie oraz konduktancją dielektryka (ma tu znaczenie rodzaj płynu, stan jego zanieczyszczenia oraz stan izolacji przewodów),
- I_{g1} – wartość prądu dla obwodu otwartego przy podaniu napięcia zapłonu,
- I_{gw} – właściwy maksymalny prąd drażenia (inaczej nazywany prądem wyładowania lub prądem roboczym) po wystąpieniu zapłonu, jego wartość zależy od ustawionych parametrów drażenia. W trakcie drażenia prąd charakteryzuje się występowaniem oscylacji i szumów pochodzących głównie od zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej i działania generatora. Dla generatorów pracujących w trybie prądowym wartość chwilowa prądu będzie stabilna, dla generatora pracującego w trybie napięciowym wartość prądu wzrośnie np. w chwili pojawienia się zwarcia w szczelinie. W przypadku krótkich impulsów drażenia, poniżej kilku mikrosekund, przebieg wartości prądu może mieć kształt trapezowy, a następnie trójkątny. Na wykresach będzie widoczny czas narastania i czas opadania wartości prądu,
- I_{gs} – wartość średnia prądu drażenia (roboczego),

- t_{i0} – czas narastania prądu w szczelinie, głównie zależny od impedancji wyjściowej generatora i indukcyjności pasytywnej pomiędzy generatorem a szczeliną,
- t_{i1} – czas opadania prądu w szczelinie.

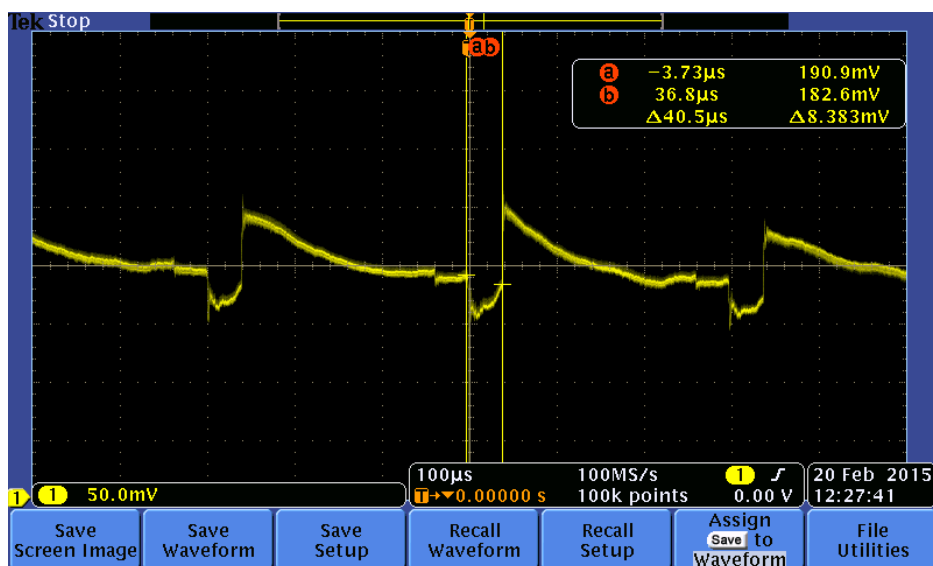
Dla czasów impulsu i przerwy rzędu setek nanosekund oraz pojedynczych mikrosekund zauważa się znaczne stromości narastania i opadania wartości prądu elektrycznego oraz napięcia. Kształt przebiegu wartości prądu zbliżony jest do trójkątnego, a przebiegu napięcia jest szpilkowy. Przy dłuższych czasach impulsów (powyżej kilkunastu mikrosekund) przebiegi przyjmują kształty trapezowe zbliżające się do prostokątnych.

Opisane powyżej przykłady mają charakter wyidealizowany i nie występują w funkcjonujących układach rzeczywistych. Szybkość narastania lub opadania zboczy przebiegów prądu wynika z istniejących w obwodzie elektrycznym elementów indukcyjnych i pojemnościowych oraz rezystancji – często są to parametry wyłącznie pasytywne. W obwodach RLC występuje także rezonans elektryczny, który bywa w jednych przypadkach uznawany za niepożądany, zaś w innych przypadkach za zjawisko korzystne, wykorzystywane do uzyskiwania warunków pracy generatorów odpowiadających dużej sprawności energetycznej. Elementy pasywne wpływają niepożądanie na oscylacje prądu i sygnału napięcia w szczelinie międzyelektrodowej. Należy zauważyć, że zjawisko wyładowania elektrycznego w procesie obróbki elektroerozyjnej zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej jest niestabilne i powoduje tętnienia oraz szumy w sygnale prądu i napięcia.

Oscylogram (rys. 4.15) przedstawia przykład zarejestrowanego przebiegu napięcia w trakcie realizacji badań. Na oscylogramie można dostrzec dwa charakterystyczne etapy przebiegu zmienności napięcia, tj. czas impulsu oraz czas przerwy. Funkcje kursorów dostępne w oscyloskopie (zaznaczone jako dwie pionowe linie a) i b) w kolorze żółtym) pozwalają dokonać pomiaru odległości punktów określonych pomiędzy w/w liniami. Wynik pomiaru oznaczony jako Δ wyświetlany jest w prawym górnym rogu ekranu oscyloskopu. Z oscylogramu odczytać można czas przerwy i czas trwania impulsu napięcia z charakterystycznymi punktami: napięcie zapłonu U_z , napięcie wyładowania U_w .

Analiza zarejestrowanego sygnału napięciowego i prądowego w przestrzeni międzyelektrodowej umożliwia wyciągnięcie wniosków o procesach zachodzących w szczelinie. Pozwala na wykrycie stanu zwarcia, obliczenie mocy wydzielanej w szczelinie, wykrycie jarzenia się łuku elektrycznego.

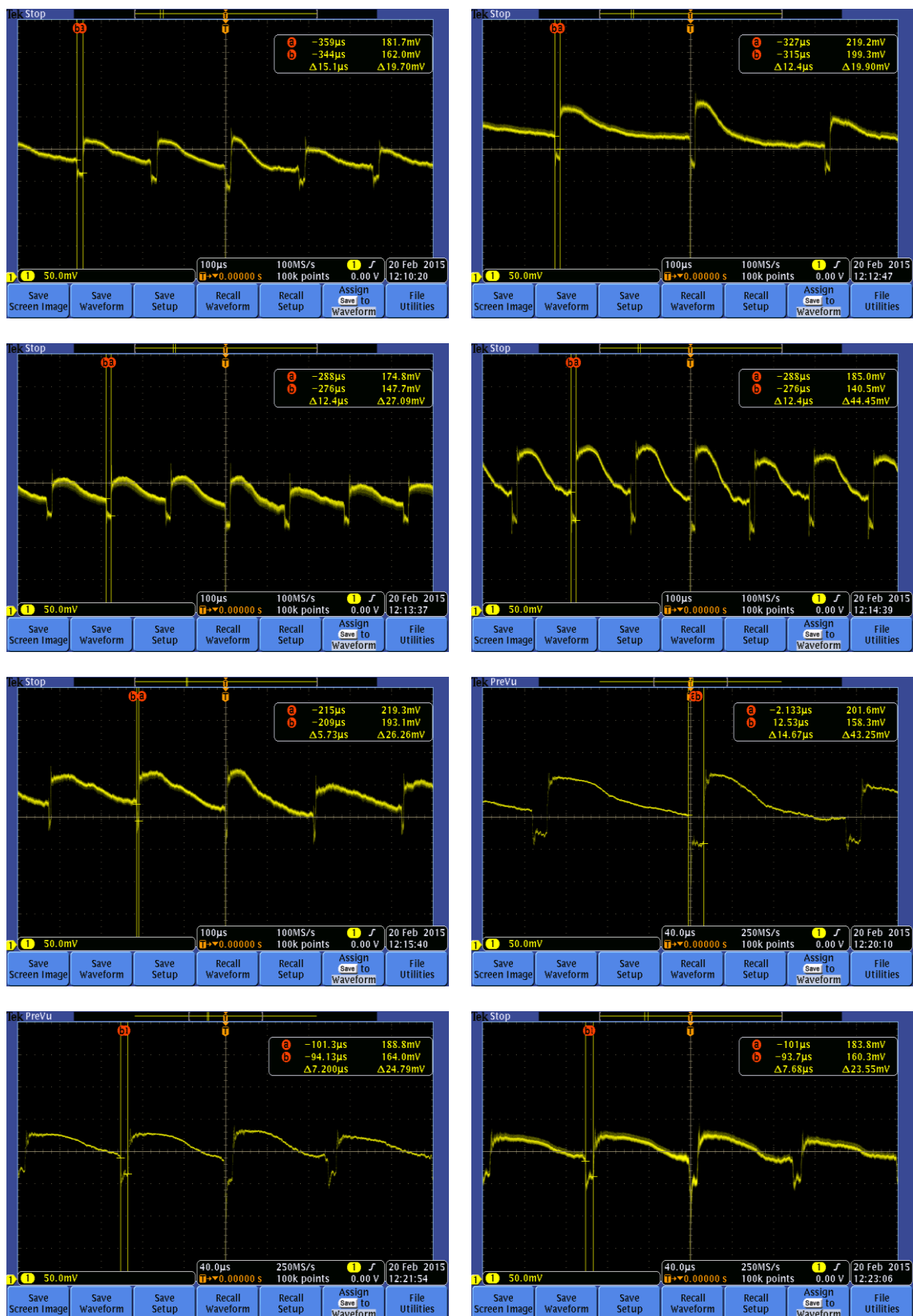
Zawartość składowych harmonicznych (zawartość sygnałów z zakresu częstotliwości radiowych) lub chwilowe zmiany napięcia w szczelinie oraz wartości prądu płynącego przez szczelinę pozwalają na wykrycie niektórych zjawisk występujących w czasie drążenia. Umożliwia to ocenę jakości drążenia.



Rys. 4.15. Oscylogram przebiegu impulsów napięciowych w szczelinie międzyelektrodowej zarejestrowanych w trakcie eksperymentu ($t_i = 260 \mu s$, $t_0 = 40 \mu s$, $I = 20 A$)

Zarejestrowane przebiegi napięcia dla różnych warunków obróbki pokazano na rys. 4.16. Analiza przebiegu sygnału napięciowego i prądowego w czasie prawidłowego przebiegu cyklu wyładowania pozwala na wyróżnienie kilku charakterystycznych faz napięciowo-czasowych: przed impulsem, w trakcie impulsu i po zaniku impulsu.

Współczesne systemy mikroprocesorowe i układy programowalne umożliwiają obróbkę sygnałów pochodzących ze szczeliny międzyelektrodowej niemal w czasie rzeczywistym, natomiast procesy obliczeniowe pozwalają ocenić stan szczeliny w każdym przebiegu impulsu. Szybka analiza tych informacji pozwala na bieżącą zmianę nastaw czasowych i prądowych generatora, tak by uzyskać założoną jakość obróbki. Niektóre algorytmy regulacji szczeliny w procesie drążenia elektroerozyjnego wykorzystują analizę statystyczną sygnałów, polegającą na zliczaniu impulsów poprawnych i impulsów zwarciovych w jednostce czasu. W procesach sterowania stosowane są także algorytmy logiki rozmytej, pozwala to na opracowanie efektywnego regulatora szczeliny międzyelektrodowej.

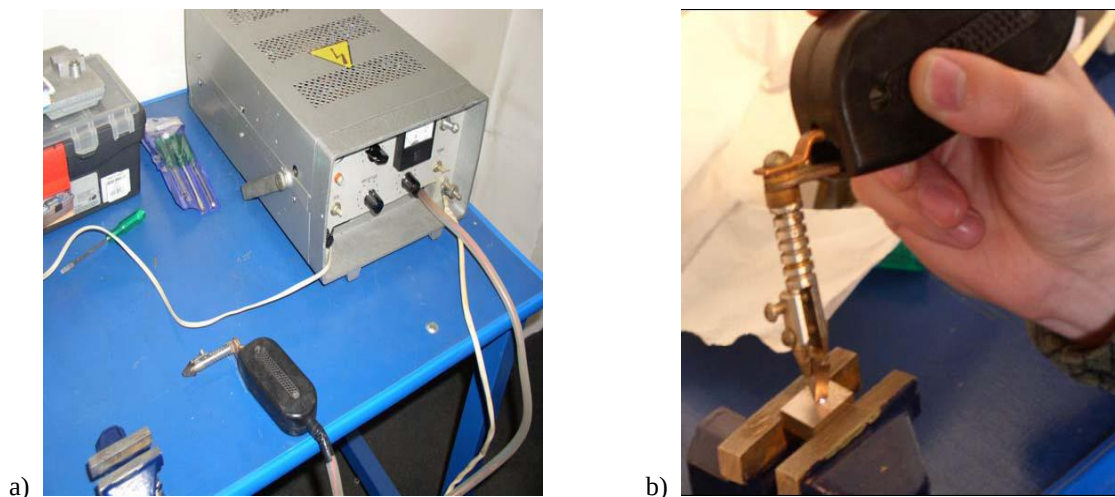


Rys. 4.16. Przykładowe zarejestrowane przebiegi impulsów napięciowych w szczelinie międzyelektrodowej dla różnych warunków obróbki

4.3. Badania stopowania z zastosowaniem elektrody pręcikowej-drgającej (SWA)

4.3.1. Opis stanowiska badawczego do stopowania elektroiskrowego elektrodą pręcikową-drgającą

Do badań stopowania elektroiskrowego elektrodą pręcikową-drgającą użyto przemysłowego (profesjonalnego) urządzenia przedstawionego na rys. 4.17. Podłożem do nanoszenia powłok była próbka wykonana ze stali C45 w stanie ulepszonym cieplnie (zahartowana i poddana odpuszczaniu), elektrodę stopową stanowił węglik wolframu (WC).



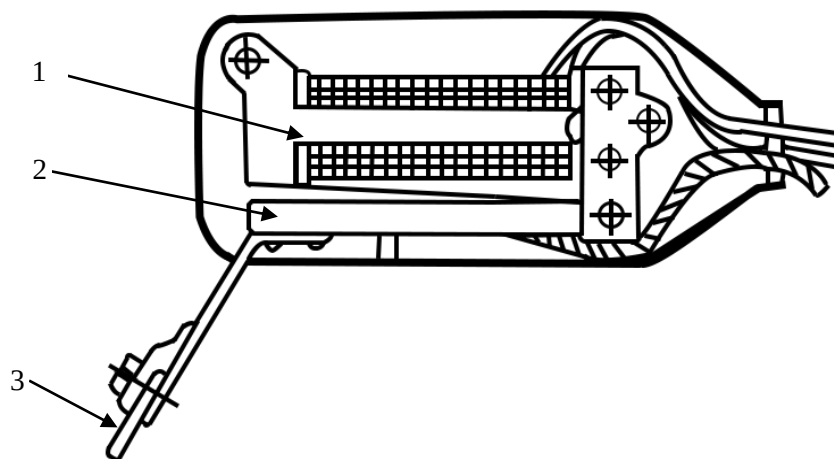
Rys. 4.17. Fotografia stanowiska badawczego do manualnego stopowania elektrodą wibracyjną – a) oraz manualna technika modyfikacji powierzchni próbki – b)

W urządzeniu zastosowano typowy generator RC. Posiada on możliwości nastaw parametrów poprzez zmianę pojemności kondensatorów oraz wartości rezystancji.

Cechy użytkowe urządzenia:

- skokowa nastawa pojemności kondensatorów $C = 150 \mu\text{F}$, $300 \mu\text{F}$,
- skokowa rezystancji w zakresie $R = 150 \Omega$, 300Ω ,
- regulowane maksymalne napięcie w szczelinie w zakresie $U \cong 22 - 106 \text{ V}$,
- maksymalna nastawa średnia wartości prądu $I = 8 \text{ A}$.

Schemat oraz zasadę działania głowicy roboczej do manualnego stopowania elektrodą wibracyjną przedstawiono na rys. 4.18.



Rys. 4.18. Widok części roboczej urządzenia do stopowania elektroiskrowego z wibrującą elektrodą roboczą. 1 – elektromagnes, 2 – zwoje, 3 – uchwyty do mocowania elektrody roboczej

Podczas stopowania, po zwarcie elektrody roboczej zamocowanej w uchwycie 3 dochodzi do przepływu prądu w układzie obróbczym. W wyniku tego następuje przepływ prądu elektrycznego przez elektromagnes 1, który przyciąga zwoje 2, powodując tym przerwanie obwodu elektrycznego i zajarzenie łuku elektrycznego. W tym czasie następuje rozładowanie kondensatora. Opisywany cykl powtarza się podczas procesu stopowania.

4.3.2. Charakterystyka czynników wpływających na przebieg procesu stopowania elektrodą pręcikową-drgającą (SWA)

Stopowanie elektroiskrowe z wykorzystaniem układu z elektrodą pręcikową wykonującą ruch drgający prowadzoną manualnie jest jednym z najprostszych i najstarszych sposobów nanoszenia materiału na powierzchnię elementu.

Z przeprowadzonej analizy literaturowej procesu stopowania z zastosowaniem elektrody pręcikowej wynika, że zależności wyrażające związki pomiędzy parametrami wejściowymi procesu a efektami obróbki są trudne do analitycznego opisu. Dotychczasowe próby budowy modeli fizycznych i analitycznych trudno uznać za w pełni miarodajne, głównie ze względu na daleko idące założenia upraszczające przyjmowane do ich budowy. Wobec powyższego cząstkowe analizy poszczególnych zjawisk fizycznych występujących w szczelinie międzyelektrodowej obarczone są znacznymi błędami. Brak jest zatem zadowalających modeli opisujących obiekt badań.

Wobec nakreślonej powyżej sytuacji efektywną metodą poznania procesu są badania eksperymentalne, które umożliwiają zbudowanie zależności funkcyjnych (statystycznych) wiążących parametry obróbki z efektami technologicznymi.

Jako parametry wyjściowe procesu przyjęto:

- przyrost masy,
- parametry struktury geometrycznej powierzchni,
- grubość mikronapoiiny,
- skład chemiczny,
- głębokość strefy wpływów cieplnych,
- rozkład mikrotwardości μHV .

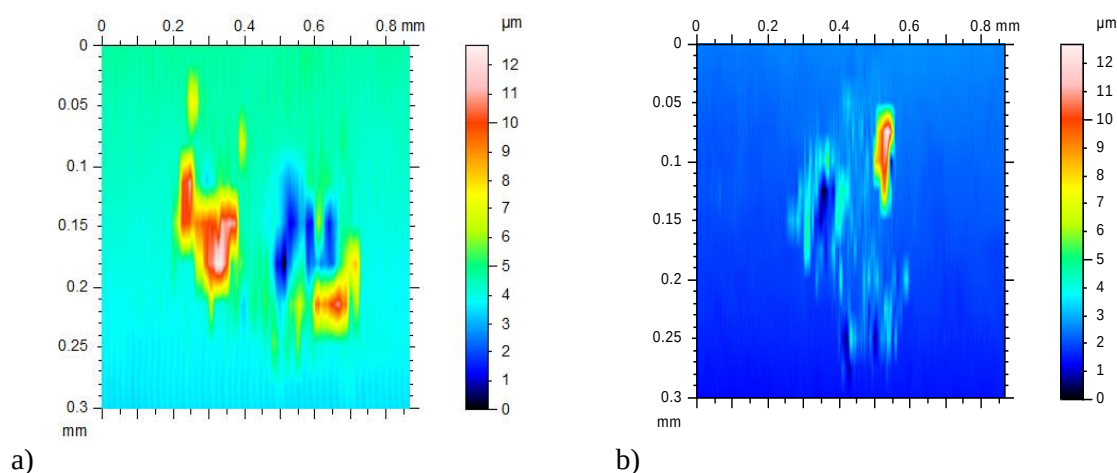
Badanie efektów pojedynczych wyładowań w warunkach stopowania elektrodą pręcikową-drgającą SWA

W procesie obróbki elektroerozyjnej w wyniku wyładowań elektrycznych pomiędzy elektrodami powstaje kanał plazmowy, wskutek czego następuje lokalne nagrzewanie elektrody roboczej oraz przedmiotu obrabianego. Bezpośrednim efektem tych oddziaływań jest konstytuowanie technologicznej warstwy wierzchniej na powierzchni przedmiotu obrabianego. Najistotniejszymi elementami charakteryzującymi technologiczną warstwę wierzchnią (TWW) są cechy struktury geometrycznej powierzchni, skład chemiczny oraz mikrostruktura metalograficzna ukonstytuowanej podczas obróbki elektroerozyjnej warstwy.

Skutki oddziaływań wyładowań elektrycznych z powierzchnią obrabianą są trudne do fizykalnego opisu, a zbudowane na ich podstawie modele matematyczne mało przydatne do praktycznej analizy. Opisywane czynniki sprawiają, że w celu poznania rzeczywistych efektów obróbkowych, autorzy opracowań naukowych skupiają się głównie na badaniach eksperymentalnych procesu. Autor niniejszego opracowania koncentruje się na zagadnieniach dotyczących skutków wyładowań elektrycznych na konstytuowanie wybranych cech warstwy wierzchniej (WW) – zmiany składu chemicznego w powiązaniu ze zmianami mikrostrukturalnymi WW oraz cechami mikrogeometrycznymi (chropowatością) powierzchni.

Przeprowadzone wstępne badania eksperymentalne miały na celu analizę jakościową oraz ilościową skutków pojedynczych wyładowań elektrycznych w szczelinie międzyelektrodowej, uzyskiwanych w warunkach stopowania elektrodą pręcikową-drgającą (SWA). Jako źródło zasilania zastosowano generator RC. Parametry zasilania: napięcie $U = 60 \text{ V}$, pojem-

ność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$. Prowadzenie elektrody odbywało się w sposób manualny. Próbkę wykonano ze stali C45. Powierzchnia próbek przed badaniami została wypolerowana. Na rys. 4.19 przedstawiono przykładowe mapy wysokościowe kraterów powstałych wskutek pojedynczych wyładowań na powierzchni stopowanej.



Rys. 4.19. Przykładowe mapy wysokościowe powierzchni kraterów powstałych w wyniku pojedynczych wyładowań podczas stopowania elektrodą pręcikową-drgającą, generator RC, napięcie $U = 60 \text{ V}$, pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

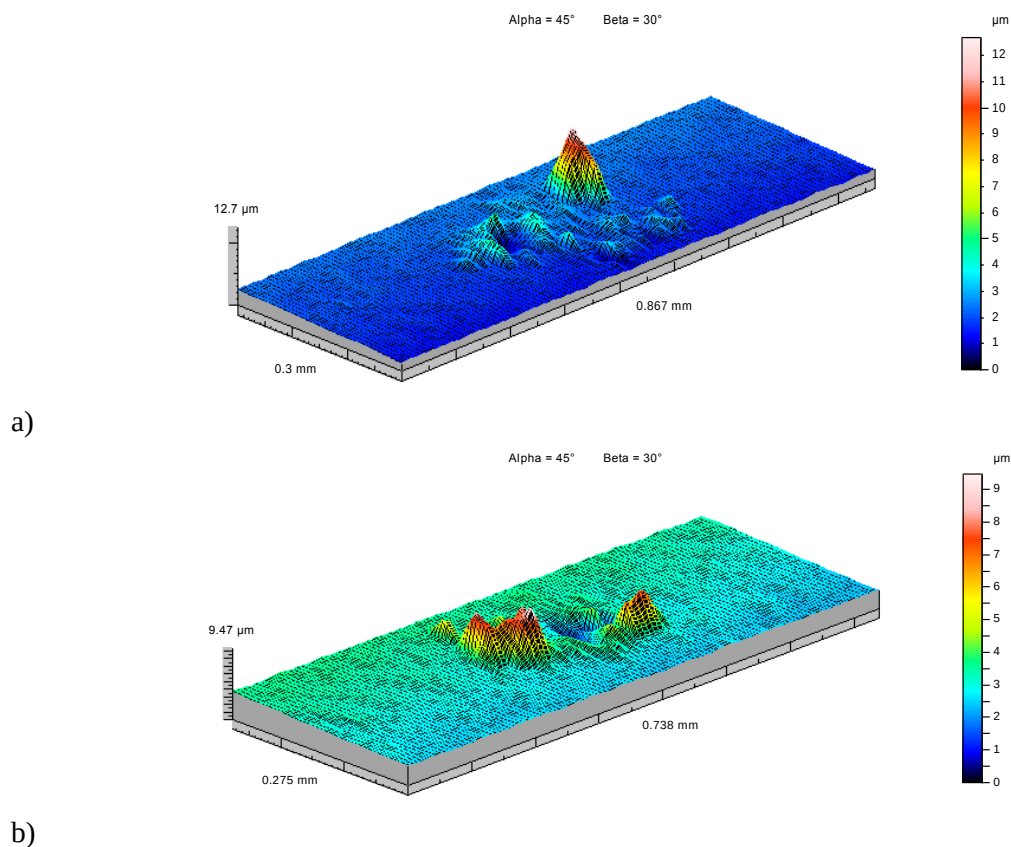
Pomiary parametrów chropowatości profilu 3D powierzchni poddanej stopowaniu wykonano z rozdzielczością 1024 punkty x 1024 linie. Przykładowe obrazy przestrzenne (3D) kraterów powstałych w wyniku pojedynczych wyładowań przedstawiono na rys. 4.20.

Na podstawie analizy wyników pomiaru chropowatości 3D w bezpośrednim otoczeniu krateru powstałego na powierzchni stopowanej określono parametry nierówności typowych kraterów. Zestawienie tych parametrów zawiera tabela 4.

Tabela 4. Parametry geometryczne pojedynczych kraterów po stopowaniu metodą SWA

Parametr	Jedn.	Próbka a)	Próbka b)	Wart. śr.*
Powierzchnia dolin nierówności	mm^2	0,0374	0,0477	0,0422
Pow. wierzchołków nierówności	mm^2	0,1140	0,0688	0,0908
Maksymalna głębokość nierówności	μm	2,08	2,86	2,42
Maksymalna wysokość nierówności	μm	10,50	6,60	8,40
Średnia głębokość nierówności	μm	0,102	0,137	0,117
Średnia wysokość nierówności	μm	0,506	0,458	0,535
Objętość dolin nierówności	μm^3	3815	6556	5118
Objętość wzniesień nierówności	μm^3	57458	31490	45140

* podana wartość jest średnią z trzech pomiarów



Rys. 4.20. Przykłady obrazów przestrzennych (3D) skutków pojedynczych wyładowań uzyskanych w warunkach wyładowań elektrycznych z zastosowaniem elektrody przeciskowej a) – próbka 01, b) – próbka 02, próbkowanie powierzchni 1024 punkty x 1024 linie

Zestawienie parametrów struktury geometrycznej analizowanych powierzchni przedstawiono w tabelach. Tabela 5 zawiera zestawienie parametrów amplitudowych nierówności, tabela 6 zestawienie parametrów powierzchniowych i objętościowych chropowatości, tabela 7 zestawienie parametrów przestrzennych chropowatości natomiast tabela 8 zestawienie parametrów hybrydowych chropowatości.

Tabela 5. Parametry amplitudowe nierówności

Parametr	Jedn.	Próbka – a)	Próbka – b)
Sa	μm	0,449	0,416
Sq	μm	0,845	0,705
Sp	μm	10,5	6,37
Sv	μm	2,16	3,10
St	μm	12,7	9,47
Ssk	μm	5,67	3,49
Sku		50,2	22,4
Sz	μm	3,77	5,76

Tabela 6. Zestawienie parametrów powierzchniowych i objętościowych chropowatości

Parametr	Jedn.	Próbka – a)	Próbka – b)	
STp	%	0,1	0,5	(2 μm poniżej najwyższego szczytu)
SHTp	μm	0,803	0,722	(20% – 80%)
Smmr	mm^3/mm^2	0,00216	0,0031	
Smvr	mm^3/mm^2	0,0105	0,00637	
Smr	%	0	0,1	(1 μm poniżej najwyższego szczytu)
SHTp	μm	0,803	0,722	(20% – 80%)
Smr	%	0	0,1	(1 μm poniżej najwyższego szczytu)
STp	%	0	0,1	(1 μm poniżej najwyższego szczytu)

Tabela 7. Zestawienie parametrów przestrzennych chropowatości

Parametr	Jedn.	Próbka – a)	Próbka – b)	
SPc	pks/mm^2	3,85	0	(1 μm ; 10 μm)
Sds	pks/mm^2	173	158	
Str		0,213	0,614	
Sal	Mm	0,136	0,107	
Std	$^\circ$	71	-69,5	
Sfd		2,2	2,22	
SPc	pks/mm^2	3,85	0	(1 μm ; 10 μm)

Tabela 8. Zestawienie parametrów hybrydowych chropowatości

Parametr	Jedn.	Próbka – a)	Próbka – b)
Sdq	$\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,0905	0,0858
Ssc	$1/\mu\text{m}$	0,314	0,415
Sdr	%	0,397	0,356

Podsumowanie

Przedstawione w zestawieniach tabelarycznych parametry chropowatości mogą posłużyć do oceny pojedynczych (lokalnych) skutków wyładowań elektrycznych na stopowanej powierzchni. Średnie wartości parametrów nierówności (z trzech pomiarów) wynoszą:

- powierzchnia dolin nierówności 0,0422 mm^2 ,
- powierzchnia wierzchołków nierówności 0,0908 mm^2 ,
- maksymalna głębokość nierówności 2,42 μm ,
- maksymalna wysokość nierówności 8,4 μm ,
- średnia głębokość nierówności 0,117 μm ,

- średnia wysokość nierówności 0,535 μm ,
- średnia objętość dolin nierówności 5118 μm^3 ,
- objętość wierzchołków nierówności 45140 μm^3 .

Analiza parametrów powierzchniowych kraterów wskazuje, że powierzchnia dolin nierówności odniesiona do powierzchni wierzchołków (wzniesień) nierówności w przypadku stopowania elektrodą pręcikową osiąga średnią wartość około 45–50%.

W wyniku oceny parametrów wysokościowych mikronierówności można stwierdzić, że maksymalna wysokość wierzchołków nierówności zawiera się w przedziale 8,2 – 10,5 μm , natomiast maksymalna głębokość nierówności 2,08 – 2,42 μm . Relacja maksymalnej głębokości do wysokości wierzchołków określona dla wartości średnich z pomiarów obu parametrów wynosi około 22%.

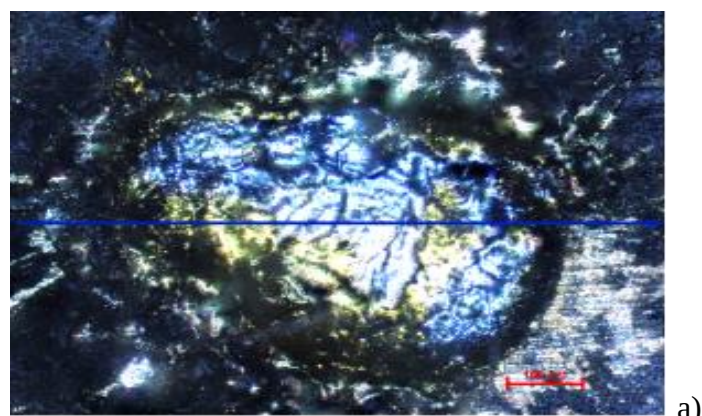
Analiza parametrów objętościowych kraterów wskazuje, że objętości dolin nierówności do objętości wierzchołków (wzniesień) nierówności, uzyskiwanych dla typowych warunków obróbki elektrodą pręcikową, stanowią średnio około 15 do 20% objętości wzniesień.

Analiza ilościowa, jak również ocena wizualna topografii powierzchni, wskazuje na istnienie asymetrii rozkładu wzniesień w odniesieniu do dolin nierówności i wynika z niej, że w opisywanych przypadkach mamy do czynienia z przyrostem objętości (a zatem i masy) badanych próbek.

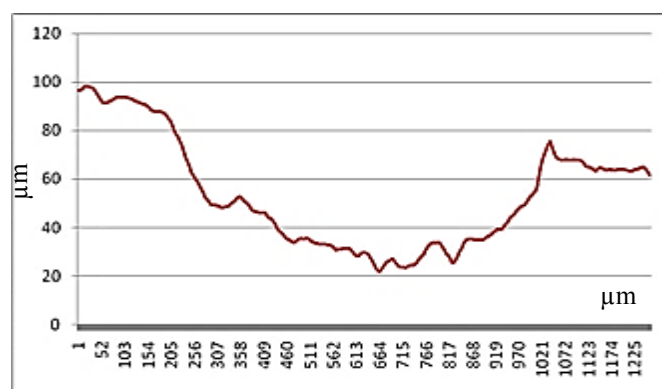
Należy stwierdzić, że w celu uzyskania korzystnych cech struktury geometrycznej powierzchni podczas stopowania należałoby, w końcowej fazie procesu, zastosować niższe parametry elektryczne zasilania – niższe napięcie oraz mniejsze wartości pojemności kondensatora generatora RC, a zatem niższe energie pojedynczych wyładowań.

W celu dokonania oceny skutków oddziaływań wyładowań elektrycznych na powierzchnię obrabianą poddano obserwacji mikroskopowej pojedyncze kratery. Na rys. 4.21 do rys. 4.25 przedstawiono przykładowe obrazy 2D oraz 3D topografii powierzchni powstałe w wyniku pojedynczych wyładowań.

Na rys. 4.21 przedstawiono przykładową fotografię krateru erozyjnego (a) wykonaną z wykorzystaniem techniki mikroskopii świetlnej na mikroskopie Nikon Eclipse MA200 oraz rozkład rzędnych profilu przebiegający wzdłuż jego osi (b). W przedstawionym przypadku krater uzyskano przy pomocy elektrody pręcikowej o średnicy $d = 0,3 \text{ mm}$ dla wartości napięcia $U = 10 \text{ V}$.



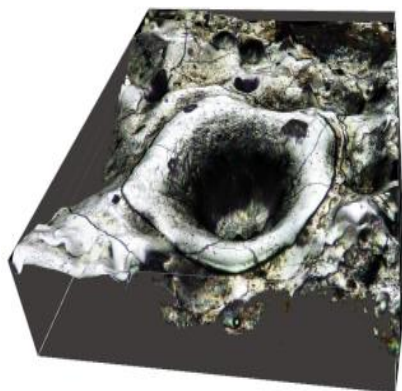
a)



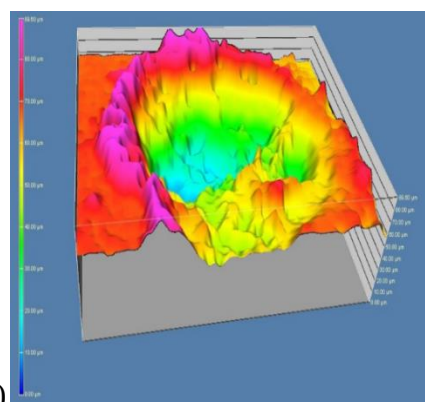
b)

Rys. 4.21. Mikrofotografia krateru – a) i rozkład rzędnych profilu krateru erozyjnego – b), napięcie $U = 10$ V, średnica elektrody $d = 0,3$ mm, mikroskop świetlny Nikon Eclipse MA200

Na rys. 4.22 przedstawiono przykładową fotografię krateru erozyjnego (a) wykonaną z wykorzystaniem techniki mikroskopii świetlnej na mikroskopie Nikon Eclipse MA200 oraz mapę wysokościową krateru (b). W przedstawionym przypadku krater uzyskano przy pomocy elektrody pręcikowej o średnicy $d = 0,3$ mm dla wartości napięcia $U = 10$ V.

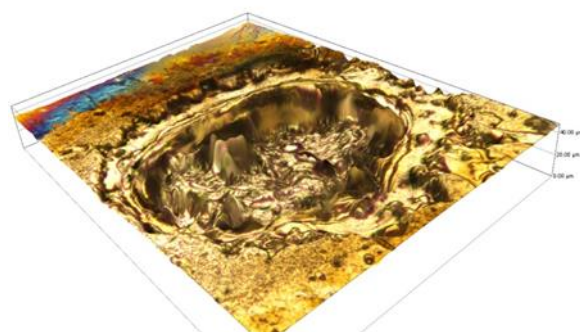


a)

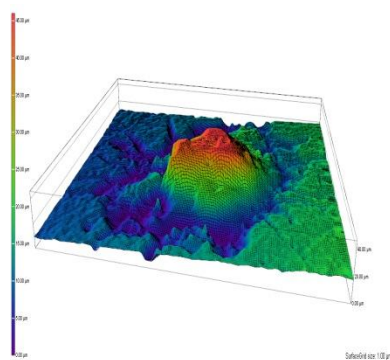


b)

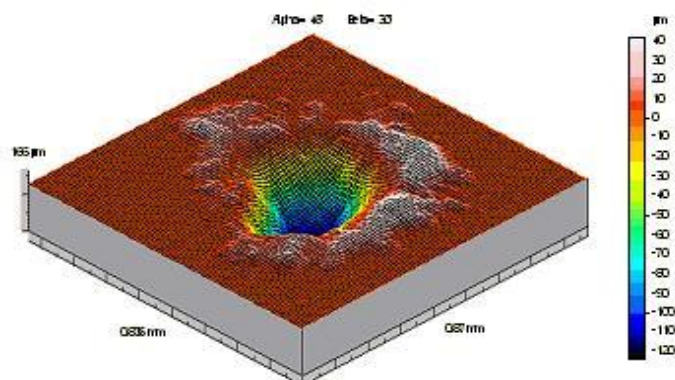
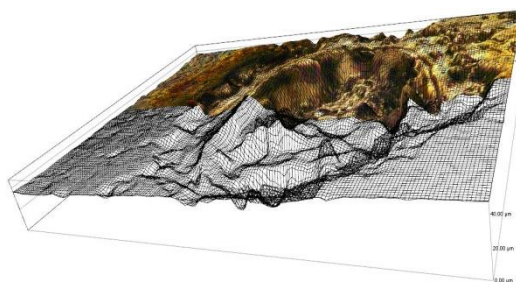
Rys. 4.22. Mikrofotografie: a) krateru – efektu pojedynczego wyładowania, b) przykładowa mapa wysokościowa krateru, napięcie $U = 10$ V, średnica elektrody $d = 0,3$ mm, mikroskop świetlny Nikon Eclipse MA200, pow. 200x



Rys. 4.23. Obraz przestrzenny krateru – efekt pojedynczego wyładowania, napięcie $U = 8\text{ V}$, średnica elektrody $d = 0,3\text{ mm}$



Rys. 4.24. Obraz przestrzenny krateru – efekt pojedynczego wyładowania, napięcie $U = 8\text{ V}$, średnica elektrody $d = 0,3\text{ mm}$



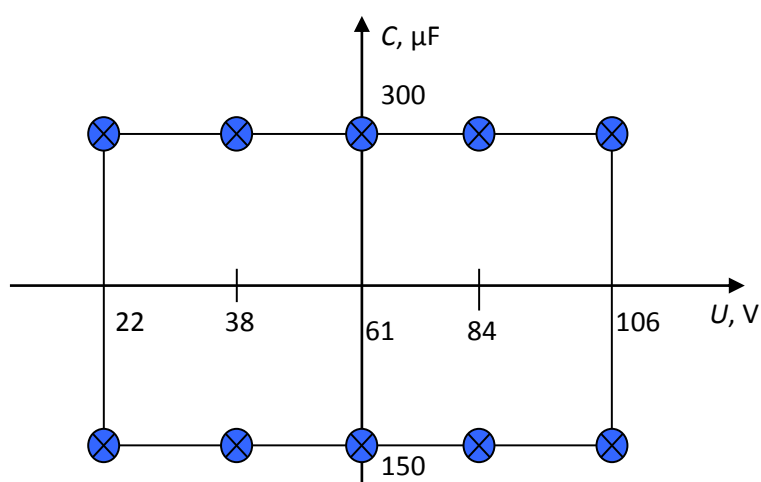
Rys. 4.25. Obraz 3D powierzchni stopowanej – przykładowe widoki pojedynczych kraterów, napięcie $U = 8\text{ V}$, średnica elektrody $d = 0,3\text{ mm}$

Badania stopowania elektroiskrowego elektrodą pręcikową-drgającą SWA

W celu określenia związków ilościowych pomiędzy parametrami elektrycznymi stopowania oraz efektami technologicznymi procesu przeprowadzone zostały badania z wykorzystaniem stanowiska do stopowania elektrodą drgającą z wykorzystaniem generatora RC. Parametry pracy generatora zmieniano poprzez zadawanie nastaw regulacyjnych urządzenia:

- wartości pojemności kondensatora (skokowo w zakresie 150 μF , 300 μF),
- wartości napięcia zasilającego układ RC (skokowo w zakresie 22 – 106 V).

Rozmieszczenie wartości kodowych czynników wejściowych przedstawiono w formie graficznej (rys. 4.26).



Rys. 4.26. Schemat planu eksperymentalnego – przyjęte wartości napięcia U oraz pojemności kondensatora C

Do badań, jako podłoża, użyto próbek ze stali C45 w stanie ulepszonym cieplnie. Wyboru materiału dokonano na podstawie oceny właściwości mechanicznych analizowanego materiału, pod kątem możliwości jego wykorzystania na elementy konstrukcyjne maszyn, po naniesieniu powłok uszlachetniających. Skład chemiczny stali podano w tabela 9.

Tabela 9. Skład chemiczny stali C45

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	inne
0,42 – 0,50	0,50 – 0,80	Max 0,40	Max 0,045	Max 0,045	Max 0,40	Max 0,40	Max 0,10	Cr+Mo+Ni max 0,63

Przed nakładaniem powłok powierzchnie próbek poddano szlifowaniu, tak by podłoże miało chropowatość $Ra = 0,32 \mu\text{m}$. Jako materiał elektrody roboczej (stopującej) zastosowano węgiel wolframu (WC). Próbki poddano stopowaniu w czasie wynoszącym 1 min.

Zestawienie parametrów wejściowych eksperymentu zawiera tabela 10.

Tabela 10. Zestawienie parametrów wejściowych eksperymentu

L.p.	Napięcie U , V	Pojemność kondensatora C , μF
1	22	150
2	38	150
3	61	150
4	84	150
5	106	150
6	22	300
7	38	300
8	61	300
9	84	300
10	106	300

Kolejnym etapem badań była ocena możliwości poprawy efektywności nanoszenia powłok poprzez wielokrotne ich nakładanie. W procesie wielowarstwowego nanoszenia powłok w trakcie nakładania kolejnych warstw zmieniają się warunki stopowania. Zmianie ulegają właściwości fizyczne i chemiczne kolejnych nakładanych warstw, takie jak:

- chropowatość powierzchni,
- skład chemiczny,
- rezystancja warstw powierzchniowych,
- stan utlenienia itp.

Czynniki te mogą w istotny sposób wpływać na warunki inicjowania wyładowań między elektrodami oraz na zmianę warunków nanoszenia kolejnych warstw. W celu określenia wpływu warunków nanoszenia powłok wielowarstwowch, przeprowadzono kolejny eksperyment polegający na nanoszeniu 3-5 warstw. Istotą eksperymentu było sprawdzenie wpływu w ten sposób prowadzonego procesu na konstytuowanie WW, a w szczególności uzyskanie odpowiedzi na pytanie czy prowadzony w ten sposób proces może spowodować zwiększenie efektywności przenoszenia masy pomiędzy materiałem elektrody stopującej i podłożem, ponadto dokonanie oceny stanu spójności warstwy wierzchniej (możliwość niwelowania mikropęknięć) oraz poprawienie cech struktury geometrycznej powierzchni.

Badania przeprowadzono dla dwóch ustalonych wartości pojemności kondensatorów C 150 μF i 300 μF . Czynnikiem zmiennym była wartość przyłożonego napięcia U . Każdą z warstw nakładano przez 1 minutę z zastosowaniem tych samych parametrów kinematycznych (prędkość posuwu). Dla każdej kolejnej nanoszonej warstwy zmieniano wartość napięcia przy czym stosowano sekwencje, w których następował wzrost napięcia dla kolejnych nakładanych warstw. W kolejnym pakiecie badań zastosowano sekwencje, w których obniżano napięcie ładowania kondensatorów od wartości maksymalnej do minimalnej dla zasilacza. Kombinacje parametrów wejściowych nanoszenia powłok przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11. Program badań eksperymentalnych przy nakładaniu wielu warstw

L.p.	Napięcie U , V	Pojemność kondensatora C , μF	Ilość naniesionych warstw
1	22, 61, 106	150 μF	3
2	22, 38, 61, 84, 106	150 μF	5
3	22, 61, 106	300 μF	3
4	22, 38, 61, 84, 106	300 μF	5
5	106, 84, 61, 38	150 μF	4
6	106, 84, 61, 38	300 μF	4

Po wykonaniu stopowania próbki poddano następującym badaniom WW:

- określono przyrost masy próbek,
- dokonano pomiaru parametrów struktury geometrycznej powierzchni,
- dokonano pomiaru grubości warstwy mikronapoiiny (warstwa przetopiona) oraz strefy wpływów cieplnych (SWC),
- dokonano pomiaru rozkładu mikrotwardości μHV na zglądach poprzecznych próbek,
- wykonano fotografie mikrostruktury metalograficznej modyfikowanych warstw.

4.3.3. Wyniki badań eksperymentalnych stopowania elektrodą pręcikową drgającą

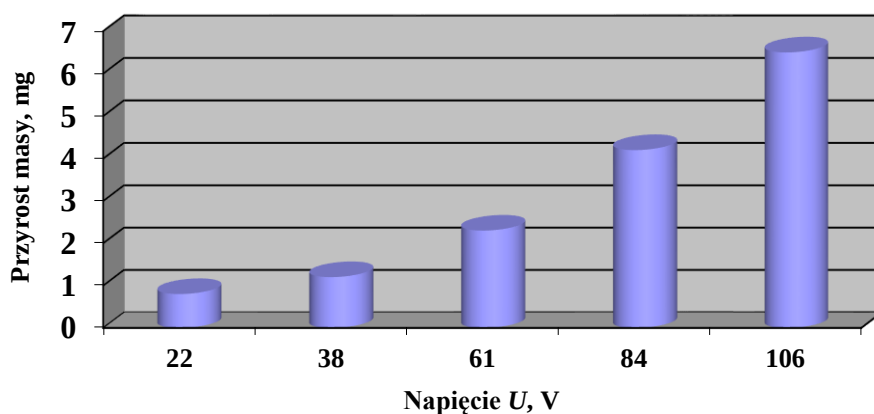
Badania przyrostu masy

Wszystkie próbki zważono na wadze laboratoryjnej. W tabeli 12, tabela 13, tabela 14, tabela 15 zestawiono wyniki pomiaru przyrostu masy dla prób nanoszenia pojedynczej war-

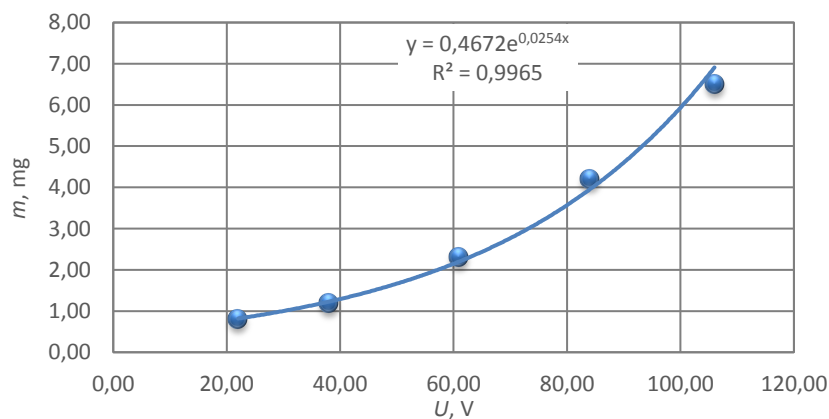
stwy, jak również dla przypadków nakładania wielu warstw na siebie. Takie zestawienie wyników przyrostu masy daje nam możliwość bezpośredniego porównania efektów modyfikacji warstw powierzchniowych. Graficzną interpretację wyników przedstawiono na rys. 4.27 do rys. 4.32.

Tabela 12. Wyniki pomiaru przyrostu masy próbek dla elektrody z węgla wolframu (WC). Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, czas obróbki 1 min

L.p.	Napięcie U , V	Natężenie prądu I , A	Przyrost masy Δm , mg
1	22	0,6	0,8
2	38	1,4	1,2
3	61	1,8	2,3
4	84	2,5	4,2
5	106	3,0	6,5



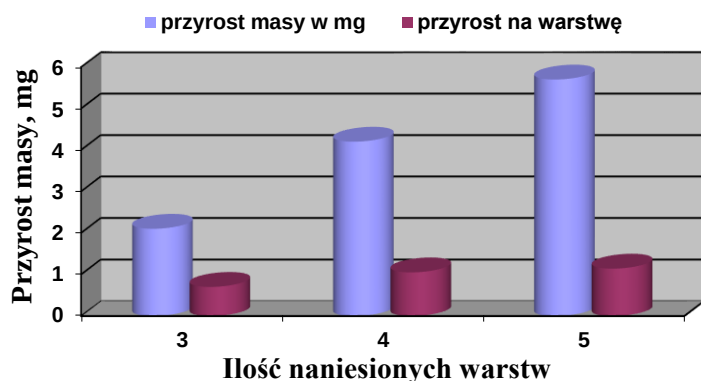
Rys. 4.27. Zależność przyrostu masy próbek w funkcji zmiany wartości napięcia po stopowaniu elektrodą z węgla wolframu (WC). Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze,



Rys. 4.28. Wyniki analizy regresji przyrostu masy próbki w funkcji wartości napięcia. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, medium obróbcze – powietrze, czas obróbki 1 min

Tabela 13. Wyniki pomiaru przyrostu masy próbek dla elektrody z węgliku wolframu (WC). Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$. Zmiana wartości napięcia. Ilość warstw -3, -4, -5

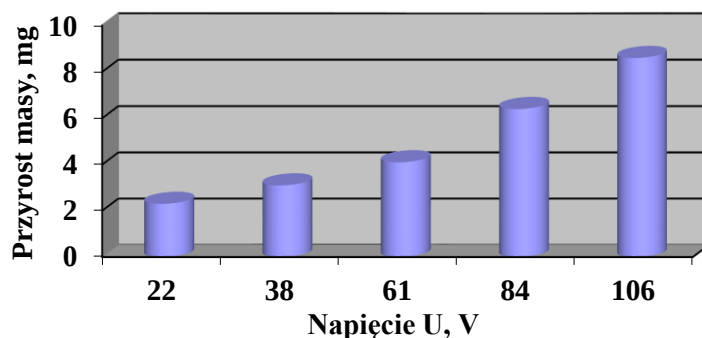
L.p.	Napięcie U , V	Natężenie prądu I , A	Przyrost masy Δm , mg	Ilość naniesionych warstw
1	22, 61, 106	1	2,1	3
2	106, 84, 61, 38	3 – 1	4,2	4
3	22, 38, 61, 84, 106	2	5,7	5



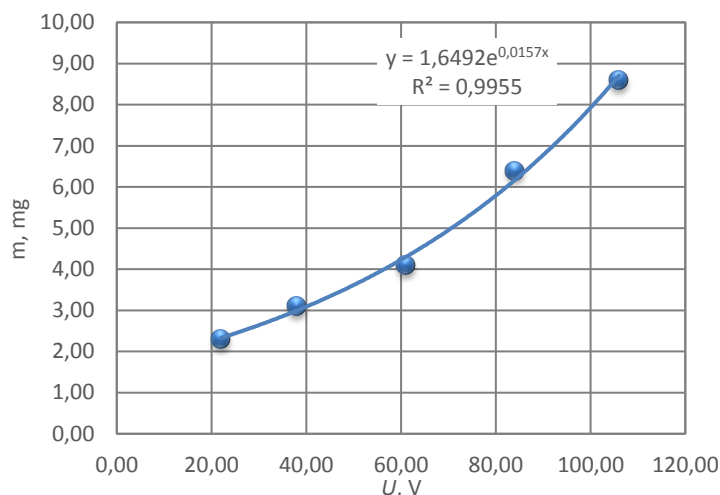
Rys. 4.29. Zależność przyrostu masy próbek oraz średni przyrost masy przypadający na pojedynczą nakładaną warstwę. Nastawy generatora: wartości napięcia 22–106 V, pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$. Pozostałe warunki obróbki: elektroda robocza – węglik wolframu (WC), ilość warstw nanoszonych - 3, - 4, - 5, czas nanoszenia jednej warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze.

Tabela 14. Wyniki pomiaru przyrostu masy próbek dla elektrody z węgliku wolframu (WC). Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$

L.p.	Napięcie U , V	Natężenie prądu I , A	Przyrost masy Δm , mg
1	22	0,6	2,3
2	38	1,4	3,1
3	61	2,0	4,1
4	84	3,0	6,4
5	106	3,5	8,6



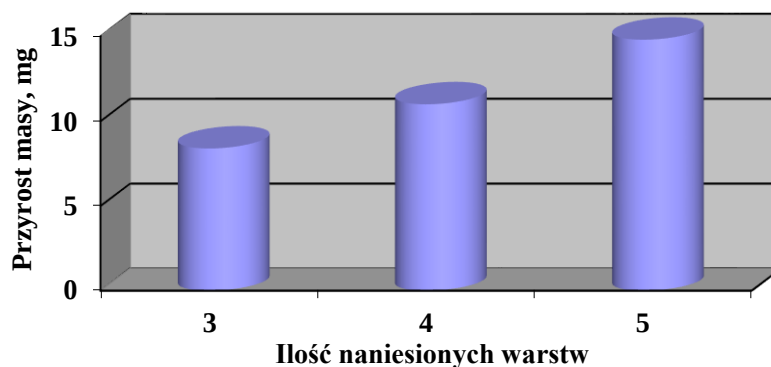
Rys. 4.30. Przyrost masy próbek w funkcji zmiany wartości napięcia po stopowaniu elektrodą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze,



Rys. 4.31. Wyniki analizy regresji przyrostu masy próbki w funkcji wartości napięcia. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze,

Tabela 15. Wyniki pomiaru przyrostu masy próbek Δm dla elektrody z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$, zmiana wartości napięcia, nakładanie kilku warstw

L.p.	Napięcie U, V	Natężenie prądu I, A	Przyrost masy $\Delta m, \text{mg}$	Ilość naniesionych warstw
1	22, 61, 106	2,1	8,4	3
2	106, 84, 61, 38	3,5 – 1	11,0	4
3	22, 38, 61, 84, 106	2,6	14,8	5

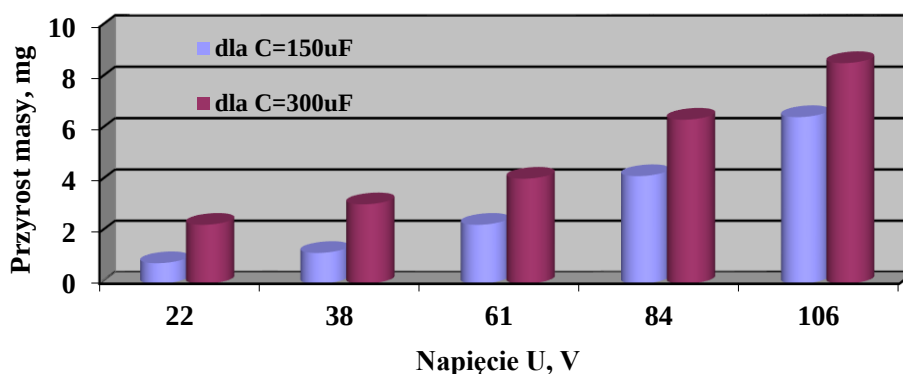


Rys. 4.32. Zależność przyrostu masy próbek oraz średni przyrost masy na pojedynczą nakładaną warstwę. Nastawy generatora: wartości napięcia 22–106 V, pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, rezystancja $R \approx 30 \Omega$. Pozostałe warunki obróbki: elektroda robocza – węgiel wolframu (WC), ilość warstw nanoszonych -3, -4, -5, czas nanoszenia jednej warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze

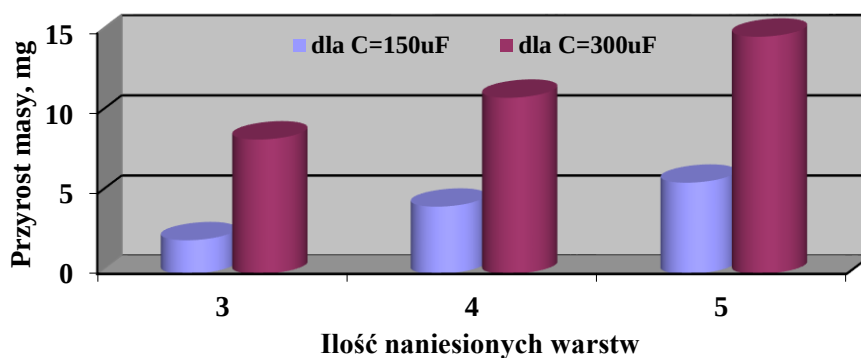
Porównanie przyrostu masy dla różnych wartości pojemności kondensatora

W celu dokonania oceny przyrostu masy dla różnych wartości pojemności kondensatora próbki zostały zważone przy pomocy wagi analitycznej.

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w formie wykresów na rys. 4.33 i rys. 4.34.



Rys. 4.33. Porównanie przyrostu masy próbek przy zmianie pojemności kondensatora $C=150\ \mu\text{F}$ i $300\ \mu\text{F}$



Rys. 4.34. Porównanie przyrostu masy próbek przy zmianie pojemności kondensatora $C = 150\ \mu\text{F}$ i $300\ \mu\text{F}$, przy -3, -4, -5 naniesionych warstwach

Wyniki badań wskazują, że w każdym przypadku występuje przyrost masy próbki (katody). Większy przyrost masy przedmiotu obrabianego nastąpił przy większej energii wyładowań, czyli proces transportu masy materiału anody na powierzchnię katody przebiegał zgodnie z przewidywaniami. Przy większej ilości przejść (nanoszenie kolejnych warstw) przyrost masy próbki jest nieznacznie mniejszy. Spowodowane jest to coraz trudniejszymi warunkami stopowania wynikającymi ze zmiany właściwości WW w wyniku modyfikacji powłok, które nastąpiły w przejściach poprzedzających. Głównymi czynnikami wpływającymi na zmianę warunków stopowania są:

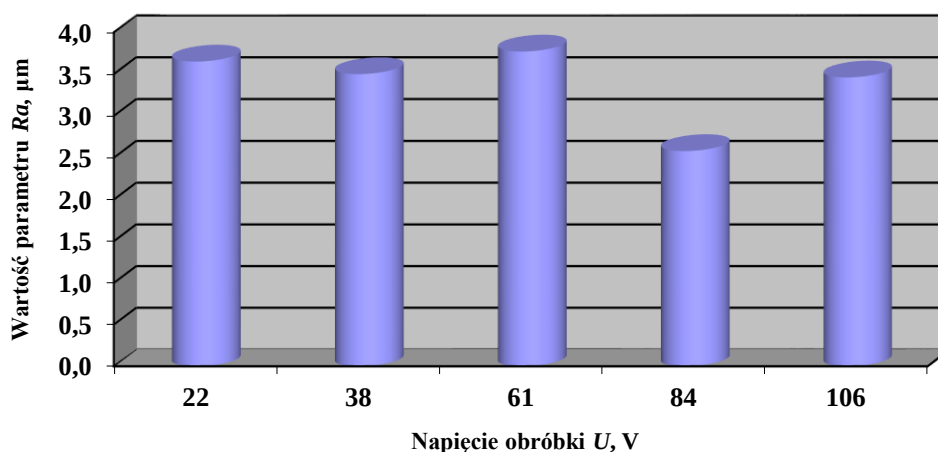
- utlenienie powierzchni,
- osadzanie składników rozkładu mediów obróbczych,
- zmiana składu chemicznego warstw powierzchniowych,
- zmiana temperatury topnienia.

Wyszczególnione powyżej warunki determinują pewną granicę możliwej do uzyskania grubości warstwy stopowanej, powyżej której proces stopowania staje się nieefektywny.

Pomiary chropowatości powierzchni

Tabela 16. Wartości parametru chropowatości R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze

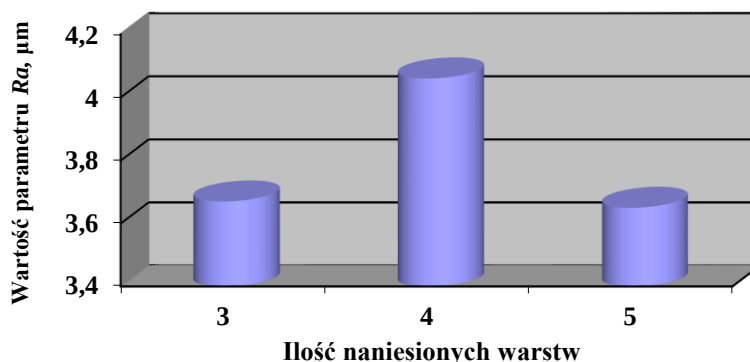
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U, V	$R_a, \mu\text{m}$	Ilość naniesionych warstw
1	22	3,65	1
2	38	3,50	1
3	61	3,77	1
4	84	2,58	1
5	106	3,46	1



Rys. 4.35. Wykres parametru chropowatości R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze

Tabela 17. Wartości parametru chropowatości R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, medium obróbcze – powietrze. Wielokrotne nanoszenie warstw przy zmianie wartości napięcia U

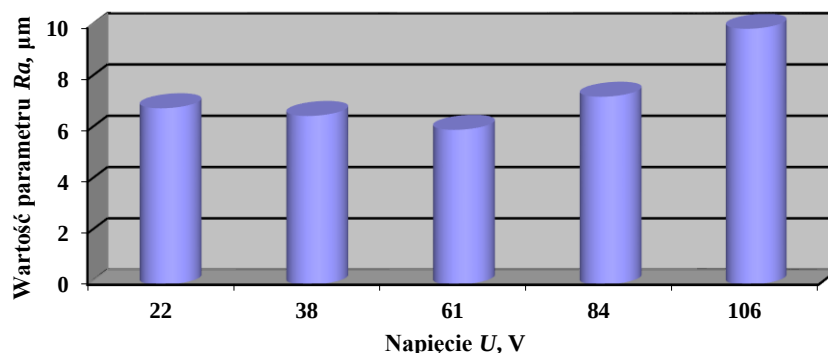
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U, V	$R_a, \mu\text{m}$	Ilość naniesionych warstw
1	22, 61, 106	3,67	3
2	106, 84, 61, 38	4,06	4
3	22, 38, 61, 84, 106	3,65	5



Rys. 4.36. Wykres parametru chropowatości Ra po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 150 \mu F$, medium obróbcze – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wielkości napięcia U

Tabela 18. Wartości parametru chropowatości Ra po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: skokowa zmiana napięcia $U = 22\text{--}106 \text{ V}$, pojemność kondensatora $C = 300 \mu F$, czas obróbki 1 min, ilość nałożonych warstw 1

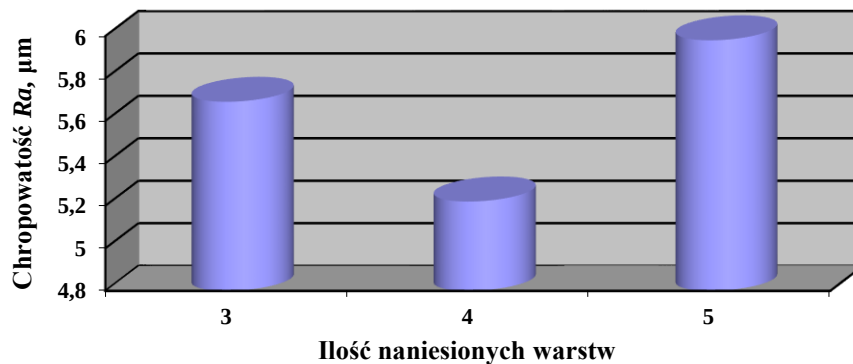
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U , V	Ra , μm
1	22	6,88
2	38	6,58
3	61	6,04
4	84	7,33
5	106	9,98



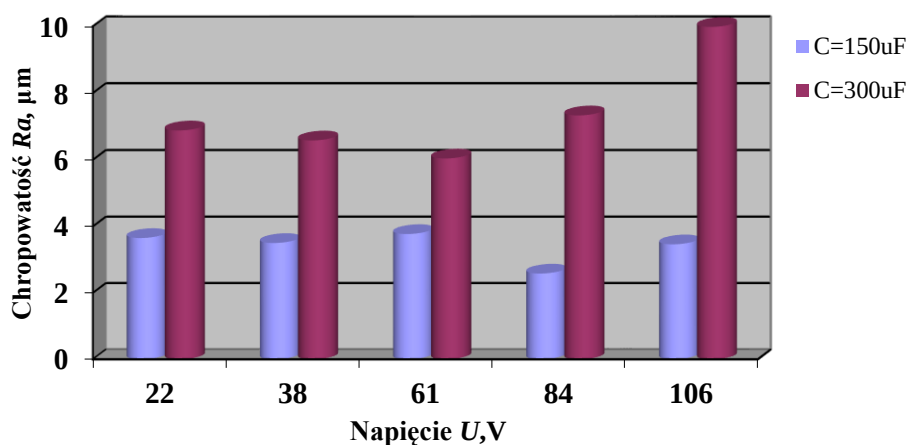
Rys. 4.37. Wykres parametru chropowatości Ra po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: skokowa zmiana napięcia, pojemność kondensatora $C = 300 \mu F$, czas obróbki 1 min, medium obróbcze – powietrze

Tabela 19. Wartości parametru chropowatości Ra po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu F$, medium obróbcze – powietrze. Wielokrotne nanoszenie warstw przy zmianie wartości napięcia U

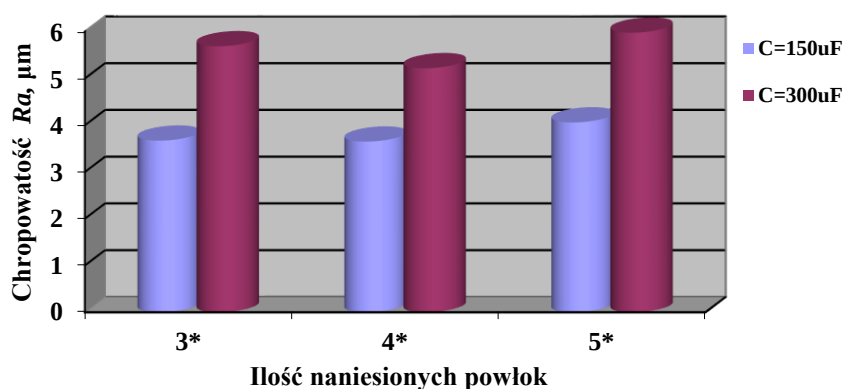
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U , V	Ra , μm	Ilość naniesionych warstw
1	22, 61, 106	5,69	3
2	106, 84, 61, 38	5,22	4
3	22, 38, 61, 84, 106	5,98	5



Rys. 4.38. Wykres parametru chropowości R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$, medium obróbcze – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wartości napięcia U



Rys. 4.39. Porównanie parametru chropowości powierzchni R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC dla różnych wartości napięcia U i pojemności kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$ i $300 \mu\text{F}$



Rys. 4.40. Porównanie parametru chropowości R_a po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC. Parametry procesu: pojemności kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$ i $300 \mu\text{F}$. Wielokrotne nakładanie powłok (-3, -4, -5) przy zmianie wartości napięcia U

Wyniki pomiarów chropowości wskazują, że większe wartości R_a uzyskiwane są przy zwiększonej pojemności kondensatora. Związane jest to z większą energią wyładowań.

Energię zmagazynowaną w naładowanym kondensatorze można wyrazić zależnością (4.5):

$$W_c = \frac{1}{2} C U^2 \quad (4.5)$$

gdzie:

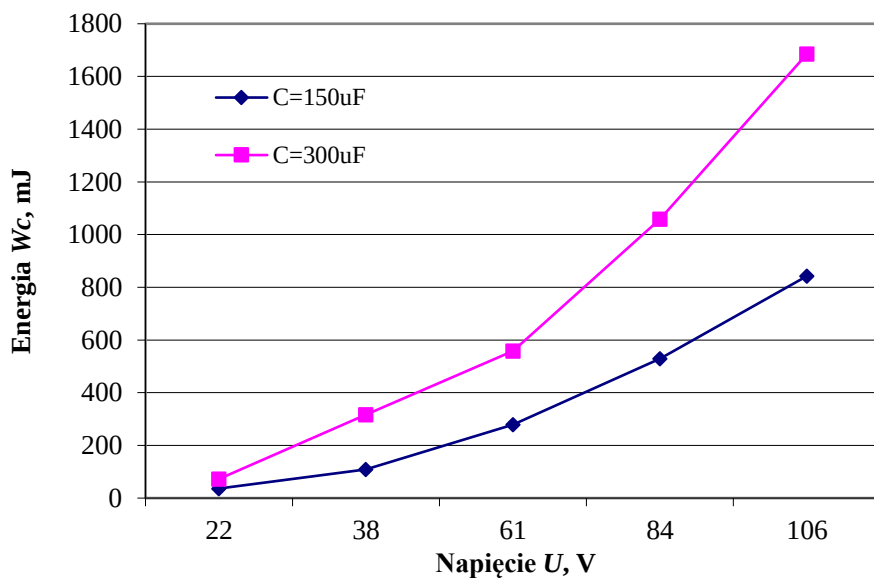
C – pojemność kondensatora,

U – napięcie uzyskane między okładkami kondensatora.

Na tej podstawie możemy wyznaczyć energię przekazywaną do elektrod dla $C = 150\mu\text{F}$ i $300\mu\text{F}$. Wyniki przedstawiono w tabeli 20.

Tabela 20. Wartość energii dostarczonej do elektrod dla pojemności kondensatora $C = 150\mu\text{F}$ i $300\mu\text{F}$

$C = 150\mu\text{F}$		$C = 300\mu\text{F}$	
U, V	W_c, mJ	U, V	W_c, mJ
22	36,3	22	72,6
38	108,3	38	216,6
61	279,075	61	558,15
84	529,2	84	1058,4
106	842,7	106	1685,4



Rys. 4.41. Porównanie wartości energii dostarczonej do elektrod dla pojemności kondensatora $C = 150\mu\text{F}$ i $300\mu\text{F}$

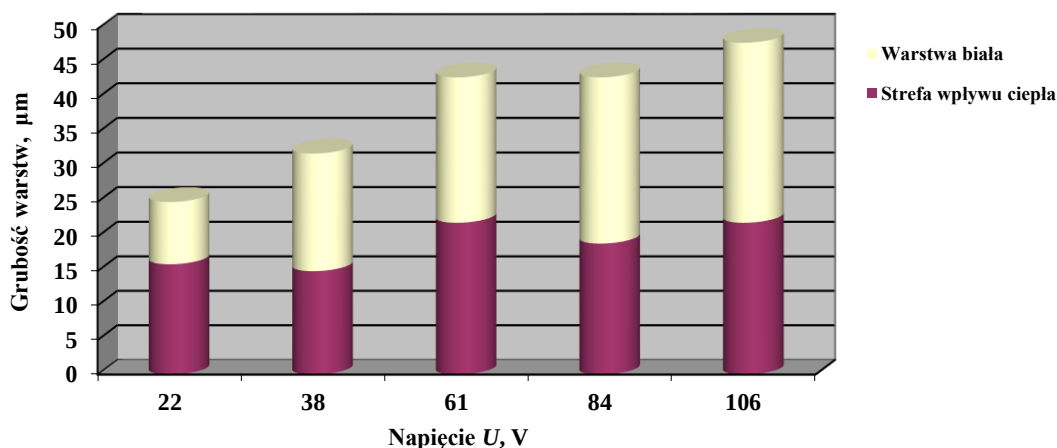
Pomiar grubości warstwy mikronapoinowanej oraz strefy wpływów cieplnych

Badania grubości warstwy mikronapoinowanej oraz strefy wpływów cieplnych przeprowadzono dla zakresu napięć 22–106 V oraz pojemności kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$ i $300 \mu\text{F}$. Czas nakładania jednej warstwy wynosił 1 minutę. Medium obróbcze stanowiło powietrze. Przeprowadzono próby nakładania pojedynczych warstw oraz kilku warstw przy różnych kombinacjach parametrów.

Szczegółowe zestawienia warunków przeprowadzonych prób oraz uzyskane wyniki pomiarów dotyczące grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła zamieszczono w tabelach 21 do 24.

Tabela 21. Wartości grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła po stopowaniu elektrodą przecikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Czas trwania obróbki 1 min. Pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

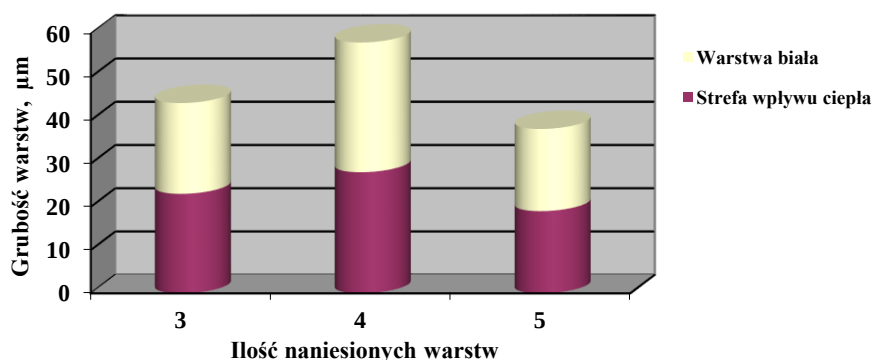
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U , V	Grubość warstwy białej, μm	Grubość strefy wpływu ciepła, μm
1	22	9	16
2	38	17	15
3	61	21	22
4	84	24	19
5	106	26	22



Rys. 4.42. Wykres grubości warstwy białej i strefy wpływów cieplnych (SWC) po stopowaniu elektrodą przecikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Czas trwania obróbki 1 min. Pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

Tabela 22. Wartości grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wartości napięcia U . Pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

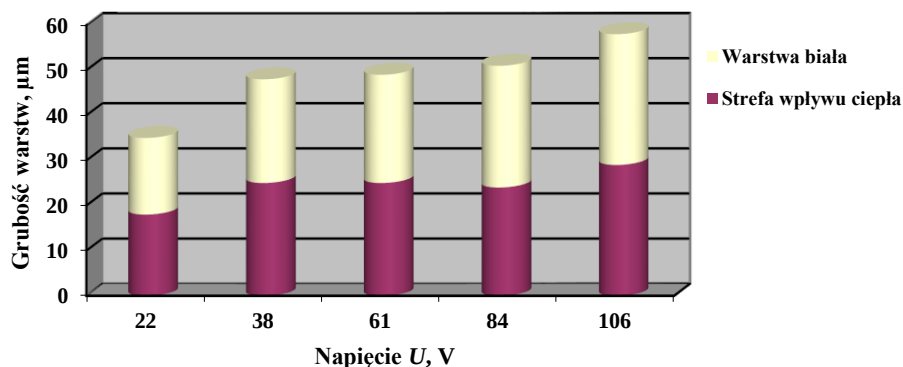
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U , V	Ilość naniesionych warstw	Grubość warstwy białej, μm	Grubość strefy wpływu ciepła, μm
1	22, 61, 106	3	21	23
2	106, 84, 61, 38	4	30	28
3	22, 38, 61, 84, 106	5	19	19



Rys. 4.43. Wykres grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła (SWC) po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wartości napięcia U . Pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

Tabela 23. Wartości grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Czas trwania obróbki 1 min. Pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$

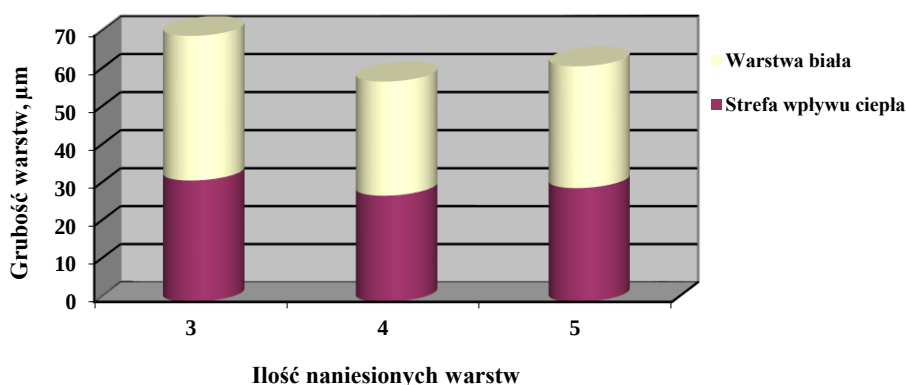
L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U , V	Grubość warstwy białej μm	Grubość strefy wpływu ciepła μm
1	22	17	18
2	38	23	25
3	61	24	25
4	84	27	24
5	106	29	29



Rys. 4.44. Grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła (SWC) po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Czas trwania obróbki 1 min. Pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$

Tabela 24. Wartości grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wartości napięcia U . Pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$

L.p.	Napięcie międzyelektrodowe U, V	Ilość naniesionych warstw	Grubość warstwy białej μm	Grubość strefy wpływu ciepła μm
1	22, 61, 106	3	38	32
2	106, 84, 61, 38	4	30	28
3	22, 38, 61, 84, 106	5	32	30



Rys. 4.45. Wykres grubości warstwy białej i strefy wpływu ciepła (SWC) po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC bez atmosfery ochronnej – powietrze. Wielokrotne nakładanie powłok przy zmianie wartości napięcia U . Pojemność kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$

Interpretacja wyników badań grubości poszczególnych warstw dla różnych warunków stopowania potwierdza wcześniejsze analizy, że wraz z większą wartością energii wyładowania zwiększa się grubość warstwy stopowanej. Dodatkowym czynnikiem powodującym zwiększenie grubości nakładanych powłok, mającym znaczący wpływ, jest ilość nanoszonych warstw, lecz zbyt duża ilość przejść nie powoduje proporcjonalnego przyrostu grubości, a pogarsza właściwości warstwy stopowanej i przyczynia się do powstawania licznych pęknięć.

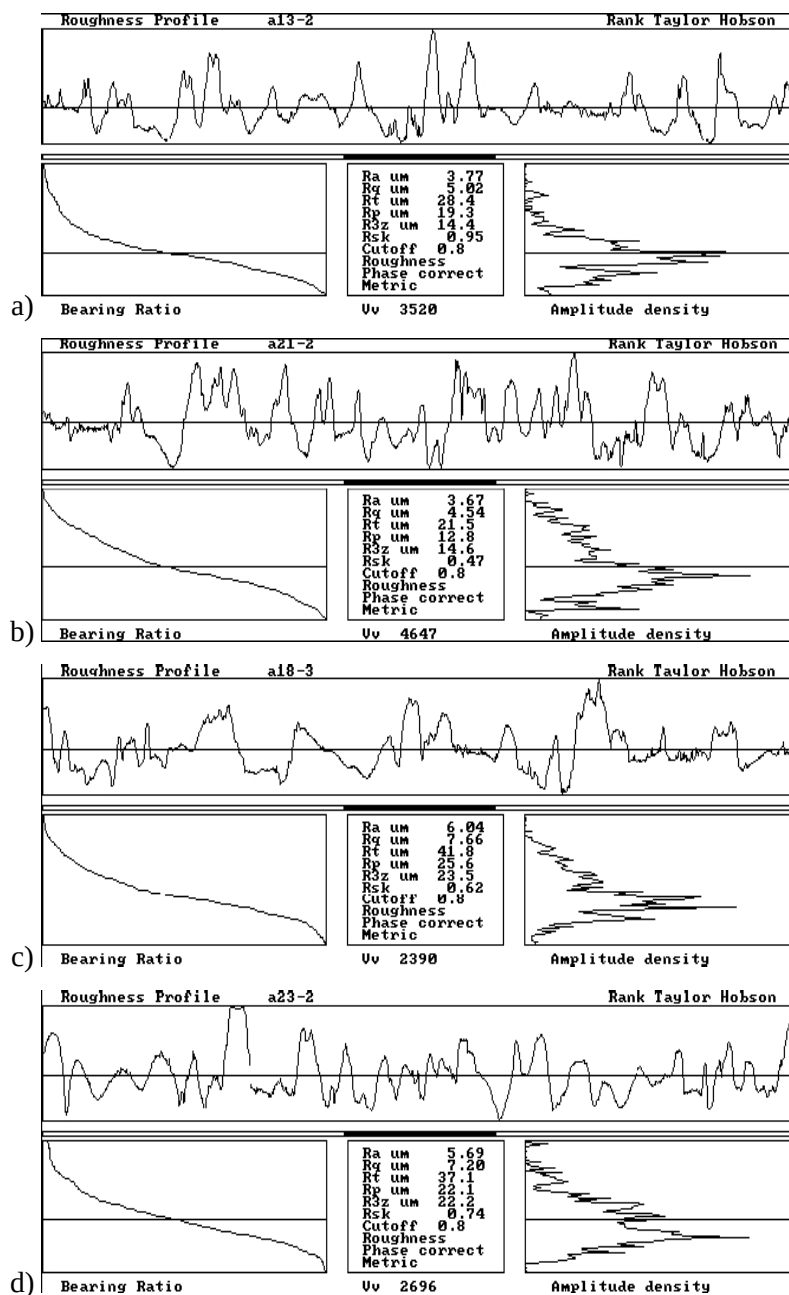
Porównano strategie stopowania dla warunków ze wzrostem wartości napięcia lub jego obniżaniem przy nanoszeniu poszczególnych warstw. W przypadku prowadzenia procesu według drugiej z zaproponowanych strategii uzyskuje się zadowalające grubości warstw stopowanych, mniejszą grubość strefy wpływu ciepła przy równoczesnym zwiększeniu gładkości powierzchni (obniżeniu parametru R_a) w odniesieniu do pierwszej strategii.

W procesie stopowania głównym czynnikiem powodującym formowanie struktury geometrycznej powierzchni jest oddziaływanie wyładowań elektrycznych i towarzyszące im powstawanie kraterów. Dodatkowym czynnikiem kształtującym SGP podczas stopowania

z zastosowaniem elektrody drgającej jest jej oddziaływanie mechaniczne na stopowaną powierzchnię.

Podczas badań chropowatości powierzchni przyjęto odcinek pomiarowy o długości 0,8 mm. Poniższe wykresy przedstawiają profilogramy powierzchni próbek obrobionych charakterystycznymi parametrami z eksperymentu planowanego.

Przykładowe wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni (SGP) po stopowaniu elektroiskrowym przedstawiono na rysunku (rys. 4.46).



Rys. 4.46. Przykładowe profilogramy powierzchni stopowanych próbek elektrodą przecikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu (WC). Parametry obróbki odpowiednio dla: a) 61V/150μF b), 106V/150μF, c) 61V/300μF, d) 106V/300μF, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze

W wyniku analizy przeprowadzonych badań stwierdzono, że parametry chropowatości zawierają się w granicach:

- dla pojemności kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$

$$Ra = 2,58 \mu\text{m} - 4,06 \mu\text{m};$$

$$Rp = 15,36 - 19,38 \mu\text{m};$$

$$Sm = 0,113 - 0,167 \text{ mm};$$

- dla pojemności kondensatora $C = 300 \mu\text{F}$

$$Ra = 3,21 - 4,02 \mu\text{m};$$

$$Rp = 17,96 - 20,08 \mu\text{m};$$

$$Sm = 0,149 - 0,161 \text{ mm}.$$

Dokonując szczegółowej analizy struktury geometrycznej powierzchni (profilu chropowatości) można zauważyć, że wraz ze wzrostem pojemności kondensatora w układzie generatora RC (a wraz z nim wzrostem energii wyładowań) wzrasta parametr Ra , natomiast pochylenia profilu w obu przypadkach mają zbliżone wartości. Świadczy to o podobieństwie geometrycznym kraterów powstałych w wyniku wyładowań.

W tabeli 25 zestawiono wartości poszczególnych parametrów Ra , Rq , Rt , Rp .

Tabela 25. Zestawienie wybranych współczynników określających jakość powierzchni

L.p.	Ra	Rq	Rt	Rp
1	5,69	7,20	37,1	22,10
2	9,98	12,48	59,2	30,70
3	6,04	7,66	41,8	25,60
4	3,67	4,54	21,5	12,80
5	3,86	5,38	30,3	21,50
6	3,77	5,02	28,4	19,30
7	3,54	4,94	25,7	18,60
8	2,58	3,74	24,6	15,36
9	3,48	4,58	22,6	12,00
10	4,06	5,62	28,1	18,42
11	3,22	4,53	29,7	18,54
12	3,72	4,86	25,9	18,97
13	4,03	4,95	26,4	18,52
14	4,12	5,24	28,1	18,32

Ra – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej;

Rt – całkowita wysokość profilu;

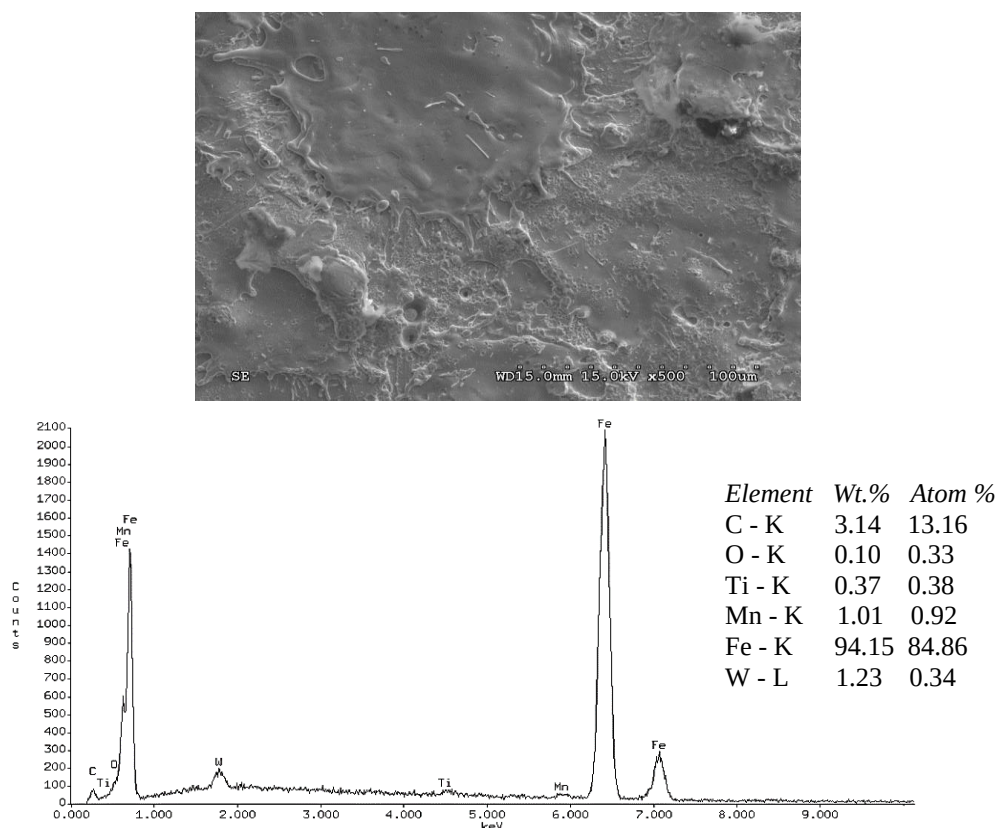
Rp – maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości (uśredniona);

Rq – średnie kwadratowe odchylenie profilu na odcinku elementarnym.

Wyniki badań składu chemicznego warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą

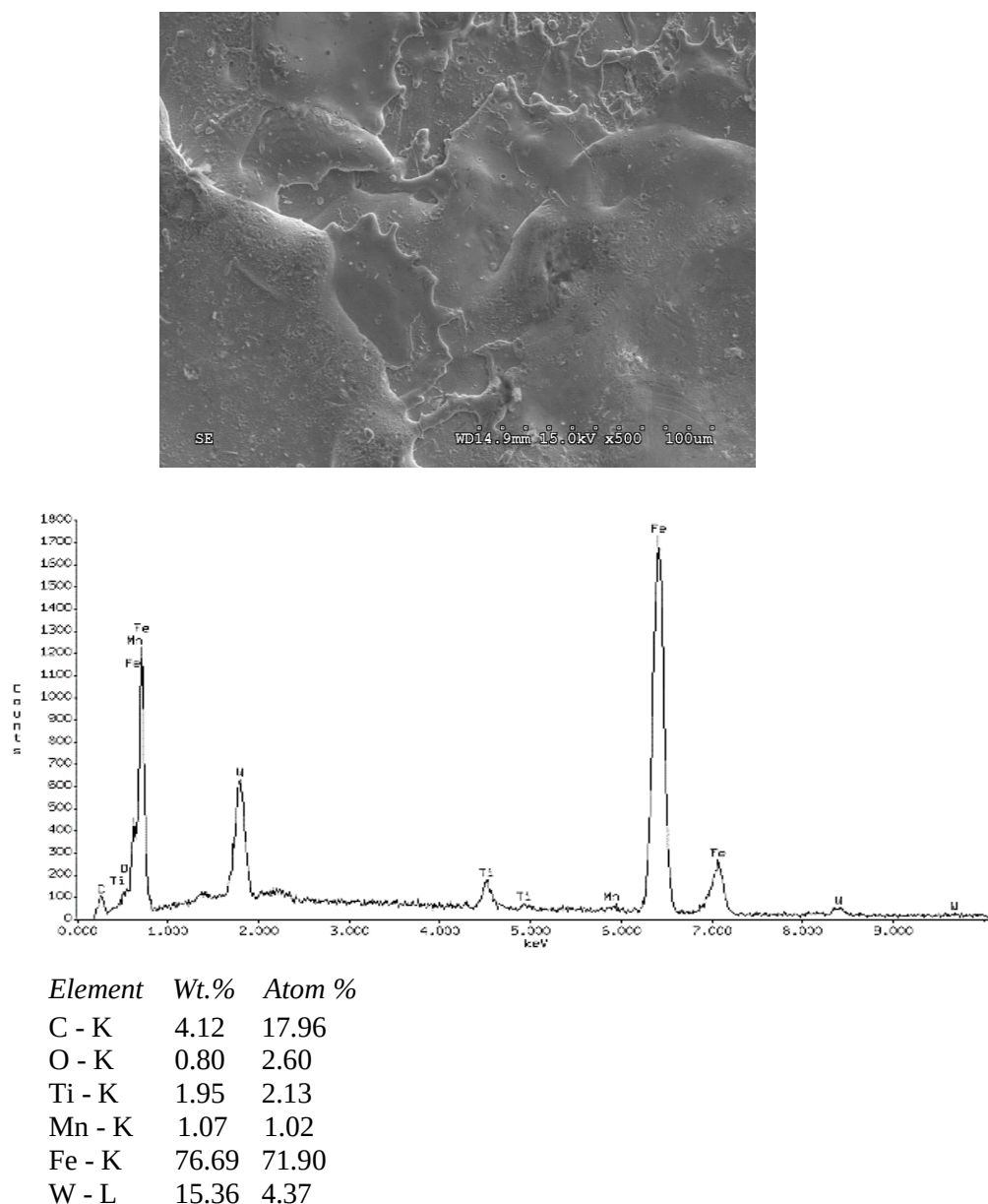
W celu dokonania oceny ilościowej składu chemicznego modyfikowanych powierzchni przeprowadzono przy pomocy mikrosondy rentgenowskiej EDS analizę punktową udziału poszczególnych pierwiastków w modyfikowanej warstwie. Badania przeprowadzono na powierzchniach badanych próbek. W ich wyniku otrzymano udziały masowe wybranych pierwiastków w warstwie powierzchniowej. Wyniki przeprowadzonych badań udokumentowano w formie fotografii powierzchni, rozkładu spektralnego pierwiastków, udziałów masowych oraz atomowych poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład warstwy stopowanej. Przykładowe fotografie i wykresy przedstawiono na rys. 4.47 – rys. 4.54.

Na rys. 4.47 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 22 \text{ V}$, pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



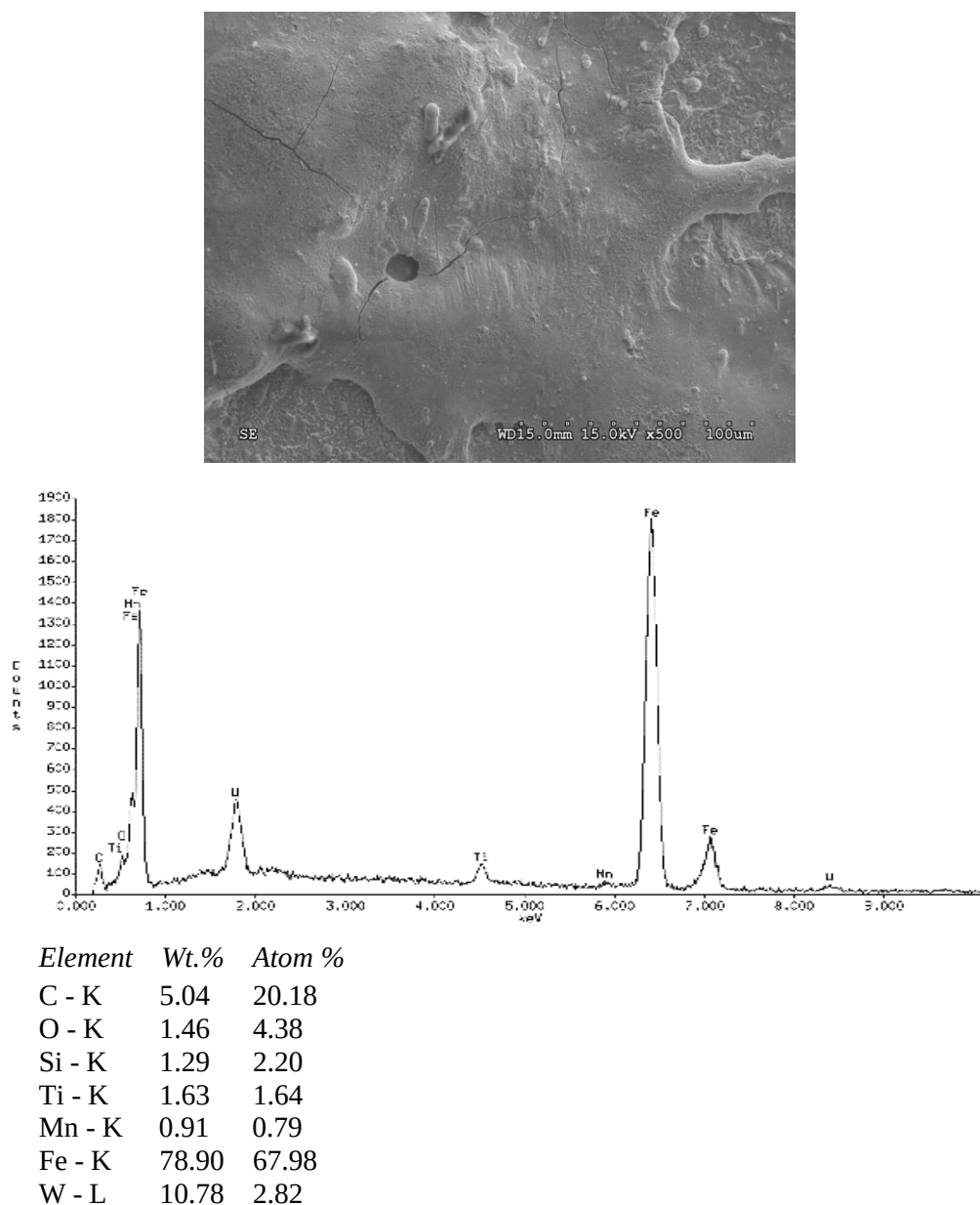
Rys. 4.47. Mikrofotografia skaningowa SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z WC, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 22 \text{ V}$, pojemność kondensatora $C = 150 \mu\text{F}$, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A11

Na rys. 4.48 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



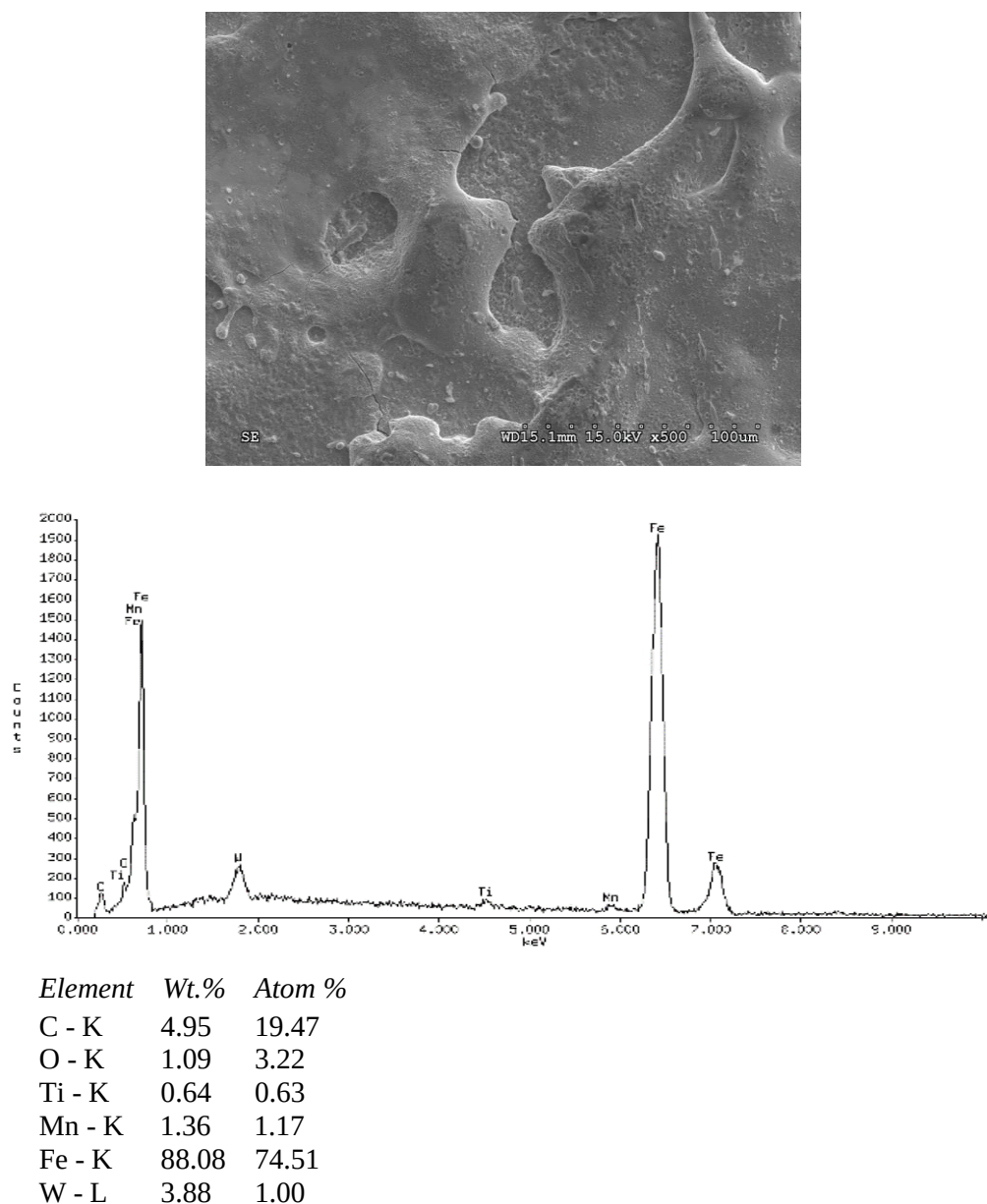
Rys. 4.48. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A12

Na rys. 4.49 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu z widocznymi wadami w postaci mikropęknięć oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



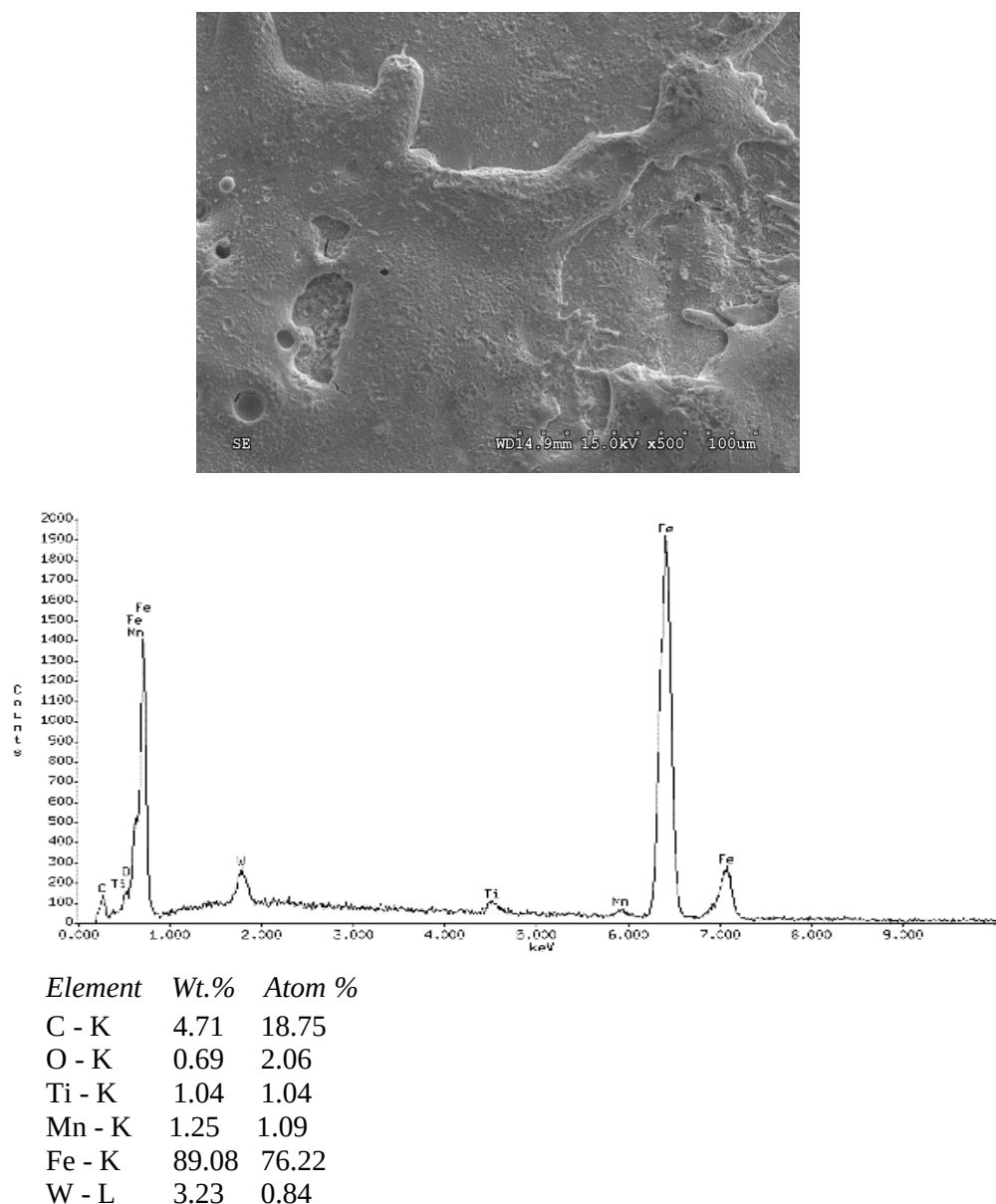
Rys. 4.49. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu z widocznymi wadami w postaci mikropęknięć, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A19

Na rys. 4.50 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu z widocznymi nielicznymi wadami w postaci mikropełnięć oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 106$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



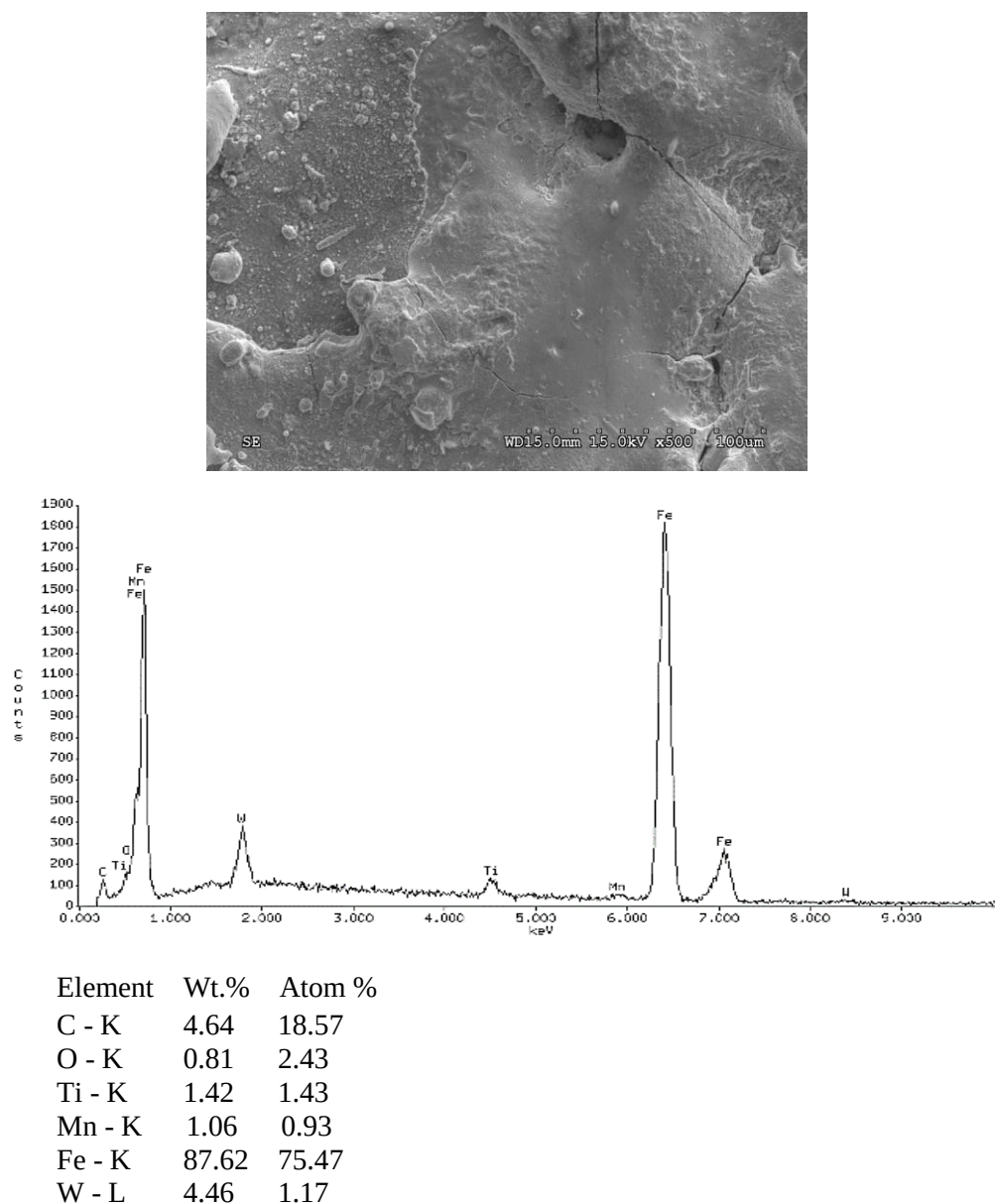
Rys. 4.50. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu z widocznymi nielicznymi wadami w postaci mikropełnięć, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 106$ V, pojemność kondensatora $C = 150$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A21

Na rys. 4.51 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 22$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



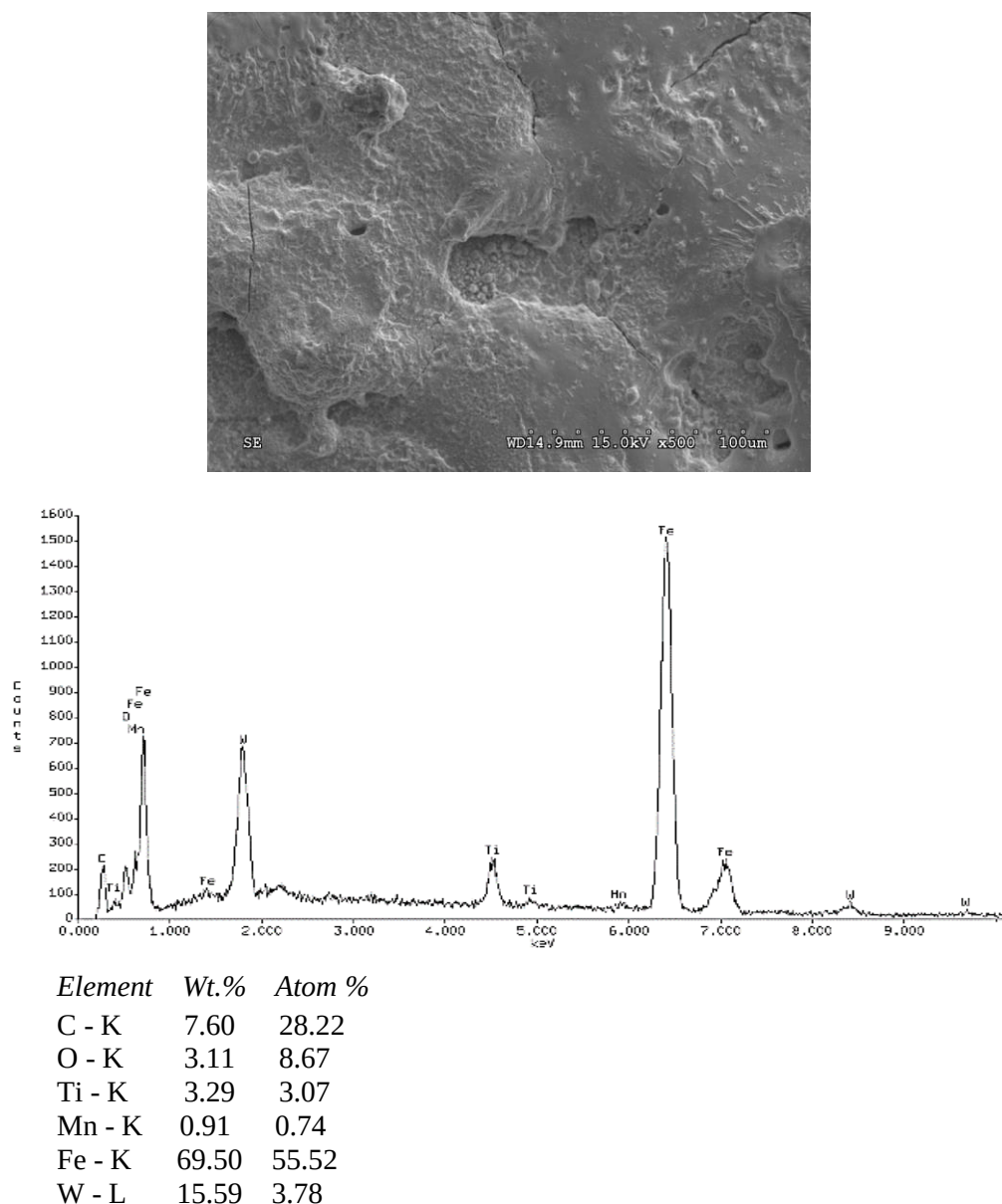
Rys. 4.51. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 22$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A22

Na rys. 4.52 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgliku wolframu oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



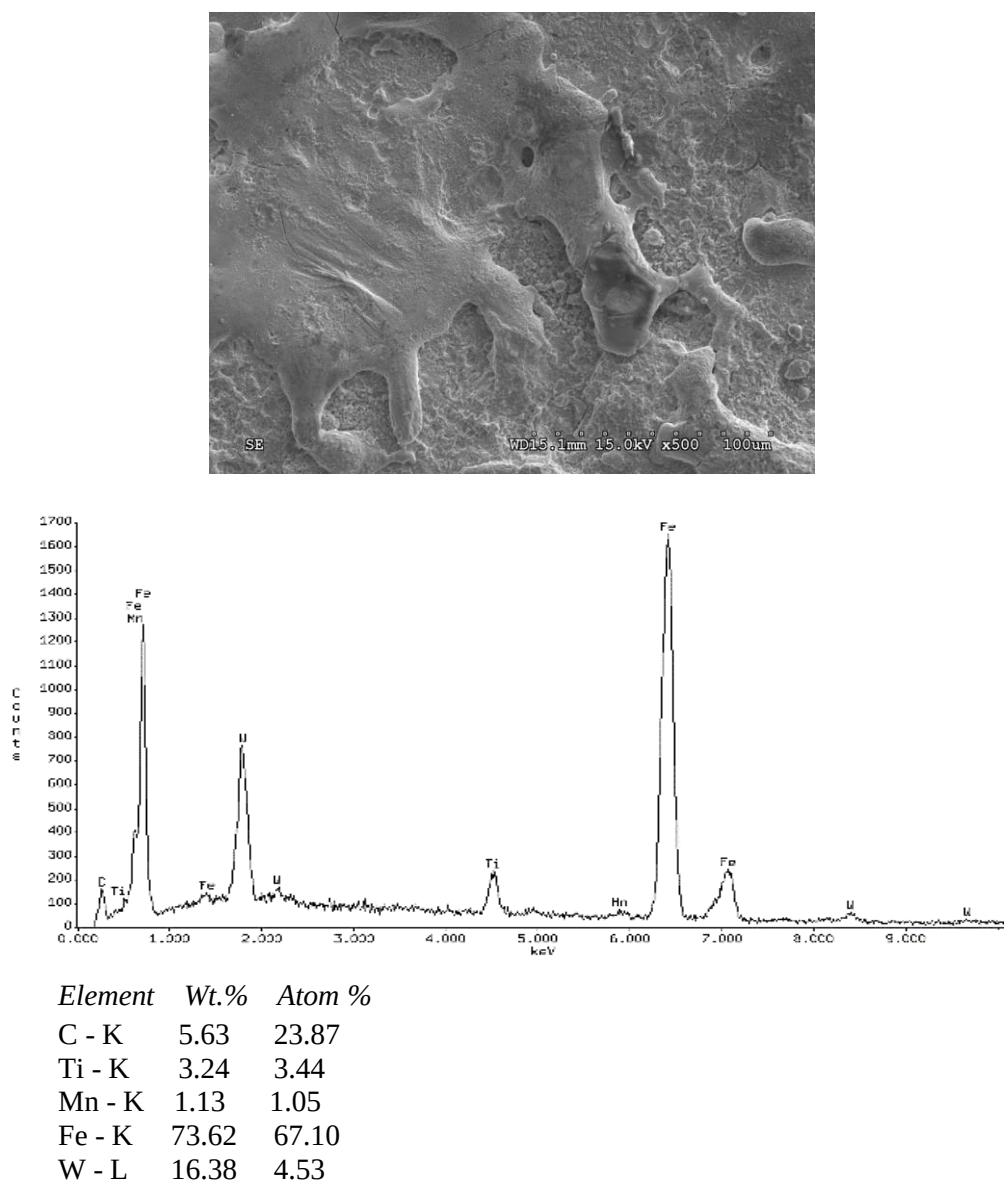
Rys. 4.52. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgliku wolframu z widocznymi nielicznymi wadami w postaci mikropęknięć, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 38$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A23

Na rys. 4.53 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu z widocznymi nielicznymi wadami w postaci mikropęknięć, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 61$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze.



Rys. 4.53. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu z widocznymi wadami w postaci mikropęknięć, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 61$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A24

Na rys. 4.54 przedstawiono mikrofotografię skaningową SEM powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą wykonaną z węgla wolframu z widocznymi nielicznymi wadami w postaci mikropęknięć oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Warunki obróbki: napięcie $U = 106$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość nanoszonych warstw - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, ośrodek międzyelektrodowy – powietrze.



Rys. 4.54. Mikrofotografia skaningowa SEM topografii powierzchni po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą z węgla wolframu, rozkład spektralny pierwiastków oraz wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego powierzchni. Powiększenie 500x. Warunki obróbki: napięcie $U = 106$ V, pojemność kondensatora $C = 300$ μ F, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A25

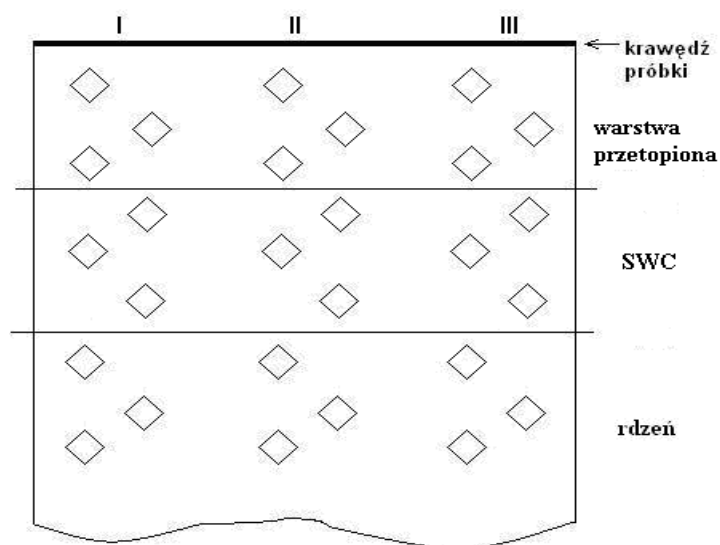
Analiza wyników badań składu chemicznego powierzchni, rozkładu spektralnego pierwiastków oraz udziałów masowych poszczególnych pierwiastków w warstwie modyfikowanej wskazuje na znaczące ich podwyższenie w odniesieniu do składu materiału rodzimego (podłoża). W przypadku zastosowania jako materiału elektrody roboczej węgla wolframu, udział masowy wolframu w stopowanej warstwie, dla właściwie dobranych warunków stopowania, osiąga wartość około 16 %. Zawartość węgla mieści się w przedziale od 3–7%.

Powierzchnia po stopowaniu jest regularna. W niektórych przypadkach powstają nieznaczne mikropęknięcia na powierzchni materiału.

Badania mikrotwardości

Zmiana składu chemicznego warstwy wierzchniej powoduje zmiany fazowe oraz mikrostrukturalne modyfikowanego materiału, w wyniku których zmieniają się jej właściwości mechaniczne. Badania mikrotwardości umożliwiają ocenę skutków wprowadzonych zmian właściwości materiału i stanowią uzupełnienie badań składu chemicznego modyfikowanych warstw.

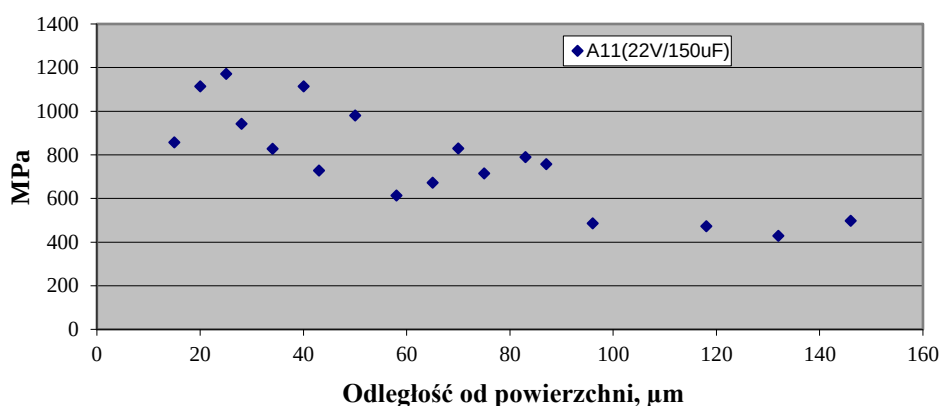
Pomiar mikrotwardości został przeprowadzony przy pomocy mikrotwardościomierza Vickersa firmy Innovatest Nexus 4000 przy obciążeniu 100g (0,98N). Pomiary zostały przeprowadzone na powierzchni przekroju poprzecznego przechodzącego przez krater (układ kraterów). Schemat rozmieszczenia odcisków podczas pomiarów mikrotwardości przedstawiono na rys. 4.55.



Rys. 4.55. Schemat rozmieszczenia odcisków podczas pomiarów mikrotwardości w poszczególnych strefach warstwy wierzchniej

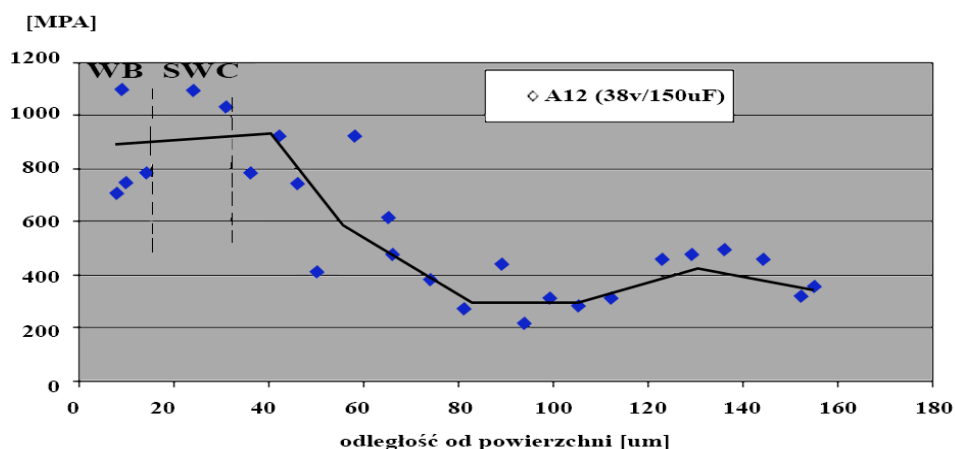
Badania mikrotwardości ($HV_{0,1}$) przeprowadzono dla próbek ze stali C45 po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą dla różnych parametrów procesu. Poniżej przedstawiono przykładowe ilustracje graficzne rozkładów mikrotwardości.

Na wykresie (rys. 4.56) przedstawiono rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej uzyskanej dla elektrody roboczej z węgliku wolframu (WC) przy napięciu zasilającym $U = 22V$ i pojemności kondensatora $C = 150 \mu F$. Ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze (próbka A11).



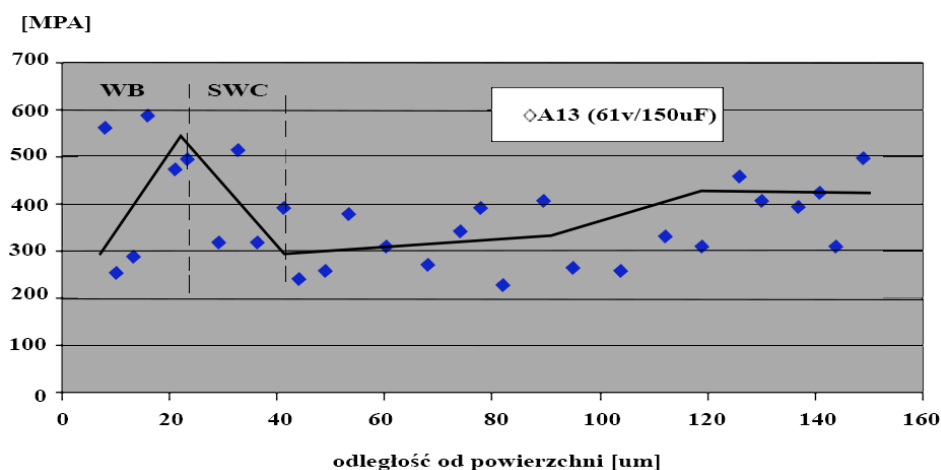
Rys. 4.56. Rozkład mikrotwardości ($HV_{0,1}$), w przekroju warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą. Warunki obróbki: elektroda robocza – węgiel wolframu (WC), napięcie $U = 22 V$, pojemność kondensatora $C = 150 \mu F$, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A11

Na wykresie (rys. 4.57) przedstawiono rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej uzyskanej dla elektrody roboczej z węgliku wolframu (WC) przy napięciu zasilającym $U = 38V$ i pojemności kondensatora $C = 150 \mu F$. Ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze (próbka A12).



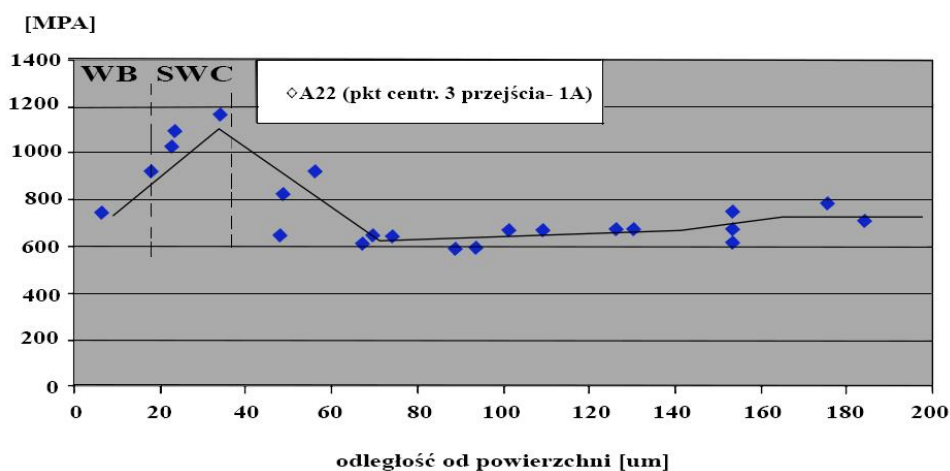
Rys. 4.57. Rozkład mikrotwardości ($HV_{0,1}$), w przekroju warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą pręcikową-drgającą. Warunki obróbki: elektroda robocza – węgiel wolframu (WC), napięcie $U = 38 V$, pojemność kondensatora $C = 150 \mu F$, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A12

Na wykresie (rys. 4.58) przedstawiono rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej uzyskanej dla elektrody roboczej z węgliku wolframu (WC) przy napięciu zasilającym $U = 61\text{V}$ i pojemności kondensatora $C = 150\text{ }\mu\text{F}$. Ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze (próbka A13).



Rys. 4.58. Rozkład mikrotwardości ($HV_{0,1}$), w przekroju warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą przecikową-drgającą. Warunki obróbki: elektroda robocza – węglik wolframu (WC), napięcie $U = 61\text{ V}$, pojemność kondensatora $C = 150\text{ }\mu\text{F}$, ilość warstw nanoszonych - 1, czas nanoszenia warstwy 1 min, medium obróbcze – powietrze, próbka A13

Na wykresie (rys. 4.59) przedstawiono rozkład mikrotwardości warstwy wierzchniej uzyskanej dla elektrody roboczej z węgliku wolframu (WC) przy napięciu zasilającym $U = 22, 61, 106\text{ V}$ i pojemności kondensatora $C = 150\text{ }\mu\text{F}$. Ilość warstw nanoszonych - 3, czas nanoszenia warstwy 3 min (3 przejścia po 1 min), medium obróbcze – powietrze (próbka A14).



Rys. 4.59. Rozkład mikrotwardości ($HV_{0,1}$), w przekroju warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą przecikową-drgającą z węgliku wolframu po nałożeniu 3 warstw przy różnych wartościach napięcia $U = 22, 61, 106\text{ V}$. Czas obróbki 3 min (3 przejścia po 1 min). Pojemność kondensatora $150\text{ }\mu\text{F}$. Medium obróbcze – powietrze, próbka A22

Analiza rozkładów mikrotwardości przedstawiona na wykresach (rys. 4.56 – rys. 4.59) wykazuje, że największa wartość tego parametru występuje w niewielkiej odległości od powierzchni i po osiągnięciu maksimum następuje stopniowy jej spadek, aż do osiągnięcia twardości materiału rodzimego. Największą twardość 1200MPa ($HV_{0,1}$) uzyskano w odległości około 20 μm od powierzchni próbki. Najwyższą wartość mikrotwardości uzyskano dla większej pojemności kondensatora tj. 300 μF i przy nałożeniu 5 warstw. Głównym czynnikiem powodującym wzrost wartości mikrotwardości jest wzbogacenie składu chemicznego podłoża pierwiastkami stopującymi zawartymi w elektrodzie roboczej.

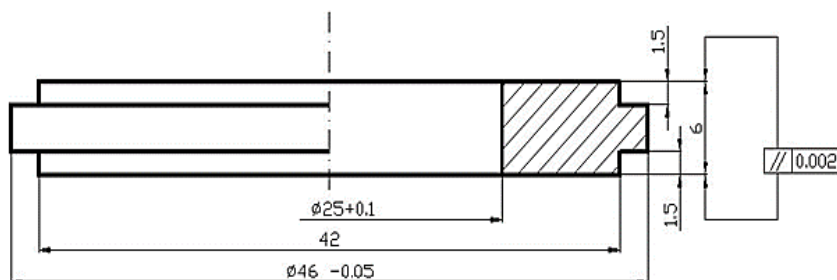
Badania tribologiczne

Zainteresowanie badaniami nad modyfikowaniem warstwy wierzchniej wynika z dążenia do poprawy cech eksploatacyjnych elementów maszyn w ruchomych węzłach tarcia na ich styku. Poszerzenie wiedzy dotyczącej właściwości tribologicznych stopowanych warstw umożliwia jej wykorzystanie przy konstruowaniu ruchomych węzłów maszyn w celu polepszenia ich sprawności, trwałości i niezawodności. W niniejszym opracowaniu autor sygnalizuje potrzebę poszerzenia badań dotyczących zużycia warstwy wierzchniej elementów maszyn pracujących w warunkach tarcia, a przeprowadzone badania dotyczące różnych odmian stopowania mają na celu zwiększenie odporności obszarów tarcia w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Zużycie tribologiczne jest rodzajem zużycia spowodowanego zjawiskiem tarcia, w którym następuje zmiana masy i struktury oraz fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków.

Przedmiotem badań była powłoka z węgla wolframu (WC) nakładana metodą elektroiskrową na pierścienie wykonane ze stali C45.

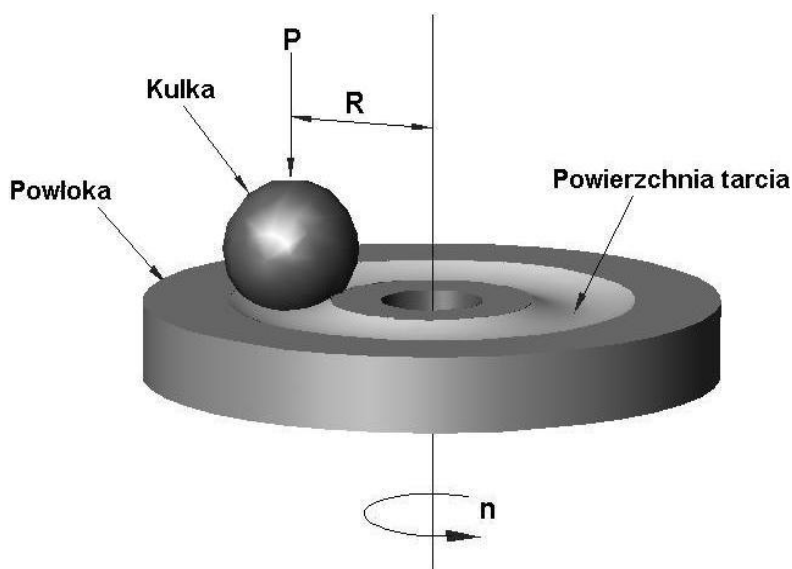
Na rys. 4.60 przedstawiono kształt i wymiary pierścienia użytego w badaniach.



Rys. 4.60. Kształt i wymiary pierścienia (próbki) do testów tribologicznych

Badania właściwości tribologicznych zostały przeprowadzone przy użyciu testera tribologicznego T-01M opisanego w części pracy dotyczącej aparatury. Węzeł tarcia stanowiła para typu kula-tarcza (pierścień). Kulka o średnicy $d = 6$ mm została wykonana ze stali łożyskowej 100Cr6. Zasadę przeprowadzania testu przedstawia rys. 4.61.

Przeprowadzono badania dla przypadku pary ciekiej w postaci próbki pierścieniowej, wykonanej ze stali C45 z naniesioną powłoką z węgliku wolframu.



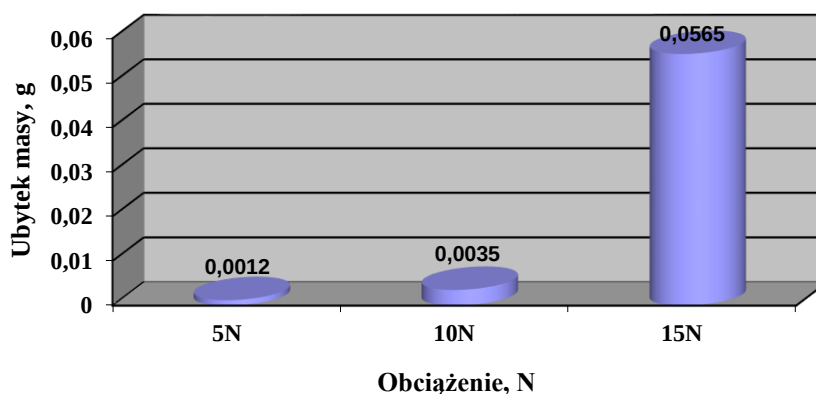
Rys. 4.61. Zasada pomiaru z wykorzystaniem testera T-01M

Badania przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia:

- prędkość obrotowa pierścienia $n = 341$ obr/min,
- ilość obrotów pierścienia $i = 3410$,
- czas próby $t = 600$ s,
- promień tarcia $R = 15$ mm,
- wartości obciążenia $P = 5$ N, 10 N, 15 N.

Próbę przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego.

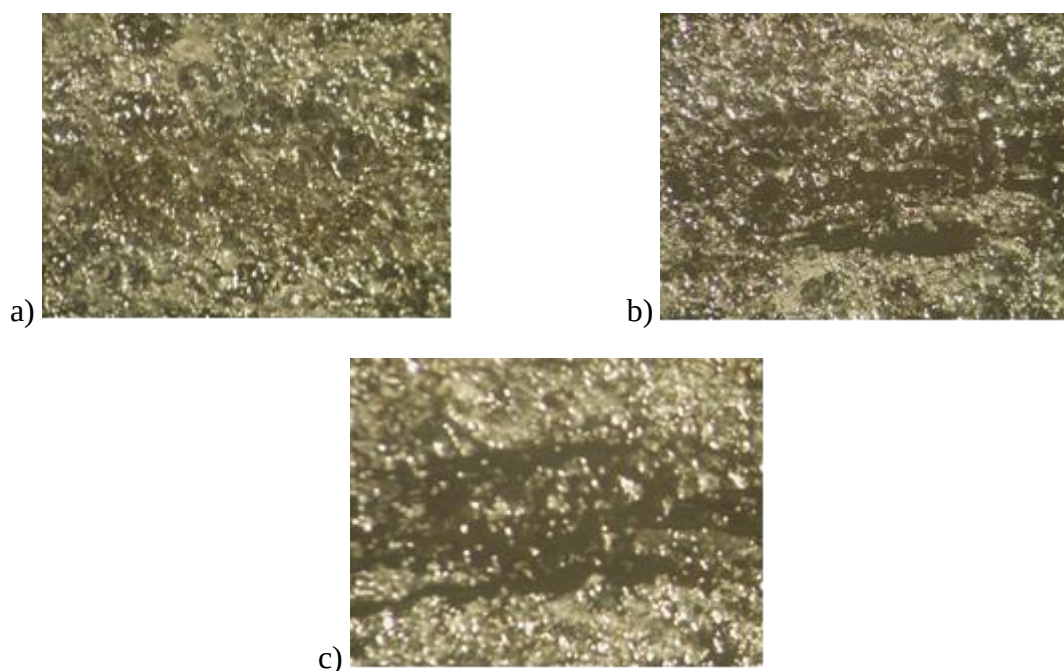
Wykres (rys. 4.62) przedstawia ubytek masy próbki powstały podczas testów tribologicznych. Przy obciążeniu 10 N ubytek masy wzrósł trzykrotnie w odniesieniu do obciążenia 5 N. Największy ubytek masy został zarejestrowany przy obciążeniu 15 N, w stosunku do przypadku obciążenie 5 N nastąpił około 50 krotny wzrost zużycia materiału.



Rys. 4.62. Zależność ubytku masy próbki modyfikowanej węglikiem wolframu podczas testów tribologicznych dla różnych warunków obciążenie pary ciernej.

Po przeliczeniu danych uzyskujemy parametr określany intensywnością zużycia, który wynosi dla obciążenia 5, 10, 15 N odpowiednio 0,12; 0,35; 5,65 mg/min.

Na rys. 4.63 przedstawiono fotografie powierzchni tarcia próbek z naniesioną powłoką z węgla wolframu (WC).

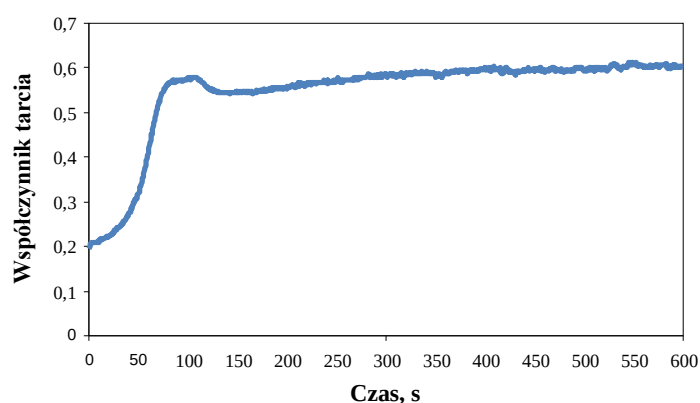


Rys. 4.63. Ślady wytarcia powłoki powstałe podczas testów tribologicznych powierzchni próbki modyfikowanej węglikiem wolframu dla różnych obciążeń pary ciernej: a) 5 N, b) 10 N, c) 15 N

Na wykresach (rys. 4.64, rys. 4.65, rys. 4.66) przedstawiono przykładowe przebiegi zmienności współczynników tarcia w funkcji czasu próby uzyskane podczas testów tribologicznych przy obciążeniach: 5 N, 10 N, 15 N.

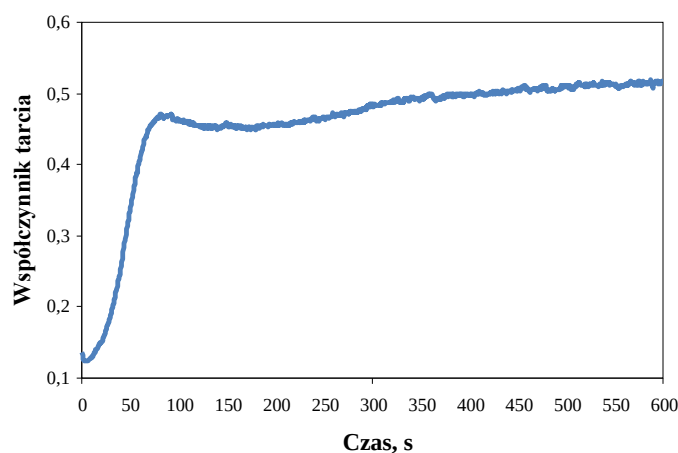
W trakcie tarcia technicznie suchego badanych powłok nastąpiło przekształcenie technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną warstwę wierzchnią. Efekt ten nastąpił w wyniku obciążenia próbki oraz występowania w węźle tarcia względnej prędkości poślizgu, w warunkach oddziaływania atmosfery otoczenia zewnętrznego.

Na rys. 4.64 przedstawiono przebieg zmienności współczynnika tarcia w funkcji czasu próby dla obciążenia 5 N. Na wykresie można zaobserwować, że jego przebieg ustabilizował się po upływie około 150 sekund. Wartość tego parametru wzrastała w sposób monotoniczny od poziomu 0,55 do 0,6 dla czasu 600 s.



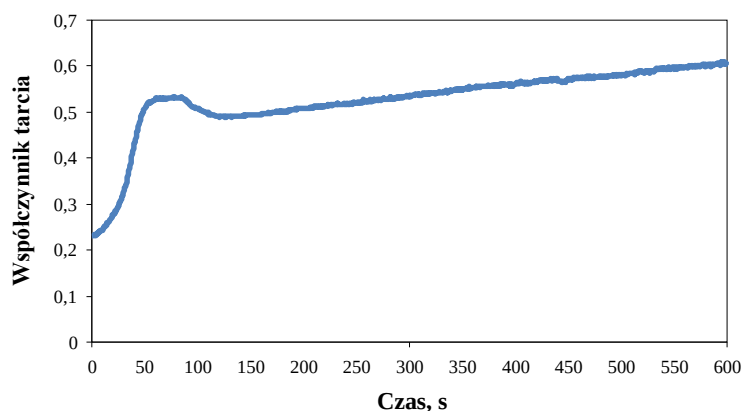
Rys. 4.64. Przykładowy przebieg zmienności współczynnika tarcia powierzchni próbki modyfikowanej węglikiem wolframu w funkcji czasu próby, uzyskany podczas testów tribologicznych dla obciążenia 5 N i prędkości obrotowej pierścienia $n = 341$ obr/min

W przypadku obciążenia 10 N stabilizacja współczynnika tarcia nastąpiła po upływie 120 sekund, wartość jego mieściła się w przedziale 0,45 – 0,52. Na wykresie (rys. 4.65) można zaobserwować, że po upływie około 140 sekund przebieg zmienności współczynnika tarcia był monotoniczny – jego wartość wzrastała liniowo.



Rys. 4.65. Przykładowy przebieg zmienności współczynnika tarcia powierzchni próbki modyfikowanej węglikiem wolframu w funkcji czasu próby, uzyskany podczas testów tribologicznych dla obciążenia 10 N i prędkości obrotowej pierścienia $n = 341$ obr/min

Dla obciążenia 15 N stabilizacja współczynnika tarcia nastąpiła po upływie 110 sekund. Na wykresie (rys. 4.66) można zaobserwować, że jego wartość mieściła się w przedziale 0,50 – 0,62.



Rys. 4.66. Przykładowy przebieg zmienności współczynnika tarcia powierzchni próbki modyfikowanej węglikiem wolframu w funkcji czasu próby, uzyskany podczas testów tribologicznych dla obciążenia 15 N i prędkości obrotowej pierścienia $n = 341$ obr/min

Wnioski o charakterze poznawczym

Częstotliwość inicjowania wyładowań zdeterminowana jest konstrukcją i sposobem zasilania układu elektromechanicznego głowicy stopującej i wynosi 50 Hz (wynika ona z częstotliwości zasilania wzбудnika elektromagnetycznego w głowicy).

W procesie stopowania z zastosowaniem wyładowań elektroiskrowych elektrodą pręcikową głównym czynnikiem powodującym przenoszenie materiału elektrody stopującej do powierzchni obrabianej jest wydzielanie ciepła towarzyszące wyładowaniu.

Warunkiem niezbędnym do inicjacji wyładowań jest odpowiednia wartość natężenia pola elektrycznego pomiędzy lokalnie ukształtowanym układem elektrod.

Zastosowanie elektromechanicznych głowic stopujących (z bezpośrednim kontaktem powierzchni elektrod roboczych) w stosunku do obróbki elektroerozyjnej umożliwia rozwarciowe zainicjowanie wyładowań dla niskich wartości napięcia ~ 5 V.

Czynnikami kształtującymi mikrostrukturę geometryczną powierzchni są wyładowania iskrowe oraz oddziaływania mechaniczne końcówki elektrody stopującej.

W typowej metodzie dla stopowania wpływ oddziaływań mechanicznych elektrody roboczej na konstytuowanie SGP jest niewielki. Oddziaływania te koncentrują się głównie na wierzchołkach mikronierówności i warunkują inicjowanie wyładowań elektrycznych.

Dolną granicę obszaru stopowania wyznacza minimalna wartość napięcia niezbędna do inicjacji wyładowań elektrycznych.

Wnioski o charakterze użytkowym

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że stopowanie elektrodami pręcikowymi z zastosowaniem głowic elektromechanicznych umożliwia:

- stopowanie powierzchni krzywoliniowych o zmiennej makrogeometrii,
- wykorzystanie elektrod roboczych o kształcie nieodwzorowującym kształt przedmiotu,
- realizację procesu zgrubnego nanoszenia warstw z relatywnie dużą wydajnością oraz stopowania wykończeniowego, pozwalającego na uzyskanie chropowatości o wysokości Ra na poziomie $2\text{ }\mu\text{m}$, na tych samych urządzeniach technologicznych z zastosowaniem tych samych elektrod roboczych,
- stopowanie zarówno z wykorzystaniem urządzeń specjalizowanych jak i prostych urządzeń przenośnych w postaci głowic elektromechanicznych w połączeniu ze źródłami zasilania o prostej budowie,
- lokalne modyfikowanie powierzchni (również bez demontażu np. skomplikowanych matryc z urządzeń technologicznych).

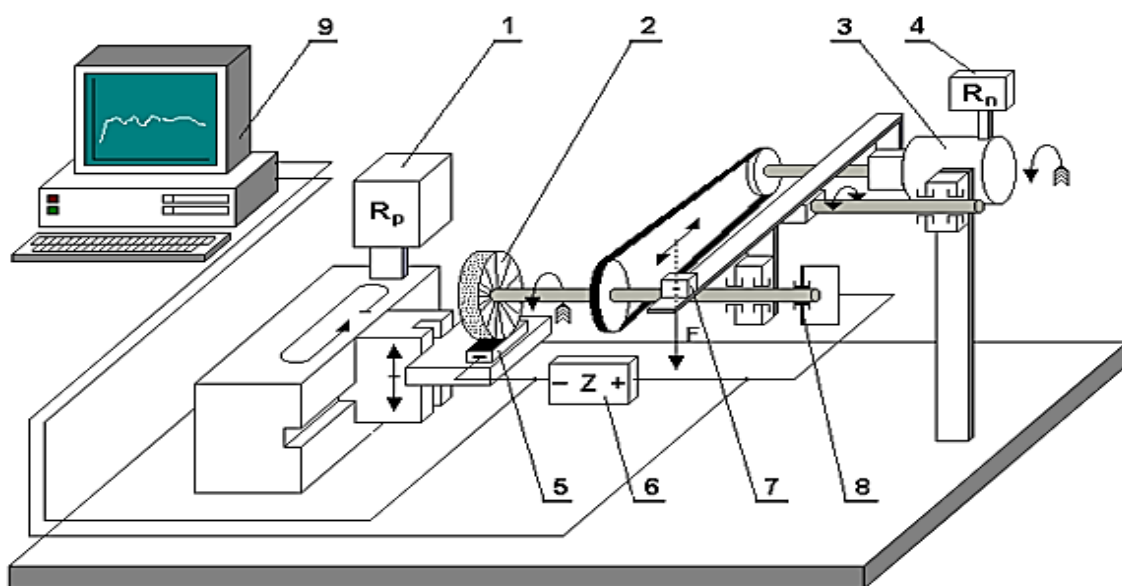
4.4. Badania efektów stopowania z zastosowaniem elektrod szczotkowych (BEDMA)

4.4.1. Opis stanowiska do badań z elektrodą szczotkową

Badania z użyciem elektrod szczotkowych wykonane zostały na stanowisku specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym w tym celu w ITM Politechniki Warszawskiej (rys. 4.67). Obrabiane przedmioty mocowane były w przyrządzie umożliwiającym doprowadzenie do nich prądu, zapewniając równocześnie odizolowanie elektryczne od pozostałych elementów stanowiska. Doprowadzenie gazu w strefę stopowania odbywało się za pomocą dyszy i zasilane było argonem z butli. Źródło prądu roboczego stanowił zasilacz prądu stałego z generatorem tranzystorowym GMA-01. Generator zbudowany jest jako zasilacz stałoprądowy z zabezpieczeniem przeciążeniowym oraz jako generator impulsów dużej mocy, przeznaczony głównie do badań obróbki elektroerozyjnej, może służyć jako generator do drążarek elektroerozyjnych.

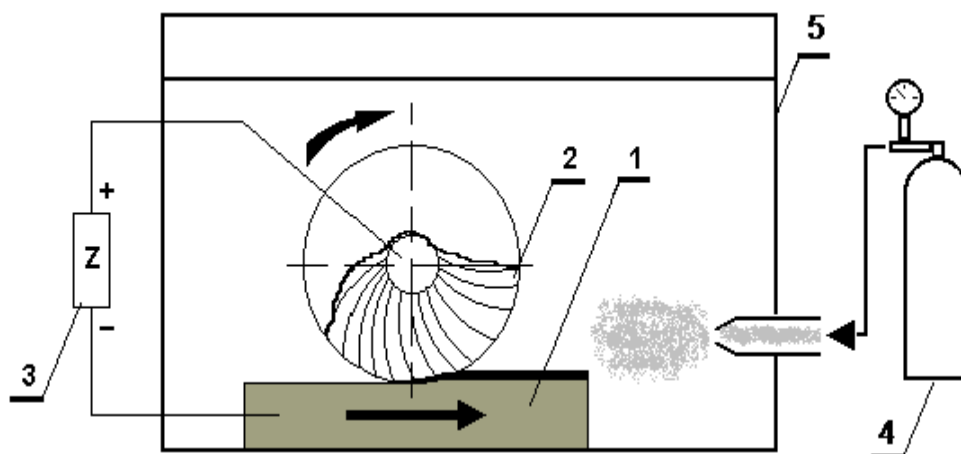
Podstawowe dane techniczne:

- napięcie zasilania $U_{zasil} = 3 \times 380 \text{ V}$,
- moc maksymalna $S = 2,5 \text{ kVA}$,
- napięcie biegu luzem - zapłonowe $U_Z \leq 240 \text{ V}$,
- napięcie biegu luzem - robocze $U_R \leq 50 \text{ V}$,
- prąd zapłonowy $I_Z = 0 - 3 \text{ A}$,
- prąd roboczy $I_R = 1 - 45 \text{ A}$,
- czas impulsu $t_i = 10 \mu\text{s} - 1500 \mu\text{s}$,
- czas przerwy $t_0 = 10 \mu\text{s} - 1500 \mu\text{s}$.



Rys. 4.67. Schemat stanowiska do przeprowadzania badań stopowania z elektrodą szczotkową: 1 – napęd posuwu stolika, 2 – elektroda szczotkowa (anoda), 3 – silnik napędowy, 4 – regulacja prędkości obrotowej, 5 – próbka (katoda), 6 – układ zasilania (generator), 7 – docisk, 8 – szczotki elektryczne (komutator), 9 – komputerowy system pomiarowy [68]

Obrabianie przedmiotu odbywało się w zamkniętej komorze roboczej, którą wykonano z tworzywa sztucznego w postaci dwóch części dokładnie do siebie dopasowanych, ze szczelnym połączeniem. W komorze umieszczono uchwyt do mocowania próbek. W ścianie bocznej wykonano wycięcie na wrzeciono, do którego umocowano elektrodę szczotkową. Wycięcie zabezpieczono przesłoną w celu zminimalizowania wypływu argonu i dopływu powietrza do komory roboczej. Podłączono przewody elektryczne oraz przewód doprowadzający argon. Schemat komory roboczej przedstawia rys. 4.68.



Rys. 4.68. Schemat komory stanowiska do badań stopowania elektrodą szczotkową: 1 – przedmiot obrabiany, 2 – elektroda szczotkowa, 3 – układ zasilania, 4 – butla z gazem ochronnym (argon), 5 – zamykana komora robocza [68]

Stanowisko badawcze składa się z następujących głównych zespołów:

- napędu i docisku elektrody szczotkowej,
- napędu posuwu komory roboczej,
- zespołu mocowania przedmiotu stopowanego,
- zespołu zasilania prądem,
- zespołu zasilania gazem (argonem).

Stopowanie elektroiskrowe elektrodą szczotkową BEDMA

Narzędzia szczotkowe używane są z powodzeniem od wielu lat w ręcznych i półautomatycznych operacjach. W ostatnich latach elektrody szczotkowe zaczynają być coraz częściej używane w wielu w pełni zautomatyzowanych aplikacjach, np. przygotowania powierzchni, usuwania nadmiarów materiału, polerowania. Tak rozległe używanie elektrod szczotkowych może być przypisane wydajności, rentowności, skuteczności i względnej łatwości, z którą takie narzędzia mogą być wprowadzane do zautomatyzowanego środowiska.

Stopowanie elektroiskrowe obrotowymi elektrodami szczotkowymi stwarza nowe możliwości w zakresie wysokowydajnego stopniowania dużych powierzchni krzywoliniowych. W wyniku wyładowań iskrowych, lokalnego topienia i parowania elektrod oraz dynamicznego transportu masy, między nimi tworzy się warstwa wierzchnia o specyficznej dla tego sposobu obróbki budowie. Stosowanie różnych materiałów elektrod umożliwia uzyskanie specyficznych właściwości WW.

W sposobie tym elektrodą roboczą (z której przenoszony jest materiał na stopowany przedmiot) jest obrotowa szczotka wykonana z materiału, który powinien zostać wprowadzony do warstwy wierzchniej stopowanego przedmiotu. Elementy sprężyste (druły) elektrody szczotkowej mają zwykle średnicę $d = 0,1 - 0,3$ mm i wykonane są np. ze stali wysokostopowych X10CrNi18-8 (1H18N9), wolframu, molibdenu, itp.

Elektroda szczotkowa dociskana jest z niewielką siłą rzędu kilku niutonów do obrabianej powierzchni i wykonuje ruch obrotowy o prędkości od kilkuset do 3000 obr/min. Próbką wykonuje ruch posuwowy względem szczotki obrotowej. Stopowanie należy realizować w osłonie gazu obojętnego np. argonu, azotu, CO₂ itp., w celu przeciwdziałania tworzeniu na powierzchni warstw tlenkowych, które blokują powstawanie wyładowań i transport masy.

Układ obróbkowy zasilany jest z generatora prądu stałego lub RC, elektroda szczotkowa stanowi anodę, a przedmiot obrobiony katodę.

Wyładowania iskrowe inicjowane są przez zrywanie styku elementu sprężystego (drułu) szczotki ze stopowaną powierzchnią wskutek ruchu obrotowego szczotki.

Wyładowaniu towarzyszy utworzenie wysokoenergetycznego kanału plazmowego, którego oddziaływanie na elektrody powoduje:

- lokalne topnienie i parowanie powierzchni anody i katody,
- wyrzucenie z powierzchni anody jej stopionych i odparowanych cząstek i ich transport na powierzchnię katody,
- mieszanie roztopionych cząstek anody z materiałami roztopionej warstwy katody (konwekcja, dyfuzja, ruch wymuszony energią kinetyczną cząstek anody),
- lokalne nagrzewanie materiału przylegającego do strefy wyładowania i gwałtowne jego chłodzenie wskutek odprowadzania ciepła do rdzenia.

Równocześnie na obrobioną powierzchnię oddziałują mechanicznie elementy sprężyste obrotowej szczotki, a skutkami tego oddziaływania są:

- mechaniczny styk elementów sprężystych szczotki z obrabianą powierzchnią i jego zrywanie,
- inicjacja rozwarciowa wyładowań iskrowych,
- usuwanie lub wygładzanie najwyższych nierówności,
- odkształcanie plastyczne warstwy wierzchniej i generowanie w niej naprężeń.

Czas wyładowań iskrowych jest rzędu mikrosekund, maksymalne natężenie prądu w impulsie wynosi do 600 A, a temperatura kanału plazmowego waha się od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy stopni K.

Oddziaływania elektrody roboczej na proces stopowania są zdeterminowane przez jej właściwości fizyczne i geometryczne. Do najważniejszych cech fizycznych wpływających na warunki topienia i parowania elektrod, ilość stopionego metalu oraz ilość materiału przeniesionego na katodę, jak również stan WW należy zaliczyć:

- ciepło i temperaturę topnienia oraz parowania anody i katody,
- rezystancję, moduł sprężystości oraz twardość materiału anody w stanie stałym.

Temperatura na powierzchni anody, objętość stopionego materiału i ilość masy przeniesionej na katodę zależy od energii wyładowania, czasu jego trwania oraz właściwości cieplnych anody i katody.

Jednym z najistotniejszych czynników jest niewątpliwie temperatura topliwości materiału anody, im jest ona wyższa tym mniej metalu ulega stopieniu, a ponadto jej część może zakrzepnąć podczas transportu z anody do katody.

W przypadku anody (szczotki) warunki odprowadzania ciepła są dużo gorsze niż w przypadku katody o dużym przekroju, gdyż drut ma bardzo mały przekrój i jest długi, ponadto poza źródłem ciepła jakim jest wyładowanie iskrowe oddziałuje na druty ciepło Joula-Lenza, które wydziela się w całej jego objętości.

Badania doświadczalne obejmowały ocenę wpływu cech materiału elektrody roboczej i średnicy drutu elektrody na efekty obróbki.

Jako materiał elektrod stosowano stal X10CrNi18-8 (1H18N9), molibden oraz wolfram. Stal X10CrNi18-8 (1H18N9) charakteryzuje się dużą zawartością chromu (18%) i niklu (9%) oraz bardzo dobrymi właściwościami antykorozyjnymi.

Wyniki badań stopowania elektrodą ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9) mogą być uogólnione na inne stale stopowe, ponieważ w szerokim zakresie zawartości dodatków stopowych temperatura topnienia stali ($T = 1808 \text{ K}$) oraz pozostałe parametry opisujące właściwości cieplne stali zmieniają się w wąskich granicach. Molibden i wolfram mają dużo wyższe niż stal X10CrNi18-8 (1H18N9) temperatury topnienia ($T_{mo} = 2888 \text{ K}$, $T_{tw} = 3673 \text{ K}$).

Na elektrody szczotkowe do badań stosowano druty (elementy sprężyste) o średnicy od setnych części milimetra do $d = 0,5 \text{ mm}$. Badania te wykazały, że elektrody o średnicy d mniejszej od $0,1 \text{ mm}$ (przy stosowanych generatorach) ulegają bardzo szybkiemu zużyciu (topnienie i parowanie), natomiast przy d mniejszej od $0,4 \text{ mm}$ występuje bardzo intensywne oddziaływanie elektromechaniczne (prąd płynie przez styk mechaniczny) przy niewielkich efektach stopowania. Związane jest to z oddziaływaniem mechanicznym sztywnego drutu, który powoduje mikroskrawanie powierzchni próbki, styk nie utlenionych powierzchni anody i katody oraz przepływ prądu zwarcia o wysokich wartościach natężenia.

Próbkę ze stali C45 stopowano szczotkami ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9), molibdenem oraz wolframu. Wyniki badań wykazały, że w porównaniu do stopowania elektrodą ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9) wydajność stopowania molibdenem jest prawie 10-krotnie mniejsza, a przy stopowaniu elektrodą wolframową występuje ubytek katody (próbki). Nie oznacza to, że w ostatnim opisywanym przypadku nie występuje efekt stopowania. Wskutek wyładowań iskrowych następuje topnienie i wyrzucanie materiału z powierzchni obu elektrod, ale ubytek materiału (stali) z powierzchni katody jest większy niż masy anody (wolframu).

4.4.2. Badania stanu warstwy wierzchniej (WW) po obróbce BEDMA

Warstwa wierzchnia podczas stopowania elektroiskrowego konstituowana jest przez procesy: topnienia, przenoszenia masy z anody na katodę, dynamicznych oddziaływań wyładowania iskrowego, mieszania roztopionego metalu katody i anody, dyfuzji, bardzo szybkiego ogrzewania i chłodzenia oraz związanymi z tymi procesami, przemianami strukturalnymi warstw przyległych do strefy wyładowań iskrowych.

Tworzenie warstwy stopowanej w procesie BEDMA przy ogólnym podobieństwie do innych "gorących procesów" ma swoją specyfikę wynikającą z:

- wielokrotnych wyładowań w tym samym miejscu,
- dużej losowości wyładowań w zakresie ich energii i częstotliwości oraz licznych zwarców,
- mechanicznego oddziaływania elementów sprężystych szczotki na stopowaną powierzchnię.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że struktura geometryczna powierzchni po stopowaniu BEDMA charakteryzuje się dużymi pochyleniami nierówności, sporadycznymi wysokimi wierzchołkami, typową dla powierzchni po EDM losowością.

W przypadku powierzchni pracujących w połączeniach bądź narzędzi skrawających itp., powierzchnie po BEDMA należy obrabiać ściernie (szlifowanie, dogładzanie) w celu nadania im wymaganej dokładności i chropowatości.

Badania mikrostruktury metalograficznej, składu chemicznego i mikrotwardości wykonano na zgładach metalograficznych prostopadłych do obrabianych powierzchni. Stosowano typowe procedury wykonywania i trawienia tych zgładów.

W warstwie wierzchniej po BEDMA można wyróżnić trzy charakterystyczne strefy:

- przetopioną (strefa biała), składającą się z zakrzepłego na powierzchni katody roztopionego materiału zmieszanego z przeniesionym na tę powierzchnię roztopionym materiałem anody,
- wpływów cieplnych (SWC), widoczna jest ona w postaci jasnej lub ciemnej smugi położonej bezpośrednio pod warstwą przetopioną, w strefie tej (po obróbce z zastosowaniem dużych energii) widoczne są elementy struktury metalograficznej, ukierunkowane w stronę obrabianej powierzchni tj. w kierunku odprowadzania ciepła,
- struktury metalograficznej typowej dla rdzenia próbki widocznej za SWC.

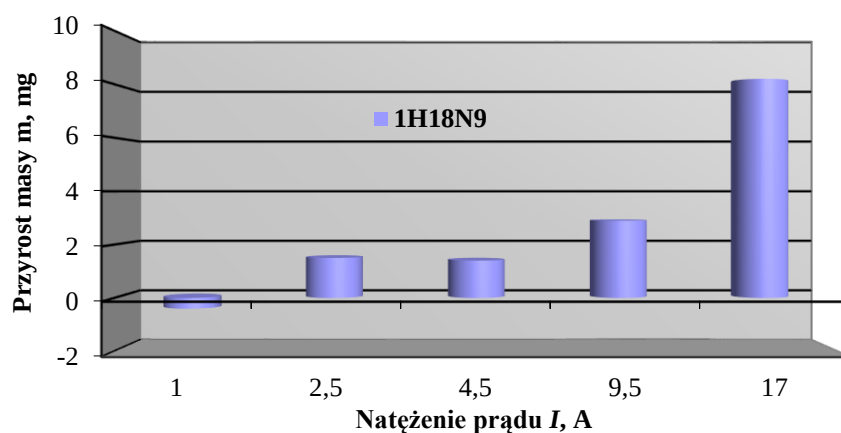
Badania składu chemicznego WW przeprowadzono metodą mikroanalizy rentgenowskiej. W przeprowadzanych badaniach średnica „plamki” promieniowania na powierzchni badanej (z której zbierane są informacje) wynosiła $d = 2,5 \mu\text{m}$.

Stopowanie elektrodą szczotkową

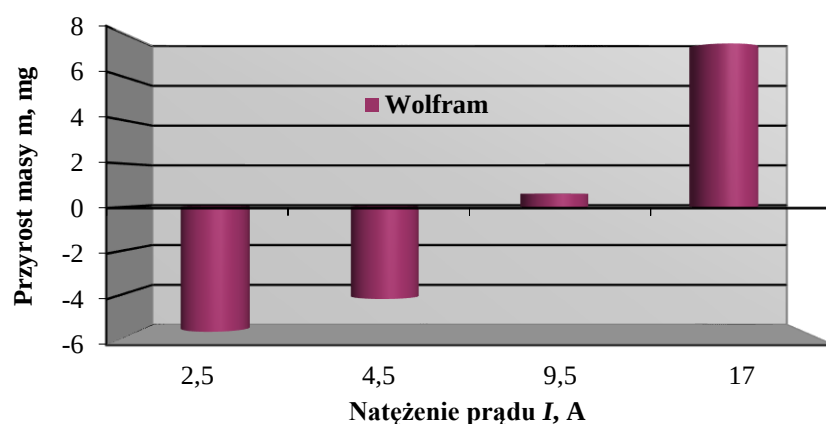
Badania elektrodą szczotkową przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 4.67 z wykorzystaniem przygotowanych do tego celu elektrod szczotkowych wykonanych ze stali chromoniklowej X10CrNi18-8 (1H18N9) oraz wolframu. Średnica pojedynczych drutów szczotki wynosiła 0,3 mm. Próby przeprowadzono w atmosferze gazu osłonowego – argonu oraz w środowisku wody destylowanej. Wszystkie próby przeprowadzono przy polaryzacji: elektroda szczotkowa (+), materiał obrabiany (-). Jako źródło zasilania posłużył generator tranzystorowy. Warunki eksperymentu określone są parametrami: stała wartość ugięcia odpowiadająca naciskowi ok. 0,6 N, posuw współbieżny, środowisko argon lub woda destylowana, prąd I od 1 A do 17 A, czas impulsu $t_i = 100 \mu\text{s}$, czas przerwy pomiędzy impulsami $t_0 = 100 \mu\text{s}$.

Wyniki badań stopowania elektrodą szczotkową

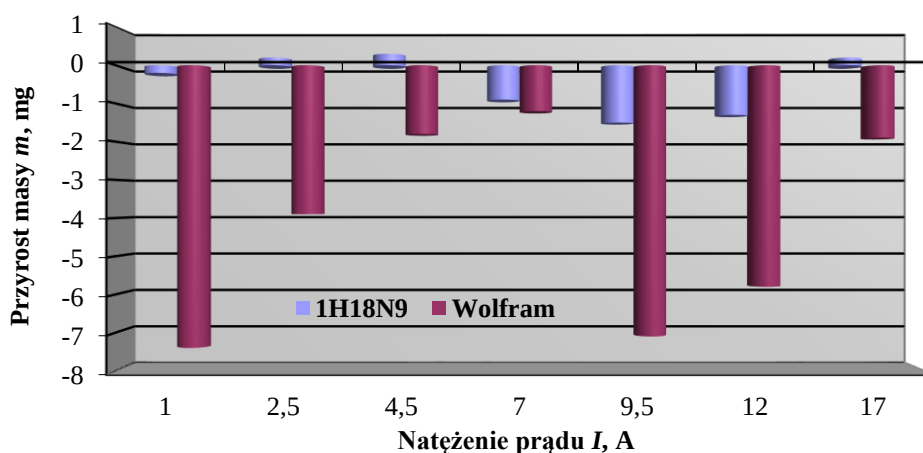
Wyniki badań przyrostu masy po stopowaniu elektrodą szczotkową dla poszczególnych materiałów i warunków zasilania pokazano na wykresach (rys. 4.69, rys. 4.70, rys. 4.71).



Rys. 4.69. Przyrost masy próbki dla różnych wartości natężenia prądu I po stopowaniu elektrodą szczotkową wykonaną ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9) w atmosferze gazu osłonowego – argonu



Rys. 4.70. Przyrost masy próbki dla różnych wartości natężenia prądu I po stopowaniu elektrodą szczotkową wykonaną z wolframu w atmosferze gazu osłonowego – argonu



Rys. 4.71. Porównanie przyrostu masy próbki dla różnych wartości natężenia prądu I po stopowaniu elektrodą szczotkową wykonaną ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9) oraz wolframu. Medium obróbcze – woda destylowana

Analiza wyników badań wskazuje, że w przypadku zastosowania elektrod wykonanych ze stali kwasoodpornej X10CrNi18-8 (1H18N9) występuje silny związek przyrostu masy próbki z natężeniem prądu zasilania układu międzyelektrodowego. Związane jest to z wyż-

szą energią wyładowań i stapianiem większych mikroobjętości elektrody roboczej, które przenoszone są na powierzchnię stopowaną.

Wyniki badań zmiany masy próbki dla elektrod szczotkowych wykonanych z wolframu wskazują, że dla niskich wartości prądu (2,5 – 4,5 A) zasilającego układ międzyelektrodowy następuje ubytek masy próbki. Analiza śladów oddziaływań elementów elektrod wolframowych z powierzchnią obrabianą wskazuje na występowanie znacznych oddziaływań mechanicznych. Związane jest to, że znacznie wyższą temperaturą topnienia wolframu oraz wytrzymałością mechaniczną w odniesieniu do stali kwasoodpornych. Dla niskich wartości natężenia prądu, głównym czynnikiem powodującym usuwanie materiału próbki są oddziaływania termomechaniczne elektrody szczotkowej. Dla wyższych zakresów wartości tego parametru (9,5 – 17 A), stosowanych w badaniach i związanych z tym wyższych wartości energii wyładowań, następuje topnienie wierzchołków poszczególnych drucików elektrody roboczej i przenoszenie materiału elektrody na powierzchnię stopowaną.

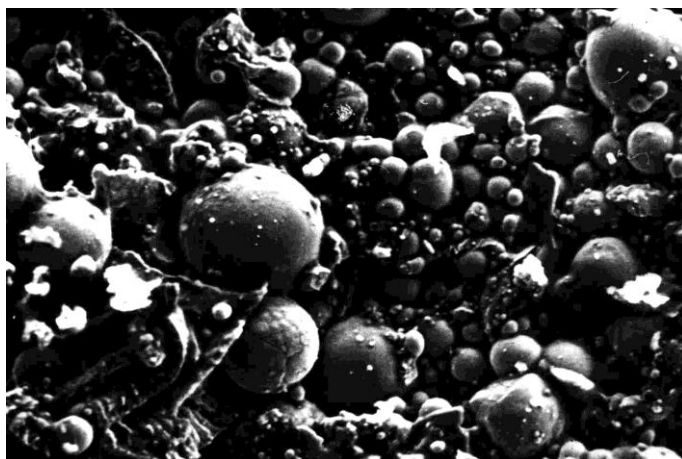
Badania potwierdzają, że każdorazowo dla określonego rodzaju i materiału elektrod, w celu uzyskania wymaganej jakości stopowania, należy określić w sposób eksperymentalny warunki procesu.

4.5. Badania efektów stopowania elektroiskrowego elektrodą monolityczną

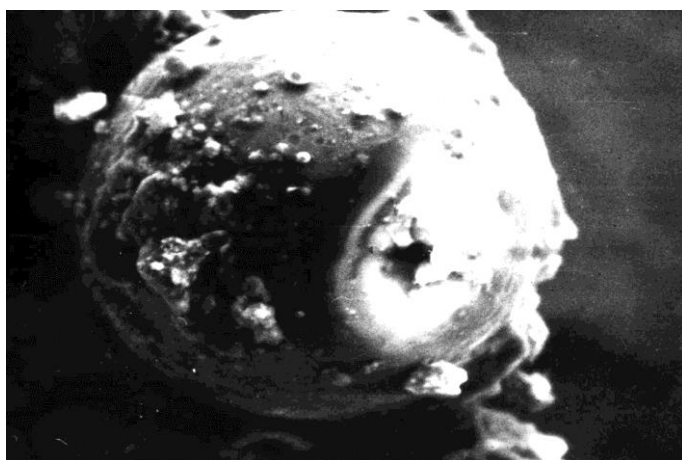
4.5.1. Charakterystyka procesu stopowania elektrodą monolityczną

Przy stopowaniu elektrodą monolityczną, inicjacja wyładowania ma charakter zbliżeniowy. W chwili zbliżenia elektrod następuje jonizacja przestrzeni międzyelektrodowej i przeskok iskry pomiędzy elektrodami. W czasie działania wyładowania następuje przeniesienie materiału z anody na katodę, budując charakterystyczny stożek. Ponieważ nie ma żadnych oddziaływań mechanicznych między elektrodami, stożki te nie ulegają deformacji. Można wyszczególnić charakterystyczne cechy krateru po przeniesieniu materiału. Dla typowych warunków stopowania w centralnej części krateru, w miejscu bezpośredniego działania kanału plazmowego, powstaje wzniesienie zbudowane głównie z materiału anody. Wokół wzniesienia powstaje wgłębienie, które jest wynikiem działania wysokiej temperatury kanału wyładowczego i wybuchowego charakteru wyładowania. W procesie stopowania źródło energii stanowią generatory tranzystorowe (tranzystorowe programowalne). Przestrzeń między-

lektrodowa wypełniona jest naftą, która stanowi medium obróbcze. W procesie obróbki elektroerozyjnej do przestrzeni międzyelektrodowej ewakuowany jest ciekły metal w postaci kropeł, zachowują one swój pierwotny sferyczny kształt po zakrzepnięciu. Fotografie przykładowych produktów erozji przedstawiono na rys. 4.72 i rys. 4.73.

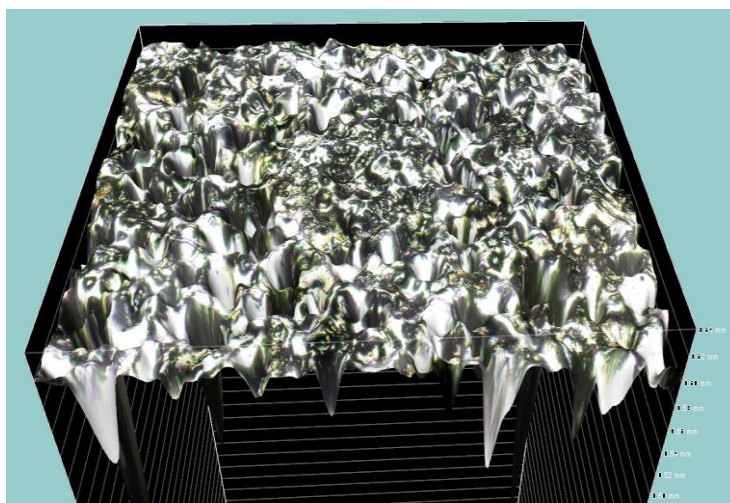


Rys. 4.72. Fotografia SEM produktów elektroerozji

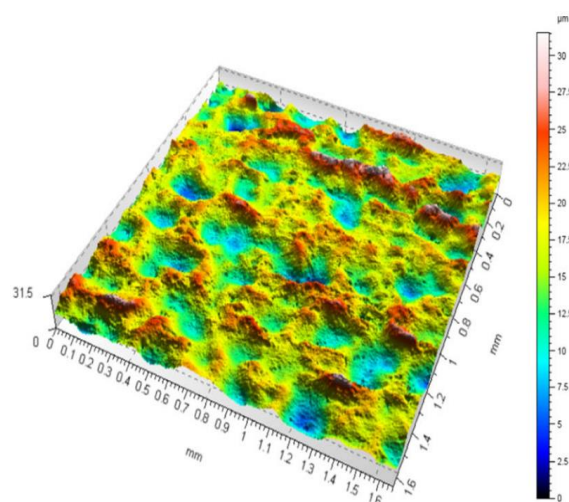


Rys. 4.73. Fotografia SEM produktów erozji w postaci pojedynczej kulki

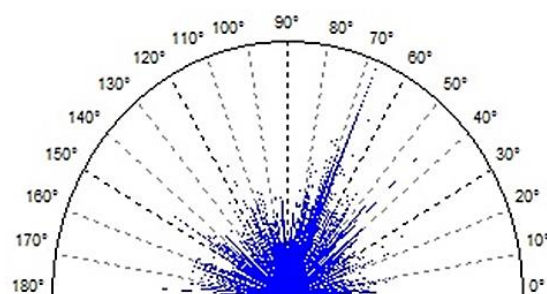
W celu dokonania oceny skutków oddziaływań wyładowań elektrycznych przy stopowaniu elektrodą monolityczną poddano obserwacji powierzchnię obrabianą. Na rys. 4.74 do rys. 4.77 przedstawiono przykładowe obrazy topografii powierzchni powstałe w wyniku wyładowań oraz zgląd metalograficzny powierzchni po stopowaniu. Do obserwacji użyto mikroskopu świetlnego Nikon Eclipse MA200 i profilometru optycznego Talysurf CCI Lite - Taylor Hobson.



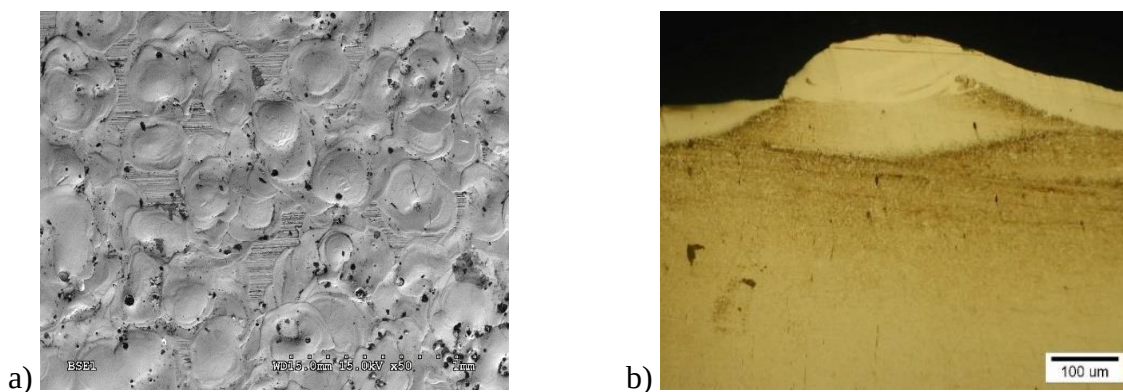
Rys. 4.74. Topografia 3D powierzchni po stopowaniu elektrodą monolityczną, mikroskop świetlny Nikon Eclipse MA200, (stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 16\text{ A}$, $t_i = 800\text{ }\mu\text{s}$, czas obróbki 5 min)



Rys. 4.75. Mapa wysokościowa profilu 3D powierzchni po stopowaniu elektrodą monolityczną. Badania wykonano na profilometrze optycznym Talysurf CCI Lite - Taylor Hobson, (stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 16\text{ A}$, $t_i = 800\text{ }\mu\text{s}$, czas obróbki 5 min)



Rys. 4.76. Przykładowy obraz biegunowego rozkładu chropowatości powierzchni po stopowaniu elektrodą monolityczną. Badania wykonano na profilometrze optycznym Talysurf CCI Lite - Taylor Hobson, (stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 16\text{ A}$, $t_i = 800\text{ }\mu\text{s}$, czas obróbki 5 min)



Rys. 4.77. Efekty stopowania elektrodą monolityczną: a) mikrofotografia SEM powierzchni stopowanej, b) mikrofotografia świetlna zglądu prostopadłego pojedynczego krateru, (stal C45, stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32$ A, $t_i = 3200$ μ s, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 50$ μ m; powiększenie x100)

Struktura geometryczna powierzchni stopowanej elektrodą monolityczną konstituowana jest w wyniku nakładania się efektów pojedynczych wyładowań elektrycznych. Analiza obrazu biegunowego rozkładu chropowatości powierzchni po stopowaniu elektrodą monolityczną (rys. 4.76) wskazuje, że uzyskana powierzchnia charakteryzuje się losowym rozkładem rzędnych profilu. Brak uprzywilejowanych kierunków nierówności powierzchni wskazuje, że cechuje się ona wysoką izotropowością.

Analiza topografii powierzchni po stopowaniu z wykorzystaniem elektrod monolitycznych oraz typowych dla obrabiarek EDM układów zasilania wskazuje, że struktura geometryczna uzyskanych powierzchni jest podobna do powierzchni uzyskiwanych podczas obróbki elektroerozyjnej. Parametry wysokościowe SGP zależą od wymiarów nakładających się kraterów, które zależne są od energii pojedynczych wyładowań.

4.5.2. Badania materiału próbki poddawanej modyfikowaniu

Próbki użyte do badań wykonane zostały w postaci prostopadłościennej o wymiarach 20x16x7 mm ze stali C45.

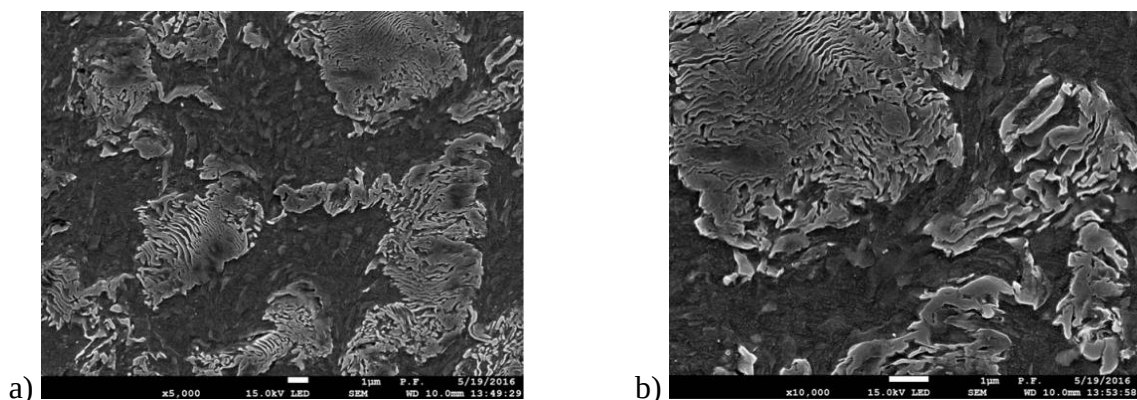
W celu określenia przyrostu masy próbek w czasie prowadzenia badań, każda próbka była ważona przed i po poddaniu jej procesowi stopowania elektroiskrowego. Pomiary te miały na celu określenie różnicy w masie próbki, która ma istotne znaczenie w wykonywanych badaniach. Pomiary były prowadzone na wadze laboratoryjnej.

Fotografie powierzchni i mikroanalizę rentgenowską wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego HITACHI S-3500N z mikrosondą do analizy składu chemicznego. Fotogra-

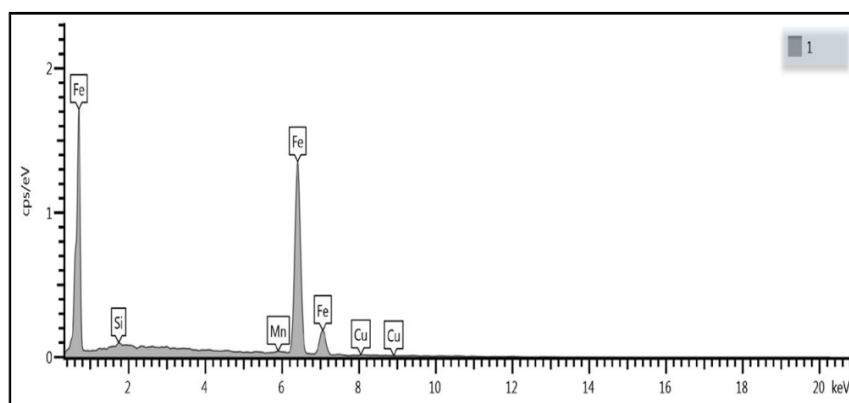
fię powierzchni wykonano za pomocą mikroskopu stereoskopowego z przystawką do aparatu cyfrowego.

Do oceny efektów stopowania wytypowano stal niestopową C45. Stal C45 może być poddawana ulepszeniu cieplnemu (hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu). Po ulepszeniu cieplnym posiada korzystne skojarzenie cech wytrzymałościowych oraz plastycznych. Wybór tego rodzaju stali, z uwagi na brak w jej składzie chemicznym pierwiastków stopowych, umożliwia ocenę zmian strukturalnych w wyniku oddziaływań cieplnych oraz w przypadku modyfikowania jej składu chemicznego. W przypadku zastosowania elektrod zawierających pierwiastki węglilotwórcze (np. chrom, molibden, wanad, wolfram), a także podnoszących odporność na korozję (głównie nikiel, chrom) można korzystnie wpływać na cechy eksploatacyjne konstituowanych warstw.

W celu porównania zmian zachodzących podczas obróbki w warstwie wierzchniej badanego materiału dokonano oceny struktury metalograficznej materiału rodzimego (podłoża) oraz zbadano jego skład chemiczny (rys. 4.79). Mikrofotografie SEM (rys. 4.78) przedstawiają strukturę perlityczno-ferrytyczną stali C45.



Rys. 4.78. Mikrofotografia SEM struktury metalograficznej materiału podłoża próbki (stal C45) poddawanej stopowaniu a) pow. 5000x, b) pow. 10000x

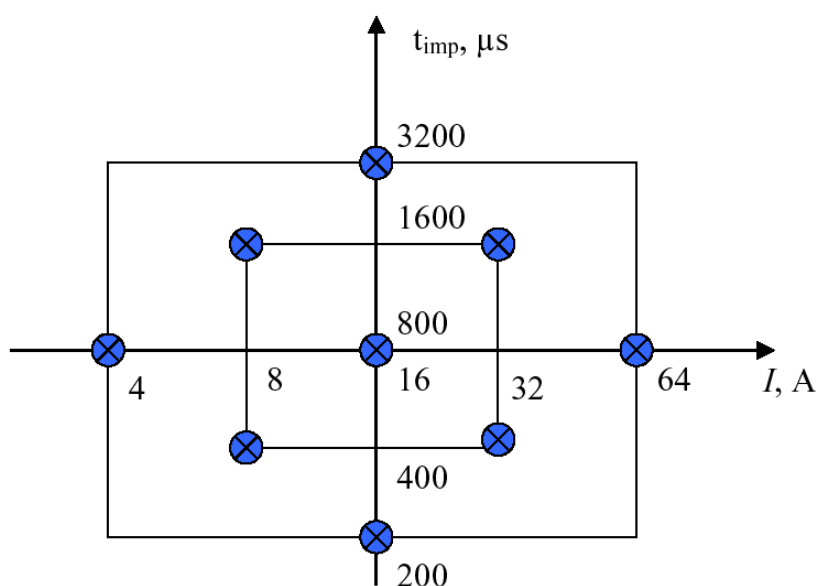


Rys. 4.79. Wyniki punktowej mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego materiału podłoża próbki (stal niestopowa C45)

4.5.3. Badania efektów stopowania elektrodami monolitycznymi

Badania efektów stopowania elektrodami monolitycznymi przeprowadzono na obrabiarce ROBOFORM 30 według eksperymentu planowanego. Wykonano szereg badań określając zmienne wejściowe, ograniczając ilość prób do punktów węzłowych umożliwiającich wyznaczenie charakterystyk statycznych.

Zakres możliwych nastaw parametrów obrabiarce ROBOFORM 30 wynosi odpowiednio: $I = 4 - 64$ A, $t_i = 100 - 6400$ μ s. W związku z tym opracowano eksperyment planowany oparty na gwieździe, w którym przyjęto wartości $I = 4, 8, 16, 32, 64$ A oraz $t_i = 200, 400, 800, 1600, 3200$ μ s (rys. 4.80). Tabela 26 przedstawia program eksperymentu planowanego.



Rys. 4.80. Schemat rozkładu parametrów prądu i czasu impulsu wykorzystanych w eksperymencie planowanym
Tabela 26. Program eksperymentu planowanego

L.p.	Kod		Wartości nastaw		Czas stopowania
			I, A	$t_i, \mu s$	minuty
1	-1	-1	8	400	15
2	-1	0	8	800	15
3	-1	1	8	1600	15
4	0	-1	16	400	15
5	0	0	16	800	15
6	0	1	16	1600	15
7	1	-1	32	400	15
8	1	0	32	800	15
9	1	1	32	1600	15

L.p.	Kod		Wartości nastaw		Czas stopowania
			I, A	t_i , μs	minuty
10	0	-2	16	200	15
11	0	2	16	3200	15
12	-2	0	4	800	15
13	2	0	64	800	15
14	0	0	16	800	15
15	0	0	16	800	15

Powyższe zestawienie tabelaryczne wartości parametrów odnosi się zarówno do badań z wykorzystaniem elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9), jak i do wykonanej z WC.

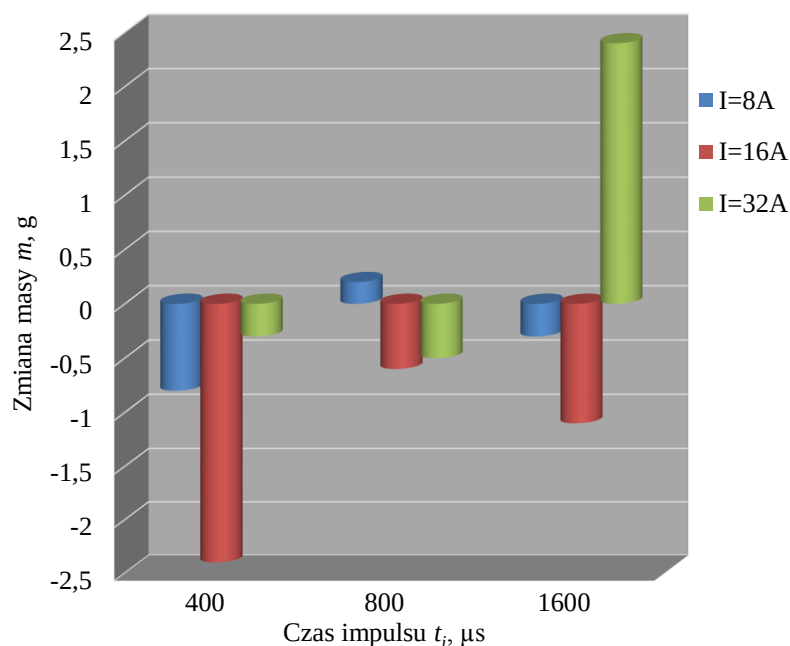
Badania i analiza wyników przyrostu masy

Wszystkie próbki zostały zważone przed, jak i po procesie stopowania elektroiskrowego, w celu określenia różnicy w masie. Do pomiaru wagi próbek użyto wagi laboratoryjnej o dokładności pomiaru 0,1 mg. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 27.

Tabela 27. Zmiana masy próbek ze stali C45 po stopowaniu elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty

Lp.	Kod		I, A	t_i , μs	Nr próbki	Czas obróbki, min	Różnica masy Δm , mg
1	-1	-1	8	400	6L	15	-0,8
2	-1	0	8	800	6P	15	0,2
3	-1	1	8	1600	7L	15	-0,3
4	0	-1	16	400	8L	15	-2,4
5	0	0	16	800	8P	15	-0,6
6	0	1	16	1600	9L	15	-1,1
7	1	-1	32	400	9P	15	-0,3
8	1	0	32	800	10L	15	-0,5
9	1	1	32	1600	10P	15	2,4
10	0	-2	16	200	11L	15	-0,9
11	0	2	16	3200	11P	15	2,6
12	-2	0	4	800	12L	15	-0,6
13	2	0	64	800	12P	15	31,5
14	0	0	16	800	13L	15	-2,0
15	0	0	16	800	13P	15	-0,8

Z wyników wnioskujemy, że występuje zarówno ubytek masy, jak i jej przyrost (rys. 4.81). Największy przyrost masy obserwujemy dla $I = 64\text{A}$ i $t_i = 800\mu\text{s}$. Największy ubytek masy zaobserwowano dla $I = 16\text{A}$ i $t_i = 400\mu\text{s}$.



Rys. 4.81. Wykres zmiany masy próbek po stopowaniu elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w funkcji zmiany czasu impulsu t_i przy zadanej wartości natężenia prądu I

Wyznaczanie zależności statystycznych wpływu warunków obróbki na jej efekty.

Analiza wyników badań

Jednym z celów pracy było zbadanie wpływu warunków wejściowych takich jak prąd impulsu I [A] i czas impulsu prądowego t_i [μs], na grubość WW – tj. związku wydajności obróbki z parametrami procesu. Zbadanie tych zależności jest możliwe przez zastosowanie narzędzi statystycznych. W oparciu o odpowiednie równania ustala się istotność wpływu czynników wejściowych na wynik badanych parametrów.

Analiza statystyczna prowadzona była w oparciu o równania regresji i ocenę istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej R , test F Snedecora (Fishera - Snedecora) i t Studenta. Przy obliczeniach posłużono się standardowym programem do wielokrotnej regresji krokowej.

Matematyczny model analizy regresji ustala się na drodze rozważań teoretycznych lub w wyniku analizy danych uzyskanych doświadczalnie. Możliwymi modelami są: funkcja wykładnicza, wielomian algebraiczny, funkcje: potęgowa, logarytmiczna, trygonometryczne

i ułamkowe. Do analizy statystycznej uzyskanych w tej pracy wyników wykorzystano, jako model matematyczny, funkcję wykładniczą opisywaną wzorem (4.6):

$$Y = e^I \cdot X_0^{a_1} \cdot X_1^{a_2} \quad (4.6)$$

gdzie kolejne składniki równania określają:

Y – wartość wyjściowa w procesie,

I, a_1, a_2 – współczynniki regresji obliczone przez program w kroku obliczeniowym dla danych wartości wejściowych,

X_0, X_1 – dane wejściowe,

dane wejściowe to:

I [A] – wartość prądu impulsu,

t_i [μs] – czas impulsu prądowego.

Danymi wyjściowymi badanymi przez analizę statystyczną były cechy charakteryzujące warstwę wierzchnią. Cechą podstawową, na którą w niniejszych badaniach położono szczególny nacisk, był wpływ parametrów obróbki na jej wydajność, charakteryzowaną przez grubość warstwy białej – G_{wb} .

Analiza regresji jest uniwersalnym aparatem matematycznym stosowanym do badania zależności statystycznych. Jest ona teoretyczną podstawą do analizy czynnikowej, będącej fundamentem techniki planowania eksperymentu. Metoda analizy równania regresji umożliwia, w oparciu o zasadę najmniejszej sumy kwadratów, krokowe wyznaczenie współczynników wartości wyjściowych, dając możliwość określenia opisu matematycznego obiektów o nieznanym charakterystykach.

W analizie równania regresji charakterystycznymi wielkościami są:

R – współczynnik korelacji wielowymiarowej,

F – wartość funkcji (w przypadku testu F Snedecora),

F_{kr} – wartość funkcji oznaczająca wartość krytyczną dla testu F Snedecora odczytywana z tablic dla danej liczby stopni swobody,

t – wartość funkcji dla poszczególnych zmiennych wejściowych (test t Studenta),

t_{kr} – wartość krytyczna funkcji dla testu t Studenta odczytywana z tablic dla danej liczby stopni swobody.

Współczynnik korelacji R jest pojęciem określającym umownie zależność statystyczną pomiędzy danymi wejściowymi i wyjściowymi. Jego wartość przyjmuje się w przedziale $R < 0, 1 >$. Tabela 28 opracowana według J. P. Guilforda opisuje przedziały współczynnika korelacji z określeniem stopnia zależności pomiędzy danymi wejścia i danymi wyjścia.

Tabela 28. Ocena współczynnika korelacji oraz zależności pomiędzy badanymi własnościami opracowana przez I. P. Guilforda

Współczynnik korelacji R	Korelacja	Zależność
poniżej 0,20	słaba	prawie nic nie znacząca
0,20 – 0,40	niska	wyraźna lecz mała
0,40 – 0,70	umiarkowana	istotna
0,70 – 0,90	wysoka	znaczna
0,90 – 1,00	bardzo wysoka	bardzo pewna

Największa zależność pomiędzy danymi wejścia i wyjścia występuje, gdy wartość otrzymanego współczynnika R zbliżona jest do 1. Im wartość współczynnika mniejsza, tym słabsza korelacja, a co za tym idzie zależność jest słabsza.

Dla przyjętego poziomu istotności np. $\alpha = 0,1$ możliwe jest, przy użyciu tablic rozkładu F Snedecora, wyznaczenie dla konkretnych wartości liczby N obserwacji i liczby współczynników funkcji regresji $K + 1$ wartości krytycznej F_{kr} o K współczynnikach regresji w danym kroku i $N - K - 1$ stopniach swobody.

Dla przyjętego poziomu istotności α – prawdopodobieństwo pojawienia się wartości mniejszej wynosi $1 - \alpha$ (4.7):

$$P(F_{N-K-1}^K \leq F_{kr}) = 1 - \alpha \quad (4.7)$$

gdzie:

N – liczba prób,

K – liczba współczynników regresji w danym kroku.

Porównanie obliczonej wartości F z wartością krytyczną F_{kr} z tablic pozwala wnioskować o istotności funkcji regresji. Jeśli $F > F_{kr}$, to poziom ufności określa ryzyko wystąpienia błędu. Natomiast, gdy $F < F_{kr}$, to funkcje regresji traktuje się jako nieistotną.

Istotność poszczególnych czynników równania regresji oblicza się stosując rozkład t Studenta. Postępowanie jest analogiczne do postępowania w przypadku rozkładu F Snedecora. O istotności danego czynnika równania regresji świadczy obliczeniowa wartość funkcji t spełniająca nierówność (4.8):

$$t \geq t_{kr(N-K-1, \alpha)} \quad (4.8)$$

Dla przeprowadzonych prób przyjęto poziom ufności dla 0,1. Wartości rozkładów t Studenta i F Snedecora wynoszą odpowiednio dla $K = 2$ i $N = 15$:

$$F_{kr}(12; 2; 0,1) = 2,81$$

$$t_{kr}(12; 0,1) = 1,7823$$

oraz dla $K = 2$ i $N = 9$ w przypadku elektrody napylonej:

$$F_{kr}(6; 2; 0,1) = 3,46$$

$$t_{kr}(6; 0,1) = 1,9432.$$

Współczynniki korelacji między grubością warstwy białej, a zmiennymi niezależnymi odczytane z macierzy korelacji dla kolejnych materiałów elektrod zestawiono w tabeli 29.

Tabela 29. Współczynniki korelacji odczytane z macierzy korelacji

G_{wb}	I	t_i
X10CrNi18-8 (1H18N9)	0,56161	0,47790
wolframowa	0,49324	0,37943
węglik spiekane	0,62069	0,59392
elektroda napylona	-0,06084	0,82969

Macierz korelacji informuje o zależnościach poszczególnych danych wyjściowych od danych wejściowych. Wielkość tego współczynnika pokazuje, w jakim stopniu dany parametr oddziałuje na wynik obróbki. Wartości zbliżone do 1 świadczą o wysokim stopniu korelacji i znaczeniu zależności.

Z analizy testu F Snedecora wynika, że dla określonego poziomu ufności określającego ryzyko błędu funkcje regresji będą funkcjami z punktu widzenia analizy statycznej istotnymi. Jednocześnie zauważamy, że niektóre współczynniki (test t Studenta) ze względu na niespełnienie zależności $t \geq t_{kr}$ będą nieistotne.

Dla każdego materiału elektrody zostały wyznaczone równania regresji opisujące zależność stałych wejściowych z wydajnością obróbki. W równaniach został zastosowany opisany już w tym rozdziale model wykładniczy. Obliczenia statystyczne wykonano dla prób stopowania elektroiskrowego stali C45 elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9).

Poniższe wyliczenia to część krokowej regresji wielokrotnej, przeprowadzonej w celu obliczenia statystycznych zależności G_{wb} od prądu impulsu I oraz czasu tego impulsu t_i dla elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9) stopowanej na powierzchnię próbki ze stali C45 w ośrodku nafty.

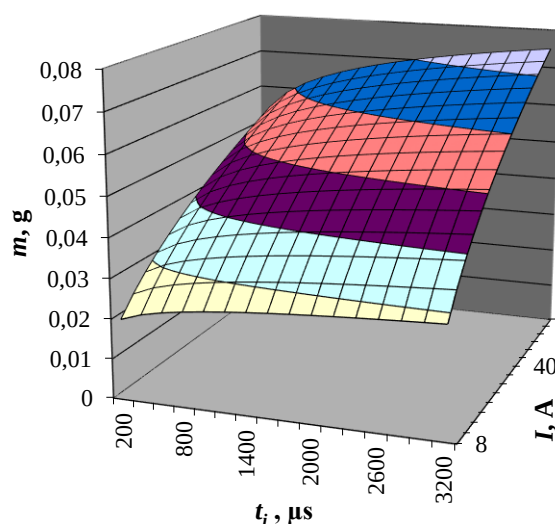
Dane wejściowe: I [A], t_i [μ s];

Dane wyjściowe: Δm , G_{WB} , HV_{WB} , HV_{SWC} .

TABLICA RESZT REGRESYJNYCH

NR.POMIARU	WARTOSC Y	ESTYMACJA Y	RESZTA
1	.78846	.30058	.48788
2	1.16315	.58717	.57598
3	.99325	.87376	.11949
4	-.51083	.72787	-1.23869
5	.87547	1.01446	-.13899
6	.64185	1.30105	-.65920
7	.99325	1.15516	-.16191
8	.91629	1.44175	-.52546
9	1.68640	1.72834	-.04194
10	.74194	.44128	.30066
11	1.72277	1.58764	.13512
12	.87547	.15988	.71559
13	3.54096	1.86904	1.67192
14	.00000	1.01446	-1.01446
15	.78846	1.01446	-.22600

$$G_{wb}(I, t) = e^{-3,45855} \cdot I^{0,61645} \cdot t^{0,41346} \quad (4.9)$$



Rys. 4.82. Graficzna ilustracja 3D opisanego równania regresji dotyczącego korelacji zmiany masy próbek m , g z natężeniem prądu impulsu I , A i czasem trwania impulsu t_i , μs . Elektroda X10CrNi18-8 (1H18N9) stopowana na stal 45 w środowisku nafty, obrabiarka ROBOFORM 30

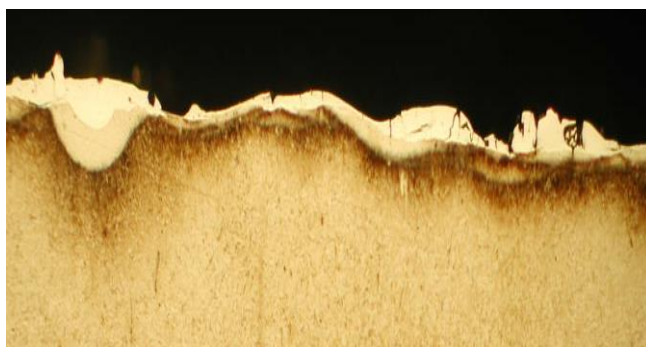
Z graficznej ilustracji 3D analizy statystycznej wpływu I oraz t_i na grubość warstwy białej przy stopowaniu elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) wynika, że jej przyrost następuje (podobnie, jak wynika to z wykresów wyników badań), gdy rośnie prąd impulsu oraz wydłuża się czas impulsu.

4.5.4. Badania stanu warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą monolityczną

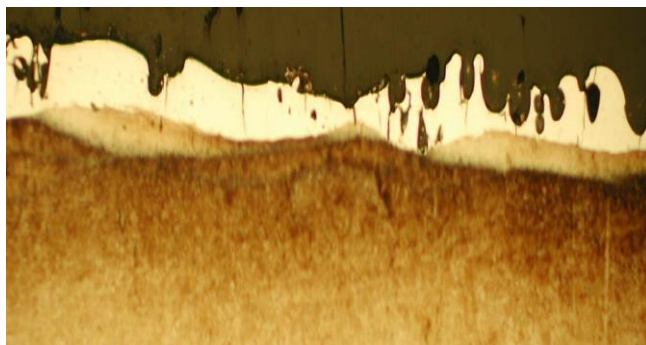
Poniżej fotografie mikrostruktury metalograficznej wybranych próbek po stopowaniu elektroiskrowym wykonane na mikroskopie optycznym z przystawką do aparatu cyfrowego.

Zgłady były wykonane prostopadle do obrabianej powierzchni, dzięki czemu uzyskano przekrój przez powstałe w stopowaniu elektroiskrowym warstwy. Stopowany materiał to stal C45, elektroda X10CrNi18-8 (1H18N9), dielektryk – nafta. Parametry dobrane według eksperymentu planowanego (tabela 26).

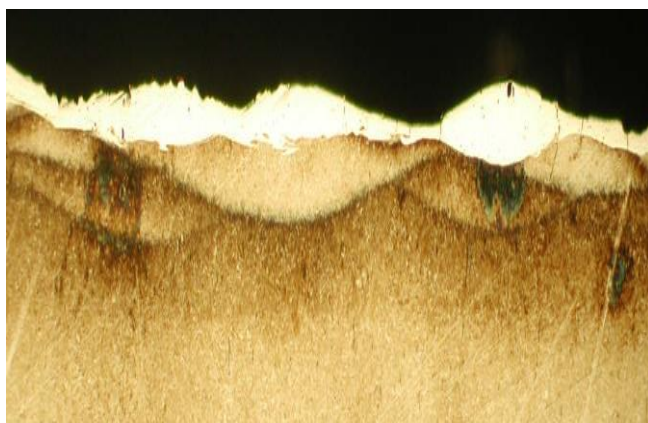
Zestawienie wyników badań dla elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9)



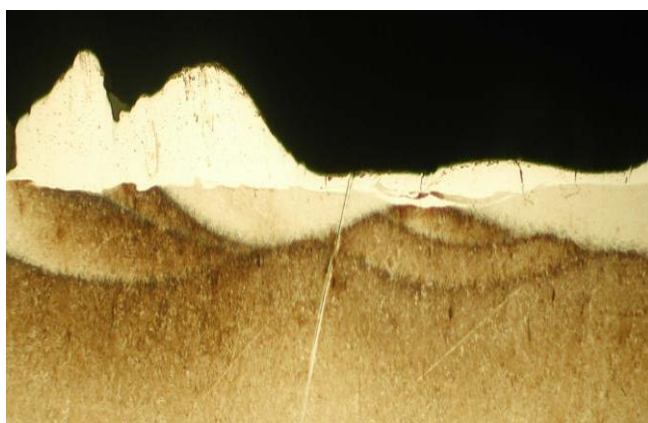
Rys. 4.83. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 18L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32$ A, $t_i = 25$ μ s, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 27$ μ m; powiększenie x100



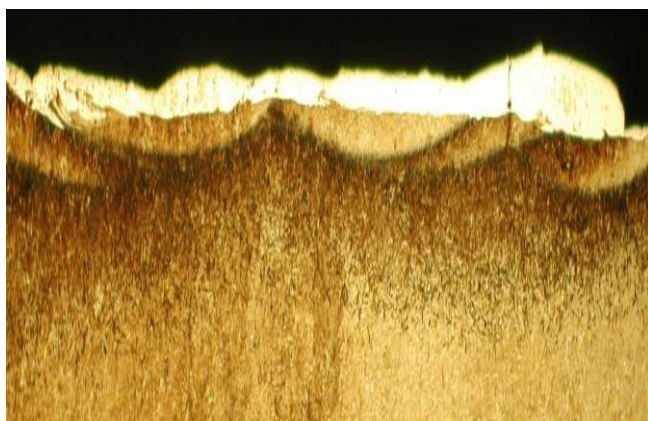
Rys. 4.84. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 17L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 48$ A, $t_i = 400$ μ s, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 58$ μ m; powiększenie x100



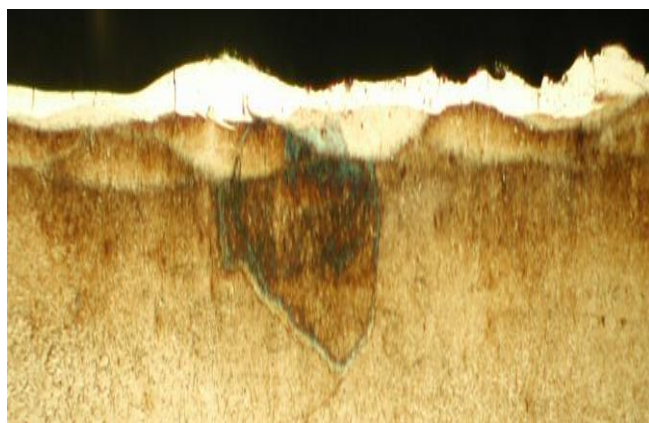
Rys. 4.85. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 15P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 36 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



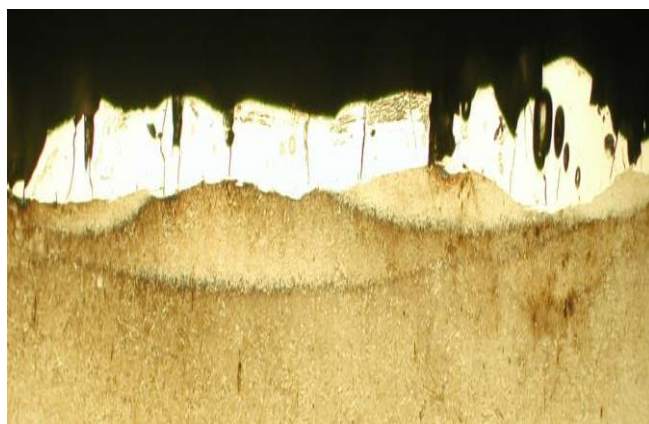
Rys. 4.86. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 16L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 49 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



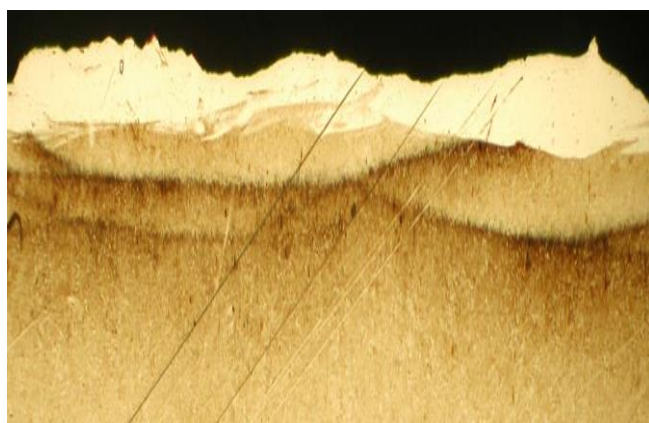
Rys. 4.87. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 21P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 45 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



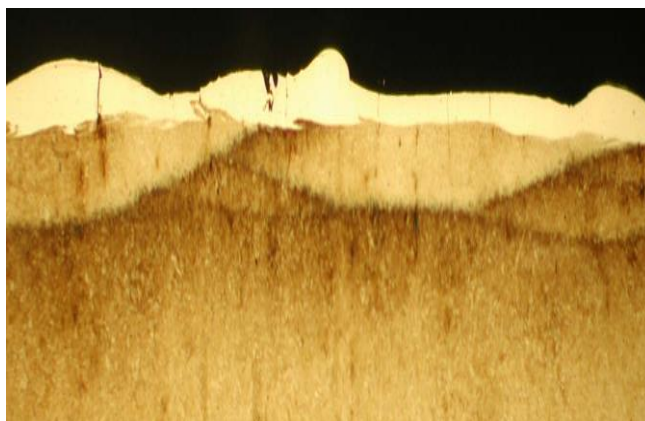
Rys. 4.88. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 20L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 39 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.89. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 20P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 64 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 39 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$

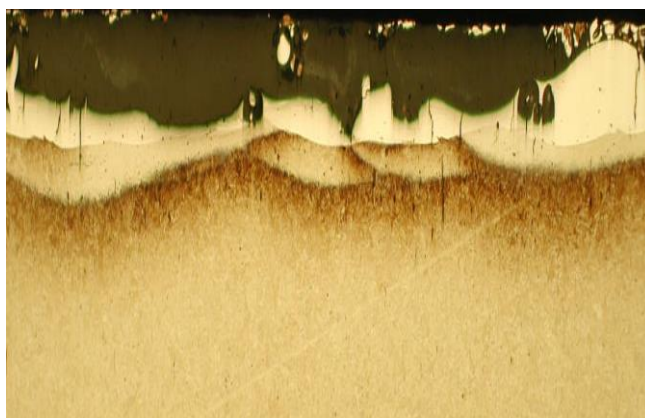


Rys. 4.90. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 18P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 98 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.91. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 19P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 32$ A, $t_i = 3200$ μ s, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 50$ μ m; powiększenie x100

Na rysunku (rys. 4.92) przedstawiono fotografię zglądu poprzecznego próbki stopowanej elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) przy użyciu funkcji SPIN.

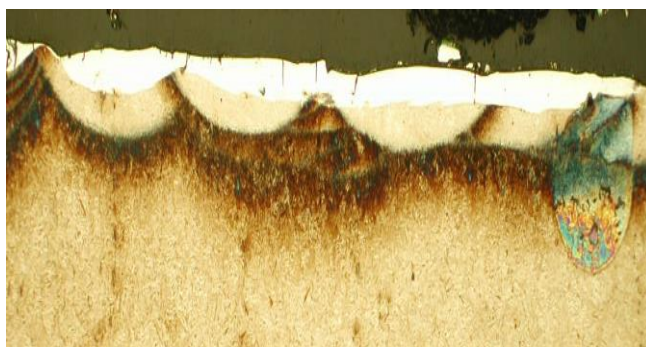


Rys. 4.92. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 44P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) z użyciem funkcji SPIN w środowisku nafty; $I = 32$ A, $t_i = 400$ μ s, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 59$ μ m; powiększenie x100

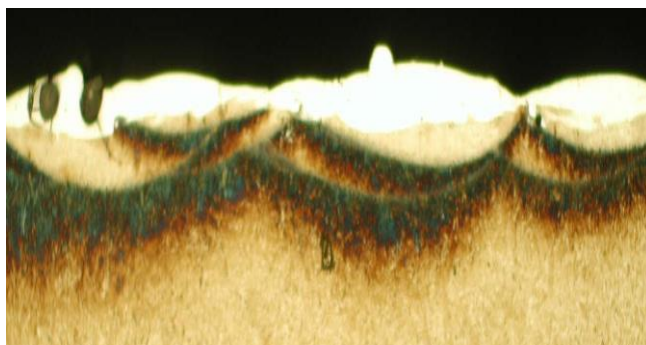
Analizując powyższe fotografie zglądów metalograficznych próbek stali C45 stopowanych elektrodą X10CrNi18-8 (1H18N9) można zauważyć, że istnieje zależność grubości warstwy białej od parametrów prądowych. Stosowanie krótkich czasów impulsu daje warstwę białą o niewielkiej grubości, niejednorodną (wtrącenia pierwiastków i zanieczyszczeń) i niejednorodną (rys. 4.83). Zwiększenie czasu impulsu powoduje wzrost grubości tej warstwy. Wydłużenie czasu impulsu t_i przy jednoczesnym zwiększeniu natężenia prądu skutkuje powstaniem grubszej warstwy białej. Warstwa charakteryzuje się jednak licznymi pęknięciami i nieregularną krawędzią (wykruszenia, wgłębienia) (rys. 4.84, rys. 4.89).

Zestawienie wyników badań dla elektrody wolframowej

Przekrój poprzeczny przez próbkę stali C45 stopowanej elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty. Parametry dobrane według eksperymentu planowanego dwuczynnikowego pięciopoziomowego (tabela 26).



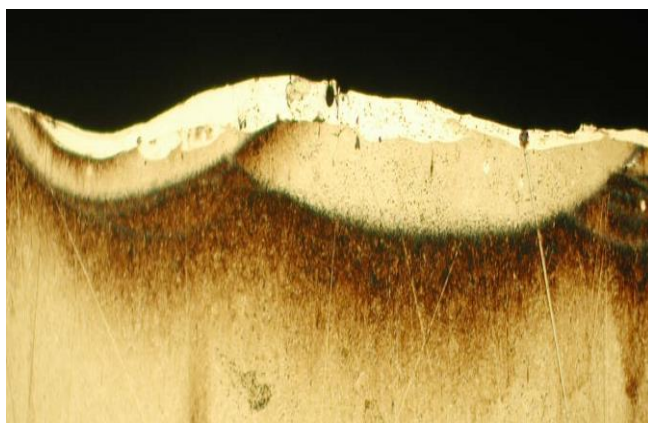
Rys. 4.93. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 27L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 16 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 36 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



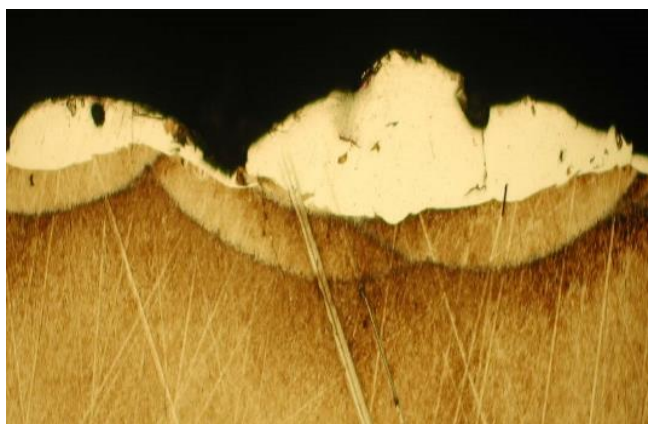
Rys. 4.94. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 29L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 49 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



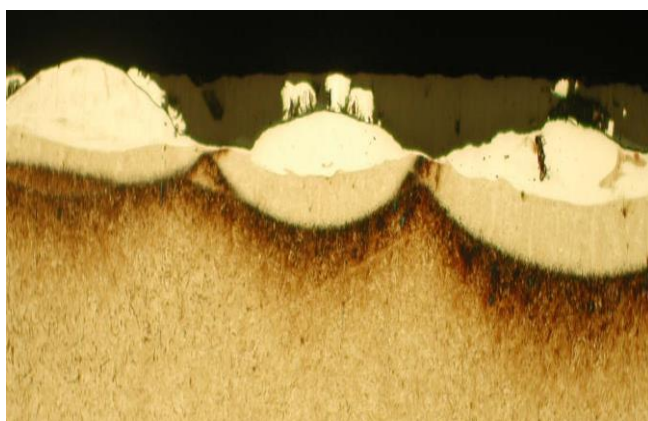
Rys. 4.95. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 30L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 44 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



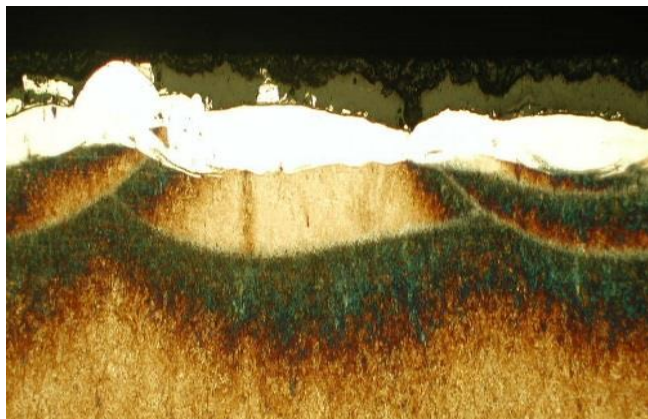
Rys. 4.96. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 30P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 64 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



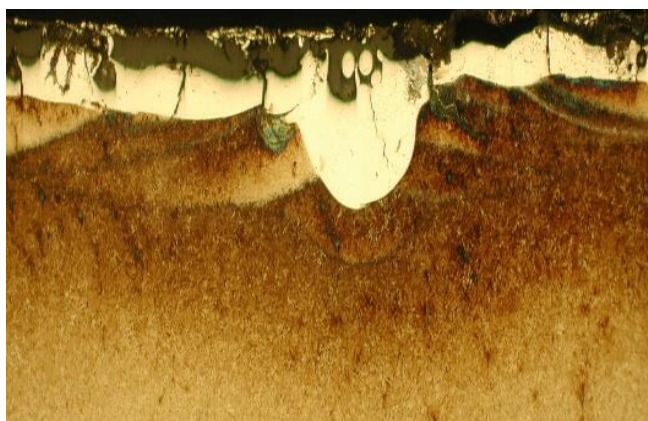
Rys. 4.97. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 24P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 59 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



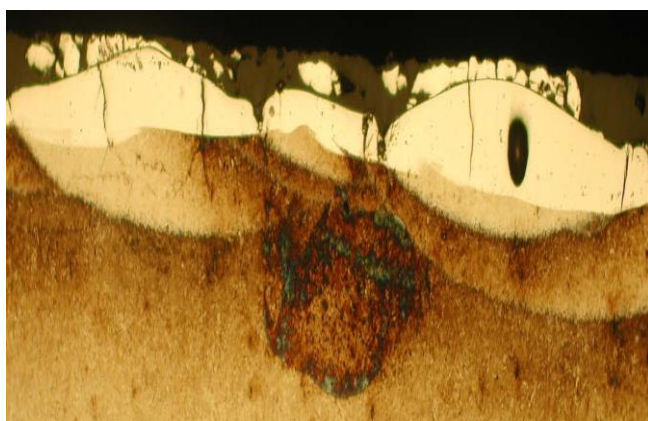
Rys. 4.98. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 28L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 71 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



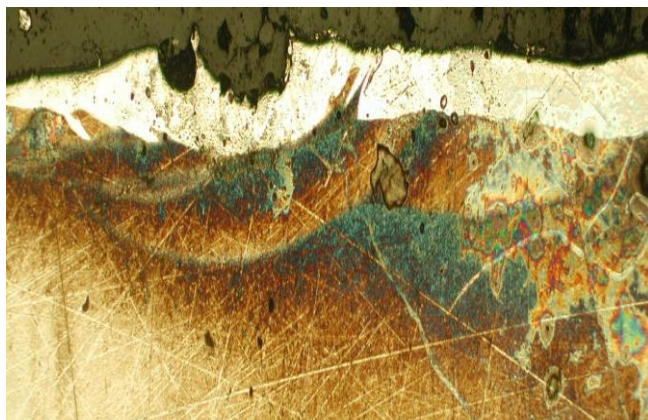
Rys. 4.99. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 25L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 55 \mu\text{m}$; powiększenie x100



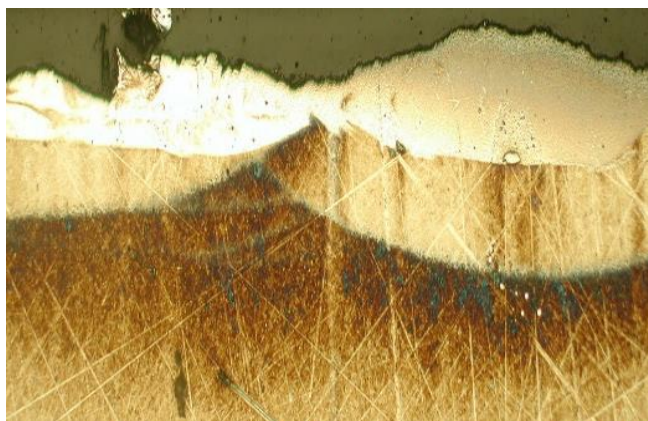
Rys. 4.100. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 28P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 64 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 85 \mu\text{m}$; powiększenie x100



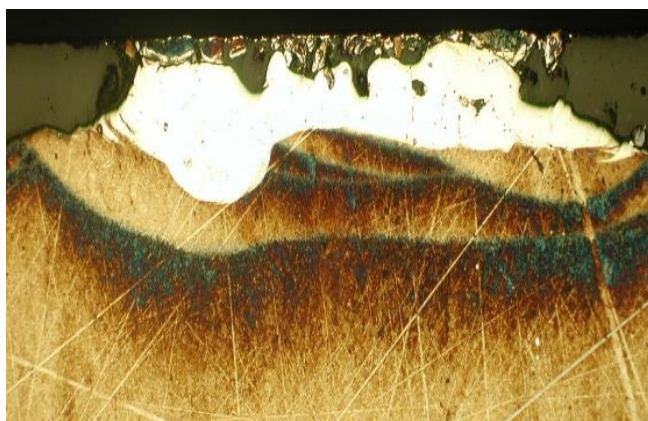
Rys. 4.101. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 24L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 77 \mu\text{m}$; powiększenie x100



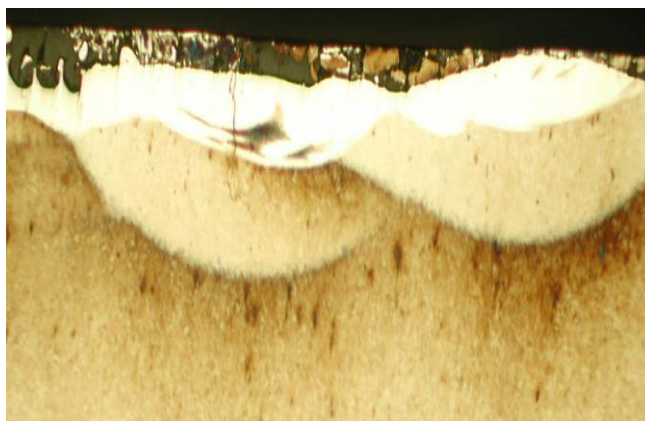
Rys. 4.102. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 26P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 97 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.103. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 26P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 97 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.104. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 26P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 97 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$

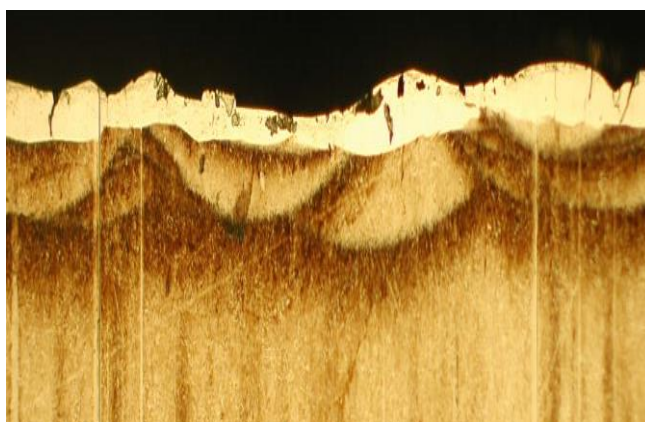


Rys. 4.105. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 27P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą wolframową w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 3200 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 89 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$

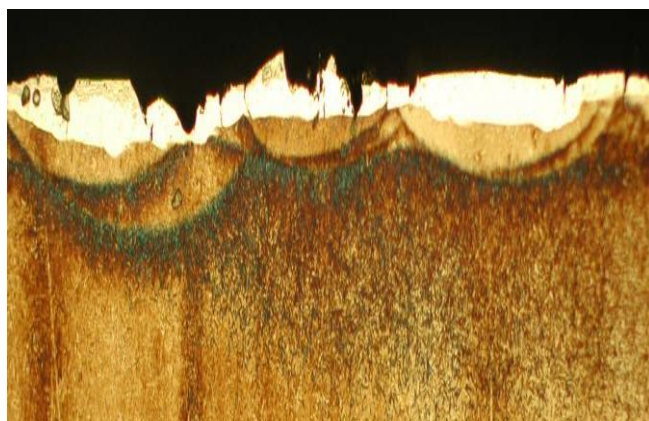
W stopowaniu elektroiskrowym elektrodą wolframową otrzymaliśmy warstwy białe o średniej grubości większej niż w przypadku zastosowania elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9). Warstwy te są również niejednorodne. Występują w nich liczne pęknięcia. Strefa wpływów cieplnych jest wyraźnie zarysowana, a jej zasięg jest tym większy, im dłuższy jest czas impulsu. W przypadku krótkich np. $t_i = 400 \mu\text{s}$ czasów impulsów widoczne jest oddziaływanie wyładowań iskrowych w postaci „łódek”.

Zestawienie wyników badań dla elektrody z węgla spiekanego wolframu

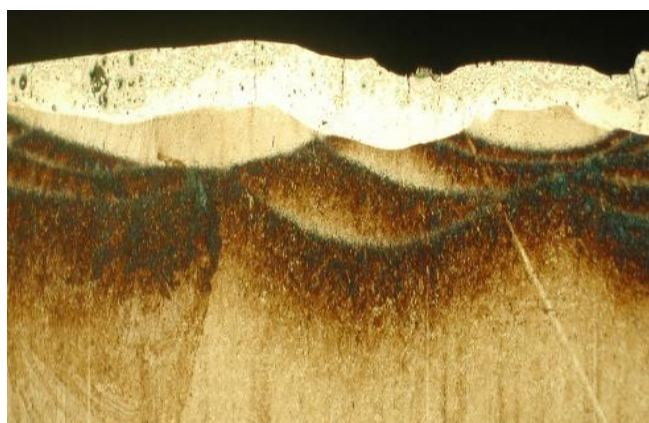
Przekrój poprzeczny przez próbkę ze stali C45 stopowanej elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty. Parametry stopowanych próbek dobrane są według eksperymentu planowanego dwuczynnikowego pięciopoziomowego (tabela 26).



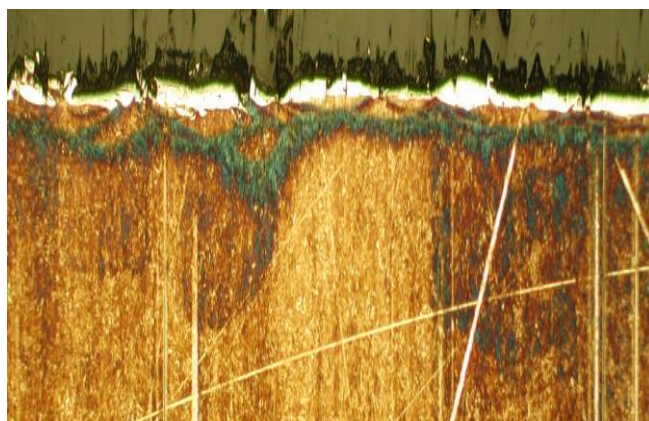
Rys. 4.106. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbką 31P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 41 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



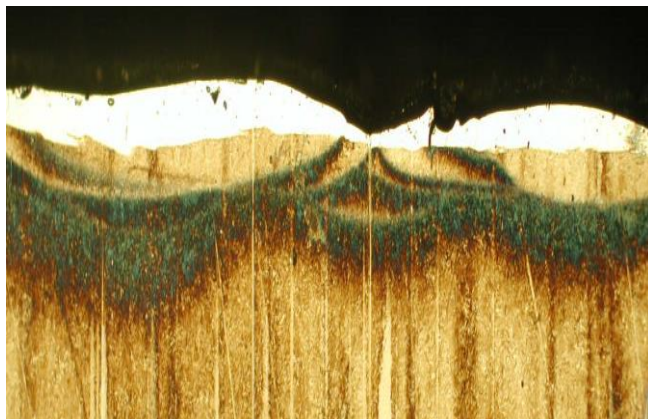
Rys. 4.107. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 31L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 28 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



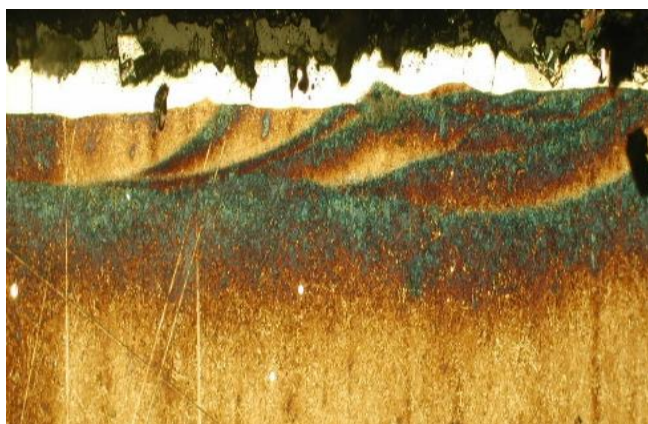
Rys. 4.108. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 32P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 24 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 74 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.109. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 35L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 25 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 19 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.110. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 33P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 51 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.111. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 33L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 78 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



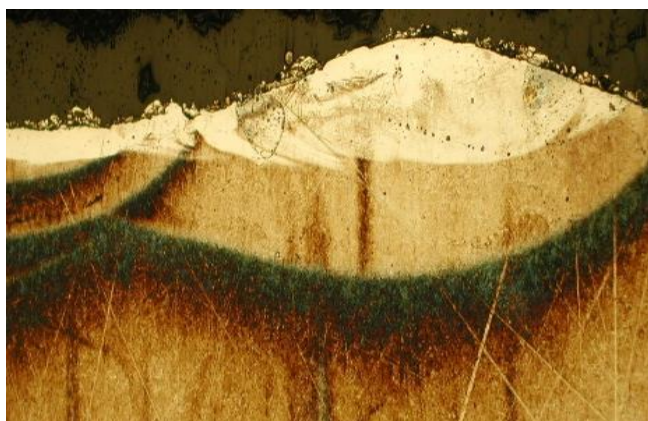
Rys. 4.112. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 36P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 3200 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 69 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



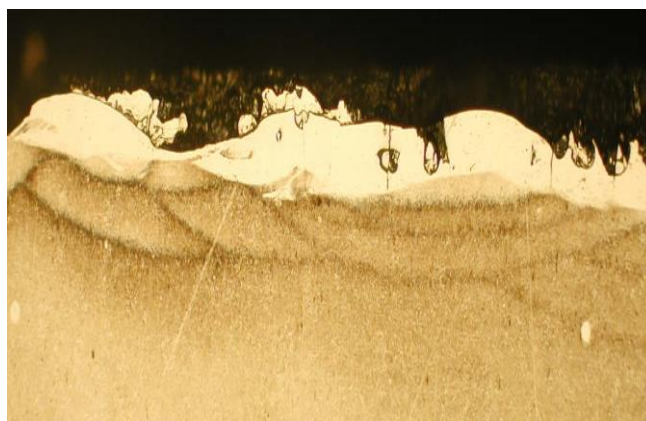
Rys. 4.113. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 34P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 100 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 60 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.114. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 34L: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 50 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$



Rys. 4.115. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 35P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węgla spiekanego wolframu w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 80 \mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$

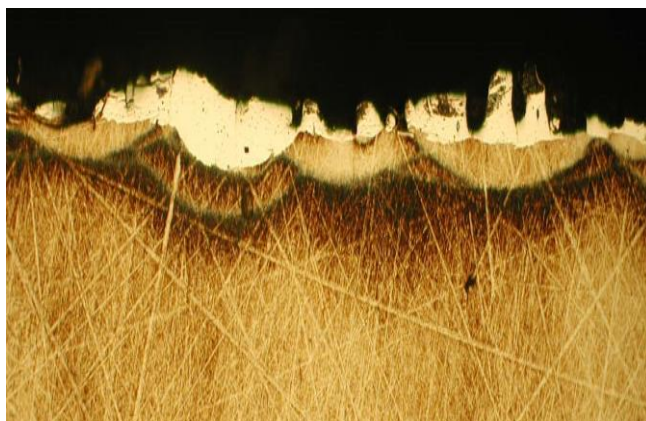


Rys. 4.116. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 37P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą z węglików spiekanych wolframu w środowisku nafty; $I = 64 \text{ A}$, $t_i = 400 \text{ }\mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 84 \text{ }\mu\text{m}$; powiększenie $\times 100$

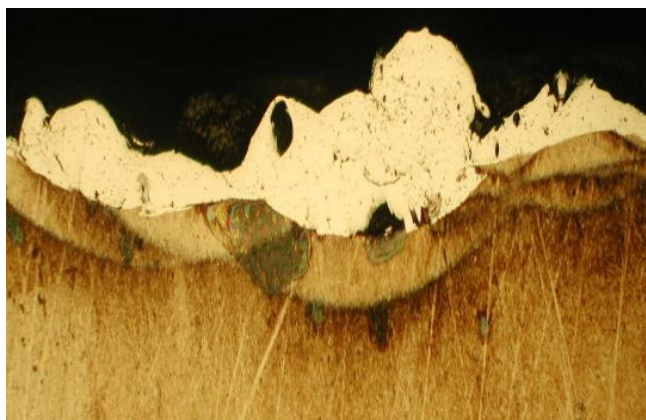
Analiza fotografii mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego stali C45 stopowanej elektrodą z węglików spiekanych również potwierdza, że grubość warstwy białej rośnie wraz z wydłużeniem czasu impulsu t_i . Fotografie ilustrują wyniki stopowania przeprowadzonego w warunkach tej samej wartości natężenia prądu przy różnych czasach impulsu. Ich analiza wskazuje, że wraz ze wzrostem t_i następuje wzrost grubości warstwy białej. Warstwę białą o najmniejszej grubości uzyskiwano w warunkach stopowania prądem $I = 32 \text{ A}$ przy czasie impulsu $t_i = 25 \text{ }\mu\text{s}$. Jest to warstwa niejednorodna o średniej grubości $G_{wb} = 19 \text{ }\mu\text{m}$. Prąd impulsu również ma wpływ na grubość warstwy białej, co widać po średnich grubościach WB osiągających dla prądu $I = 64 \text{ A}$ i czasu impulsu $t_i = 400 \text{ }\mu\text{s}$ wartości $G_{wb} \approx 84 \text{ }\mu\text{m}$.

Zestawienie wyników badań dla elektrody mosiężnej napylonej węglikiem wolframu

Fotografię mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego stali C45 stopowanej elektroiskrowo elektrodą mosiężną napyloną węglikiem wolframu w środowisku nafty przedstawiono na rys. 4.117. Parametry do stopowania próbek wybrane zostały z eksperymentu planowanego dwuczynnikowego pięciopoziomowego (tabela 26).



Rys. 4.117. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 43P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą mosiężną napyłoną węglikiem wolframu w środowisku nafty; $I = 16 \text{ A}$, $t_i = 400 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 51 \mu\text{m}$; pow. $\times 100$



Rys. 4.118. Fotografia mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego. Próbka 41P: stal C45 stopowana elektroiskrowo elektrodą mosiężną napyłoną węglikiem wolframu w środowisku nafty; $I = 32 \text{ A}$, $t_i = 800 \mu\text{s}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 100 \mu\text{m}$; pow. $\times 100$

Analiza fotografii mikrostruktury metalograficznej zglądu poprzecznego po stopowaniu elektrodą napyłoną węglikiem wolframu daje potwierdzenie dla związku grubości warstwy białej ze wzrostem czasu impulsu oraz wartości natężenia prądu. Dla podwojonej wartości parametrów, którymi stopowano próbkę z fotografii na rys. 4.117 uzyskano dwukrotnie większą średnią grubość warstwy białej (rys. 4.118).

Jak można zaobserwować na zdjęciach zglądów przekrojów poprzecznych, stopowanie z zastosowaniem małych parametrów prądowych (krótki czas impulsu) oraz małego natężenia prądu daje w większości przypadków warstwę białą relatywnie cienką, niejednorodną. Podczas obróbki z dłuższym czasem impulsu uzyskiwane warstwy są grubsze z tendencją do występowania mikropęknięć.

Podsumowanie badań metalograficznych WW po stopowaniu elektroiskrowym:

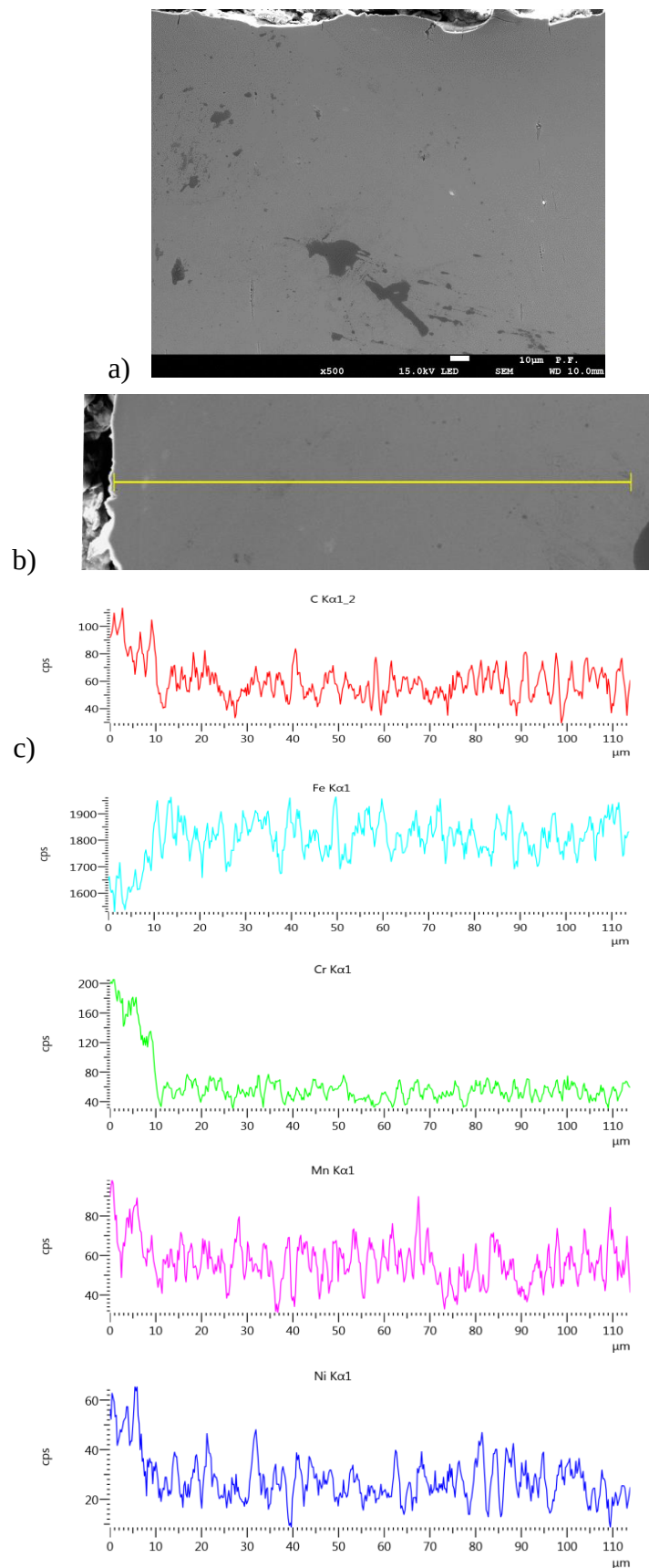
- wydłużenie czasu impulsu t_i powoduje wzrost grubości warstwy białej,
- wzrost wartości natężenia prądu impulsu I wpływa na wzrost G_{wb} ,
- wydłużenie czasu impulsu prądowego generuje powstawanie pęknięć w warstwie stopowanej.

4.5.5. Wyniki analizy składu chemicznego w warstwie wierzchniej po stopowaniu elektrodą monolityczną

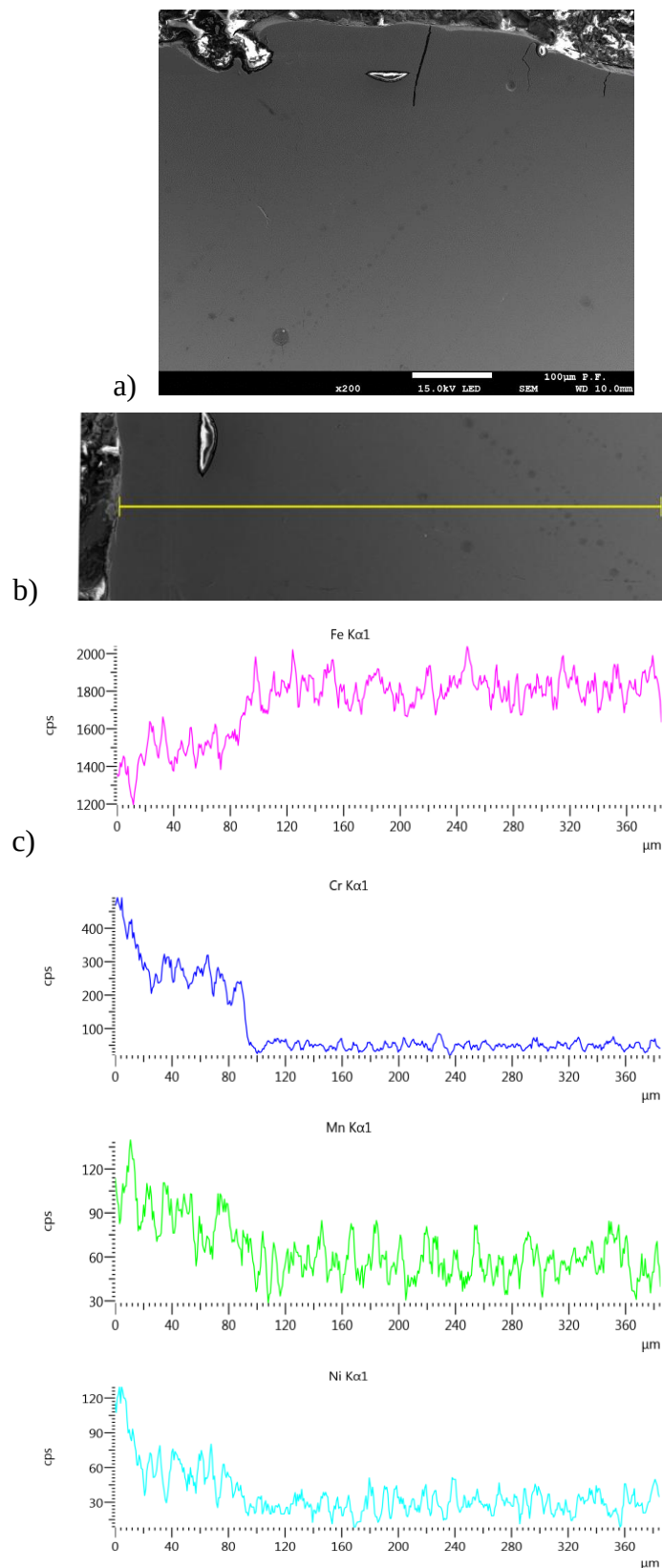
Badania składu chemicznego modyfikowanych warstw poprzedzono przygotowaniem zglądów metalograficznych.

Badania składu chemicznego warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodą monolityczną przeprowadzono metodą mikroanalizy rentgenowskiej. Na rysunkach (rys. 4.119, rys. 4.120, rys. 4.121) przedstawiono przykładową mikrostrukturę metalograficzną WW z zaznaczoną linią wzdłuż której wykonano mikroanalizę EDS składu chemicznego próbki wraz z rozkładem zawartości podstawowych pierwiastków stopowych, tj. węgiel, żelazo, chrom, mangan, nikiel itd. Badanie składu chemicznego wykonano prostopadle do obrabianych powierzchni. Początki wykresów odpowiadają powierzchni próbki, a oś X reprezentuje odległość od powierzchni do rozpatrywanego punktu WW. Każdorazowo przeprowadzona analiza liniowa rozkładu pierwiastków obejmowała warstwę zmodyfikowaną oraz materiał rodzimy.

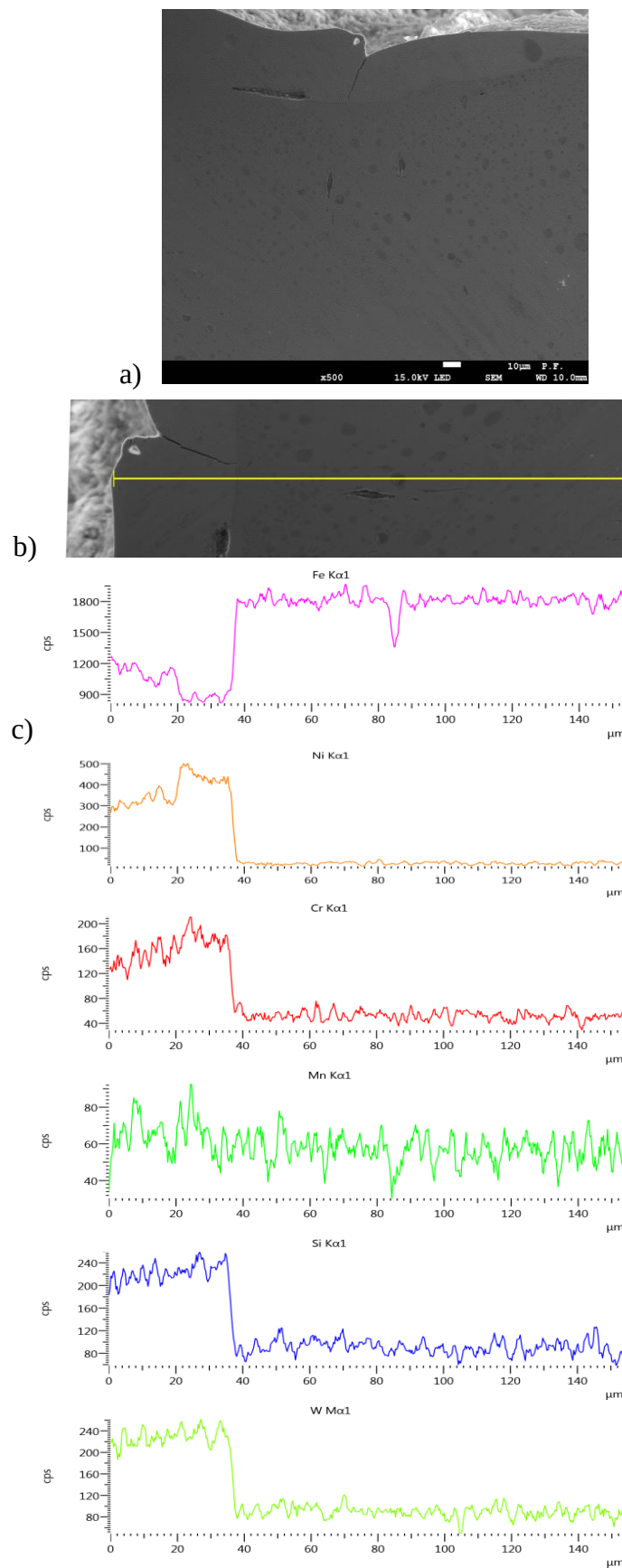
Rys. 4.119 przedstawia wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym elektrodą monolityczną X10CrNi18-8 dla parametrów obróbki $I = 32$ A, $t_i = 25\mu s$, czas obróbki 5 min, a na rys. 4.120 dla parametrów obróbki $I = 48$ A, $t_i = 1600\mu s$, czas obróbki 5 min. Na rys. 4.121 przedstawiono efekty stopowania elektrodą monolityczną napyłaną węglikiem wolframu (WC) – parametry procesu $I = 16$ A, $t_i = 400\mu s$, czas obróbki 1,5 min. Badania przeprowadzono w środowisku nafty.



Rys. 4.119. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego warstwy wierzchniej próbki (stal C45) po stopowaniu elektrodą monolityczną X10CrNi18-8 (1H18N9T) w środowisku nafty, $I = 32$ A, $t_i = 25$ µs, czas obróbki 5 min; a) mikrofotografia SEM struktury metalograficznej warstwy wierzchniej próbki, b) linia próbkowania podczas mikroanalizy rentgenowskiej, c) rozkład zawartości węgla, żelaza, chromu, manganu i niklu



Rys. 4.120. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego warstwy wierzchniej próbki: stal C45 po stopowaniu elektrodą monolityczną X10CrNi18-8 (1H18N9) w środowisku nafty; $I = 48 \text{ A}$, $t_i = 1600 \text{ μs}$, czas obróbki 5 min, $G_{wb} = 100 \text{ μm}$; a) mikrofotografia SEM struktury metalograficznej warstwy wierzchniej próbki, b) linia próbkowania podczas mikroanalizy rentgenowskiej, c) rozkład zawartości: żelaza, chromu, manganu i niklu



Rys. 4.121. Wyniki mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego warstwy wierzchniej próbki (stal C45) po stopowaniu elektrodą monolityczną napylaną WC, $I = 16$ A, $t_i = 400$ μ s, czas obróbki 1,5 min; a) mikrofotografia SEM struktury metalograficznej warstwy wierzchniej próbki, b) linia próbkowania podczas mikroanalizy rentgenowskiej, c) rozkład zawartości żelaza, niklu, chromu, manganu, krzemu, wolframu

Analiza wyników badań składu chemicznego powierzchni, uzyskanych na podstawie rozkładu spektralnego poszczególnych pierwiastków w warstwie modyfikowanej, wskazuje na znaczące podwyższenie ich koncentracji w odniesieniu do składu materiału rodzimego (podłoża).

Powierzchnia po stopowaniu z zastosowaniem elektrod monolitycznych jest regularna, typowa jak dla obróbki elektroerozyjnej, w niektórych przypadkach powstają nieliczne mikropęknięcia na powierzchni obrabianej.

W przypadku procesu stopowania elektroiskrowego elektrodą monolityczną wykonaną ze stali X10CrNi18-8 (1H18N9) w ośrodku międzyelektrodowym w postaci nafty można stwierdzić, że grubość warstwy zmienionej zależna jest od parametrów obróbki. Dla zadanej wartości natężenia prądu $I = 32$ A, czasu impulsu $t_i = 25$ μ s i czasu obróbki 5 min, uzyskano zmiany składu chemicznego warstwy wierzchniej sięgające 15 μ m. Dla warunków stopowania $I = 48$ A, $t_i = 1600$ μ s grubość warstwy zmienionej osiągnęła wartość 90 μ m.

Na podstawie analizy uzupełnionej obserwacjami mikrofotografii SEM struktur metalograficznych warstw po stopowaniu można stwierdzić, że grubość uzyskiwanych warstw mieści się w przedziale 15 – 90 μ m i jest ona zależna od warunków stopowania.

Analizując przebiegi rozkładów zawartości chromu i niklu, w przypadku modyfikacji warstwy wierzchniej elektrodą monolityczną ze stali X10CrNi18-8 można zaobserwować strefę powstałą w wyniku wymieszania pierwiastków stopowych z materiałem podłoża będących w stanie ciekłym o dużej zawartości pierwiastków modyfikujących oraz strefę dyfuzyjną, charakteryzującą się łagodnym spadkiem ich zawartości w miarę zwiększania głębokości ocenianej warstwy, aż do osiągnięcia składu chemicznego podłoża.

W przypadku stopowania z wykorzystaniem jako materiału elektrody roboczej węgla wolframu, dla zadanej wartości natężenia prądu $I = 16$ A, czasu impulsu $t_i = 400$ μ s i czasu obróbki 1,5 min obserwuje się na wykresie rozkładu pierwiastków w warstwie modyfikowanej zmiany sięgające 40 μ m. Podobnie jak w powyżej analizowanym przypadku występuje obszar wymieszania pierwiastków w fazie ciekłej, natomiast procesy dyfuzyjne, zwłaszcza w przypadku wolframu są ograniczone. W tym przypadku nie obserwuje się rozległej warstwy dyfuzyjnej wolframu w konstytuowanej warstwie, osiąga ona wartość na poziomie 5 μ m.

4.6. Wnioski

1. Zastosowanie elektrod monolitycznych daje możliwość automatyzacji procesu stopowania.
2. Stopowanie elektroiskrowe daje możliwość uzyskania warstw wierzchnich będących alternatywą dla innych droższych metod modyfikowania składu chemicznego warstw wierzchnich.
3. Efektami obróbki EDA można sterować przez odpowiedni dobór parametrów prądowych.
4. Parametry prądowe obróbki mają duży wpływ zarówno na jakość otrzymywanej powierzchni, jak również na grubość WW.
5. Wraz ze wzrostem czasu impulsu wyładowania t_i , wzrasta grubość warstwy stopowanej.
6. Stosowanie dłuższych czasów impulsów powoduje mniejszy ubytek masy o wartości rzędu: 0,0023 g dla elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9) oraz o około 0,0005 g dla elektrod wolframowej i z węglików spiekanych przy zmianie czasu trwania impulsu od 100 do 1600 μs .
7. Wzrost wartości natężenia prądu impulsu I wpływa na zwiększenie grubości warstwy stopowanej.
8. Stosowanie długich czasów trwania impulsów t_i (powyżej 1600 μs) powoduje powstawanie pęknięć w warstwie stopowanej, które niekorzystnie wpływają na właściwości eksploatacyjne stopowanych części.
9. Zwiększenie wartości prądu impulsu I powoduje większy transport masy z elektrody na przedmiot obrabiany.
10. Zwiększenie wartości prądu impulsu wpływa na zwiększenie udziału wagowego pierwiastków elektrody w stopowanej warstwie.
11. Parametry prądowe w badanym zakresie wartości nie mają istotnego wpływu na chropowatość powierzchni.
12. Mikrotwardość w warstwie stopowanej jest większa od mikrotwardości rdzenia stopowanego materiału i zależy głównie od materiału elektrody.

5. WNIOSKI O CHARAKTERZE UTYLITARNYM I POZNAWCZYM

Analizując wyniki przeprowadzonych badań, porównując różne parametry procesu obróbki oraz uwzględniając poszczególne metody stopowania, a także występujące problemy w trakcie badań określono następujące wnioski końcowe:

1. Stopowanie elektroiskrowe stali to tańsza alternatywa dla modyfikacji przedmiotu obrabianego poprzez przetopienie masy elektrody roboczej i materiału rodzimego w warstwie wierzchniej.
2. Dodatkowe wykorzystanie obrabiarek (głównie elektrodrążarek) ze względu na ich charakterystykę pracy (kinematyka, generator) poprzez prostą zmianę biegunowości zasilania elektrod do procesu stopowania.
3. Wykonanie prostej modyfikacji elektrodrążarki poprzez zastosowanie określonej przystawki lub wykonanie prostego urządzenia do stopowania elektrodą szczotkową, może znacznie obniżyć koszt wykonania określonego elementu maszyny lub narzędzia.
4. W celu osiągnięcia optymalnych wyników procesu stopowania preferowane są urządzenia posiadające szeroki zakres regulacji i dużą dokładność elektrycznych nastaw parametrów obróbki (generator).
5. Wytwarzane poszczególnymi metodami stopowania warstwy odznaczają się bardzo dobrym związaniem z podłożem.
6. Efektywny transport masy anody możliwy jest tylko przy stosowaniu wyładowań o wysokiej energii.
7. Poszczególne metody stopowania pozwalają uzyskać warstwę przetopioną o grubości od kilkudziesięciu do kilkuset μm , w której zawarte są materiały zarówno anody, jak i katody.
8. Możliwość uzyskania kilkukrotnie wyższych mikrotwardości w WW niż w rodzimym materiale przedmiotu obrabianego.
9. Struktura geometryczna powierzchni po procesie stopowania z wysoką losowością wyładowań cechuje się wysoką chropowatością i falistością powierzchni, co powoduje konieczność stosowania dalszej obróbki w postaci szlifowania.
10. Najbardziej wydajną obróbką jest metoda stopowania elektrodą kształtową, która łączy w sobie możliwość stopowania jednocześnie dużej powierzchni, jak i stosowania różnych materiałów anody. Ograniczenie to dotyczy metody elektrodą szczotkową, ze względu na trudność uzyskania drutów z określonych materiałów oraz metody wibracyjnej, ze względu na sterowanie ręczne i ograniczone możliwości generatora.

11. Optymalne parametry procesu obróbki uzyskane przy stopowaniu elektrodą szczotkową to prąd wyładowania o wartości 16 A i czasie impulsu 900 μ s. Są to parametry, przy których zachodzi efektywny transport masy anody, a jednocześnie zachowana jest spójność warstwy białej (brak widocznych pęknięć i nierówności warstwy).
12. Zauważalne jest większe zużycie elektrody szczotkowej zarówno X10CrNi18-8 (1H18N9), jak i wolframowej w porównaniu do elektrod monolitycznych, co związane jest z topieniem elektrody, jak i zużyciem mechanicznym.
13. Przy stosowaniu elektrody kształtowej, optymalne parametry obróbki uzyskano przy podobnych wartościach prądu wyładowania i czasie impulsu tj. 16 A i 800 μ s, uzyskując pewną grubość warstwy przetopionej o łagodnej i spójnej powierzchni.
14. Stosowanie większych wartości prądów wyładowania poprawia wydajność obróbki, jeśli chodzi o większy transport masy anody, lecz pogarsza właściwości warstwy stopowanej w postaci pojawiającej się dużej liczby pęknięć i kraterów.
15. Zastosowanie metody stopowania elektrodą wibracyjną może mieć uzasadnienie w przypadkach stopowania małych i trudnodostępnych powierzchni oraz małej ilości przedmiotów obrabianych.
16. Proces stopowania w wymienionych metodach jest wrażliwy na parametry obróbki, a zatem konieczne jest dobranie i stosowanie odpowiednich warunków obróbki dotyczących zarówno kształtu elektrody, jak i parametrów elektrycznych procesu w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań.

SPIS LITERATURY

1. ABBAS N. M., KUNIEDA M.: Increasing discharge energy of micro-EDM with electrostatic induction feeding method through resonance in circuit. *Precision Engineering*, vol. 45, 2016, 118-125.
2. ADAMCZAK S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość, WNT, Warszawa 2008.
3. Agie Charmilles, GF: New methods to reduce cost and improve performance; <http://us.gfac.com/newsroom/press/files/AerospaceMIB.pdf>.
4. ALBIŃSKI K.: The Polarity of Electrodes in Electro-Discharge Machining. *Proc. ISEM - XI, Lausanne 1995*, 95-104.
5. ALBIŃSKI K., MUSIOŁ K., MIERNIKIEWICZ A., ŁABUZ S., MAŁOTA M.: The temperature of a plasma used in electrical discharge machining. *Plasma Sources Science and Technology* 1996, 736-742.
6. AMORIM F. L., WEINGAERTNER W. L.: The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, issue 3, 2005, 411–416.
7. ARASIMOWICZ A., DMOWSKA A., NOWICKI B., PODOLAK-LEJTAS A.: Stan warstwy wierzchniej elementów obrabianych elektroiskrowo i następnie zgniotem powierzchniowym. Monografia: Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, Gorzów Wlkp. – Warszawa 2011, s. 76-85.
8. BAZAN A., KAWALEC A., RYDZAK T., KUBIK P.: Variation of Grain Height Characteristics of Electroplated cBN Grinding-Wheel Active Surfaces Associated with Their Wear. *Metals* 2020, 10(11), 1479; <https://doi.org/10.3390/met10111479>.
9. BAZAN A., KAWALEC A., RYDZAK T., KUBIK P., OLKO A.: Determination of Selected Texture Features on a Single-Layer Grinding Wheel Active Surface for Tracking Their Changes as a Result of Wear. *Materials* 2021, 14(1), 6; <https://doi.org/10.3390/ma14010006>.
10. BURAKOWSKI T., WIERZCHOŃ T.: Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa 1995.
11. BUREK J., BABIARZ R., BUK J., SUŁKOWICZ P., KRUPA K.: The Accuracy of Finishing WEDM of Inconel 718 Turbine Disc Fir Tree Slots. *Materials* 2021, 14(3), 562; <https://doi.org/10.3390/ma14030562>.
12. CASANUEVA R., CHIQUITO L. A., AZCONDO F. J., BRACHO S.: Current source LCC resonant converter for an EDM power supply. *IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* 2001, 1027-1032.
13. CHAKRABORTY S., DEY V., GHOSH S. K.: A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. *Precision Engineering*, vol. 40, 2015, 1–6.
14. CHATTOPADHYAY K. D., VERMA S., SATSANGI P. S., SHARMA P. C.: Development of empirical model for different process parameters during rotary electrical discharge machining of copper–steel (EN-8) system. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, issue 3, 2009, 1454–1465.
15. CHAVOSHI, S. Z., LUO X.: Hybrid micro-machining processes: a review. *Precision Engineering*, vol. 41, 2015, 1–23.
16. CHMIELEWSKI T., SIWEK P., CHMIELEWSKI M., PIĄTKOWSKA A., GRABIAS A., GOŁAŃSKI D.: Structure and Selected Properties of Arc Sprayed Coatings Containing In-Situ Fabricated Fe-Al Intermetallic Phases. *Metals* 2018, 8, 1059.
17. DAS S., KLOTZ M., KLOCKE F.: EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, issue 2, 2003, 434-451.
18. DĄBROWSKI L., SERWIŃSKI R.: Analiza wpływu parametrów nastawnych wycinarki elektroerozyjnej na chropowatość powierzchni. *Obróbka elektroerozyjna technologia*, Wrocław 2009, s. 5-11.
19. DĄBROWSKI L., ŚWIERCZ R.: Struktura metalograficzna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej. *Obróbka elektroerozyjna rozwój i osiągnięcia*, Wrocław 2011, s. 16-23.
20. DĄBROWSKI L., ŚWIERCZ R., ZAWORA J.: Struktura geometryczna powierzchni po obróbce elektroerozyjnej elektrodą grafitową i miedzianą – porównanie. *Obróbka elektroerozyjna rozwój i osiągnięcia*, Wrocław 2011, s. 32-39.
21. DEPCZYŃSKI W., MŁYNARCZYK P., ŁAKOMIEC K.: Wybrane własności i mikrostruktura połączenia stal-miedź wykonanego metodą mikrosparowania opornościowo-impulsowego. Rozdział w monografii: Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu, Radom 2013, s. 36-49.
22. GOŁABCZAK A., KONSTATYNOWICZ A.: Modelowanie matematyczne zjawisk fizycznych w szczelinie EDM. *Obróbka erozyjna teoria i eksperyment*, Wrocław 2009, s. 23-32.

23. GOPALAKANNAN S., SENTHILVELAN T.: Effect of Electrode Materials on Electric Discharge Machining of 316 L and 17-4 PH Stainless Steels. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 11, no.7, 2012, 685-690.
24. HACKERT-OSCHÄTZCHEN M., KREIBIG M., KOWALICK M., ZEIDLER H., SCHUBERT A., KRÖNING O., HERZIG M., SCHULZE H-P.: Single discharge simulations of needle pulses for electrothermal ablation. *Proceedings of the European COMSOL Conference 2013*, 1–3.
25. HAN F., CHEN LI., YU D., ZHOU X.: Basic study on pulse generator for micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, issues 5-6, 2007, 474-479.
26. HAYAKAWA S., TAKAHASHI M., ITOIGAWA F., NAKAMURA T.: Study on EDM phenomena with in-process measurement of gap distance. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, issues 1–3, 10 (2004), 250–255.
27. JAHAN M. P., WONG Y. S., RAHMAN M.: A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, issue 8, 2009, 3956–3967.
28. JHA B., RAM K., RAO M.: An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 2011, 4 (2), 118-130.
29. KAO C. C., SHIH A. J.: Sub-nanosecond monitoring of micro-hole electrical discharge machining pulses and modeling of discharge ringing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 15, 2006, 1996-2008.
30. KAWALEC A., BAZAN A.: Quantitative description concerning wear forms of CBN single-layer grinding wheels working with different grinding speeds. *Mechanik*, vol. 91, no. 10, 2018, 803-805; <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.134>.
31. KOZAK J.: Wybrane zagadnienia hybrydowych obróbek erozyjno-mechanicznych. *Archiwum Technologii Budowy Maszyn*, Poznań 1996, s. 1-13.
32. KOZAK J., PEROŃCZYK J.: Obróbka elektroerozyjna narzędzi z polikrystalicznego diamentu (PCD). *Obróbka Erozyjna (Electromachining)*, Bydgoszcz – Golub Dobrzyń 1997, s. 213-221.
33. KOZAK J., PEROŃCZYK J., GULBINOWICZ Z.: Wyznaczanie prędkości obróbki elektroerozyjnej kompozytów. *Obróbka elektroerozyjna technologia*, Wrocław 2009, s. 51-57.
34. KOZAK J., ZYBURA-SKRABALAK M., SKRABALAK G.: Development of advanced Abrasive Electrical Discharge Grinding (AEDG) system for machining difficult-to-cut materials. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). *Procedia CIRP*, vol. 42, 2016, 872-877.
35. KUNIEDA M., LAUWERS B., RAJURKAR K.P. SCHUMACHER B.M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals*, vol. 54, issue 2, 2005, 64-87.
36. LAZARENKO B. R., LAZARENKO N. J.: Elektroiskrovaja obrabotka metalov v vodie i elektrolitach. *Elektronnaja Obrabotka Materialov*, nr 2, 1978.
37. LECHNIAK Z.: Badania dokładności silnie i zmiennie pochyłonych powierzchni wytworzonych metodą WEDM. *Obróbka erozyjna teoria i eksperyment*, Wrocław 2009, s. 49-56.
38. LEPPERT T.: Proekologiczne trendy w obróbce elektroerozyjnej, *Mechanik* 2015, nr 4, 134–141.
39. LI C., GE P., BI W., WANG Q.: Experimental Investigations on Optimizing Manufacturing Parameters for Electrospark Deposition Diamond Wire Saw. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2022, 121, 6523–6533.
40. LIU Y. H., LI R. J., JI R. J., YU L. L., ZHANG H. F., LI Q.Y.: Effect of technological parameter on the process performance for electric discharge milling of insulating Al₂O₃ ceramic. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 208, issues 1–3, 2008, 245-250.
41. LIVSIC A. L.: Impulsowe elektryczne i kombinowane metody obróbki – kryteria efektywności, tendencje rozwoju technologii i oprzyrządowania. *Materiały ISEM-VI*, Kraków 1980.
42. ŁAKOMIEC K., SPADŁO S., DUŚ-SPADŁO J., MIJAS R., SERWICKI T., SKOWRON E.: Badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) instalacji elektronicznych obrabiarek Cz. I. Uwarunkowania prawne. *Obróbka Metalu* 2017, zeszyt 4, s. 19-22.
43. ŁAKOMIEC K., SPADŁO S., DUŚ-SPADŁO J., MIJAS R., SERWICKI T., SKOWRON E.: Badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) instalacji elektronicznych obrabiarek Cz. II. Charakterystyka zakłóceń. *Obróbka Metalu* 2018, zeszyt 1, s. 24-29.
44. ŁAKOMIEC K., SPADŁO S., TUŚNIO J.: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) zespołów elektrycznych i elektronicznych obrabiarek w świetle wymagań współczesnych norm. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej* 2003, zeszyt 9.

45. MATUSZEWSKI M., MUSIAŁ J., STYP-REKOWSKI M.: Cechy warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w wyniku obróbki erozyjnej w funkcji jej parametrów. Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne niekonwencjonalnych technik wytwarzania, Bydgoszcz 2006, s. 78-83.
46. MATUSZEWSKI M., STYP-REKOWSKI M., MUSIAŁ J.: Nośność powierzchni po obróbce elektroerozyjnej. Obróbka erozyjna teoria i eksperyment, Wrocław 2009, s.57-63.
47. MIELNICKI W., KRZYWDA T., ZACHOROWSKI J., ZIÓŁEK J.: Elektroerozyjna metoda kształtowania parametrów geometrycznych małych otworów. Obróbka elektroerozyjna technologia, Wrocław 2009, s. 68-75.
48. MIERNIKIEWICZ A.: Doświadczalno-teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM). Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria mechanika, monografia 274, Kraków 2000.
49. MŁYNARCZYK P., DEPCZYŃSKI W., ŁAKOMIEC K.: Charakterystyka mikrosparwania opornościowo impulsowego służącego do regeneracji części. Logistyka, 2015, nr 4, s. 4954-4958.
50. MOURALOVA K.; BEDNAR J.; BENES L.; PLICHTA T.; PROKES T.; FRIES J. Production of Precision Slots in Copper Foil Using Micro EDM. Scientific Reports 2022, 12, 5023.
51. MOYLAN S. P, CHANDRASEKAR S., BENAVIDES G. L.: High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining. Sandia Report SAND2005-5023 (Oak Ridge, TN : United States Department of Energy), 2005.
52. NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S.: Elektroerozyjne wytwarzanie warstw stopowych na powierzchniach krzywoliniowych. Materiały V Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej EM'97 (Electromachining), Bydgoszcz 1997, s. 261-268.
53. NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S.: Sposób wytwarzania warstw wierzchnich z zastosowaniem wyładowań elektrycznych PL 183045 B1, 1998 r.
54. NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S.: Obróbka erozyjno-mechaniczna elektrodą szczotkową. Zbiór prac IX Międzynarodowej Konferencji „Przepływowe Maszyny Wirnikowe”, Rzeszów 2003, s. 491-500.
55. NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S.: Erozyjno mechaniczne ostrzenie supertwardych narzędzi ściernych ze spoiwem metalowym. Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne niekonwencjonalnych technik wytwarzania, Bydgoszcz 2006, s. 171-177.
56. NOWICKI B., PIERZYNOWSKI R., SPADŁO S, ŁAKOMIEC K.: Badania stanu warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodami szczotkowymi z molibdenu, wolframu i stali 1H18N9. Rozdział w monografii: Wybrane zagadnienia obróbek skoncentrowaną wiązką energii, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2003, s. 96-103.
57. NOWICKI B., SPADŁO S.: Brush electro-discharge mechanical machining BEDMM. Proceedings International Symposium for Electromachining – ISEM-XI, Lausanne 1995, 191-201.
58. NOWICKI B., SPADŁO S.: Badania wpływu warunków obróbki erozyjno-mechanicznej elektrodą szczotkową na kształtowanie struktury metalograficznej warstwy wierzchniej. Materiały III Międzynarodowej Konferencji WW'96 Lubniewice-Gorzów Wielkopolski 1996, s. 252-255.
59. NOWICKI R., SWIERCZ R., ONISZCZUK-SWIERCZ D., ROZENEK M.: Experimental Investigation of Technological Indicators and Surface Roughness of Hastelloy C-22 after Electrical Discharge Machining Using POCO Graphite Electrodes. Materials 2022, 15, 5631.
60. OCZOŚ K. E.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanym strumieniem energii, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
61. ONISZCZUK-ŚWIERCZ D., ŚWIERCZ R.: Wpływ parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości użytkowe stali o wysokiej przewodności cieplnej. Mechanik 2015, nr 1, s. 29–34.
62. ONISZCZUK-ŚWIERCZ D., ŚWIERCZ R., KOPYTOWSKI A., NOWICKI R.: Experimental Investigation and Optimization of Rough EDM of High-Thermal-Conductivity Tool Steel with a Thin-Walled Electrode. Materials 2023, 16(1), 302; <https://doi.org/10.3390/ma16010302>.
63. PACZKOWSKI T., SAWICKI J.: Theoretical analysis of electrochemical machining with a vibrating electrode. Advances In Manufacturing Science And Technology, vol. 27, nr 4, 2003, 45-63.
64. PACZKOWSKI T., SAWICKI J.: Analysis of influence of physical conditions inside interelectrode gap on work piece shape evolution. Engineering Mechanics, vol. 13, nr 2, 2006, 93-100.
65. PACZKOWSKI T., SAWICKI J.: Electrochemical machining of curvilinear surfaces. Journal of Machining Science and Technology, vol. 12, issue 1, 2008, 33-52.
66. PANDEY A., SINGH S.: Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining. International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 2(6), 2010, 2172-2191.
67. PEROŃCZYK J., KOZAK J., PRACKI M.: Drążenie elektroerozyjne (EDM) kompozytu polikrystalicznego diamentu (PCD). Obróbka elektroerozyjna technologia, Wrocław 2009, s. 93-101.
68. PIERZYNOWSKI R.: Badania elektroiskrowego stopowania powierzchni elektrodami szczotkowymi. Rozprawa doktorska, PW, Warszawa 2001.

69. PODOLAK-LEJTAS A.: Wpływ parametrów obróbki EDM na stan warstwy wierzchniej. Obróbka erozyjna teoria i eksperyment, Wrocław 2009, s. 82-91.
70. QIN L., HUO W., LI Z., ZHANG Y., XI X., ZHAO W.: Study on Energy Distribution of Discharge Plasma and Its Effect on Crater Formation in EDM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022, 121, 5563–5585.
71. RADZIEJEWSKA J., SARZYŃSKI A., STRZELEC M., DIDUSZKO R., HOFFMAN J.: Evaluation of Residual Stress and Adhesion of Ti and TiN PVD Films by Laser Spallation Technique. Optics & Laser Technology 2018, 104, 140–147.
72. RADZIEJEWSKA J., STRZELEC M., OSTROWSKI R., SARZYŃSKI A.: Experimental investigation of shock wave pressure induced by a ns laser pulse under varying confined regimes. Optics and Lasers in Engineering, vol. 126, 2020, 105913.
73. ROZENEK M.: Sinking electrical discharge machining with glycol and glycerol application as dielectric fluid. AIP Conference Proceedings 2017(1), 020027.
74. ROZENEK M., DĄBROWSKI L.: Obróbka elektroerozyjna w dielektryku z proszkami przewodzącymi. Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne niekonwencjonalnych technik wytwarzania, Bydgoszcz 2006, s. 28 - 34.
75. RUSZAJ A.: Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi, Instytut Obróbki Skrawaniem, Kraków 1999.
76. RUSZAJ A., GAWLIK J., SKOCZYPIEC S.: Electrochemical machining - Special equipment and applications in aircraft industry. Management and Production Engineering Review, vol.7, nr 2, 2016, 34–41.
77. SAWICKI J., PACZKOWSKI T.: Electrochemical Machining of Curvilinear Surfaces of Revolution: Analysis, Modelling, and Process Control. Materials 2022, 15, 7751.
78. SCENDO M.: Działanie wybranych inhibitorów korozji miedzi w wodnych roztworach chlorków, Wydawnictwo Akademii Świętokrzyskiej, Kielce 2006.
79. SCENDO M., TRELA J.: Inhibition Effect of N-(2-chlorobenzylidene)-4-acetylaniline on the Corrosion of Stainless Steel. International Journal Electrochemistry Science 2013, 8, 11951-11971.
80. SCENDO M., TRELA J.: Adenine as an Effective Corrosion Inhibitor for Stainless Steel in Chloride Solution, International Journal Electrochemistry Science 2013, 8, 9201-9221.
81. SCHUMACHER B. M., KRAMPITZ R., KRUTH J.-P.: Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push". Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVII). Procedia CIRP, vol. 6, 2013, 5-12.
82. SHEN Y., LIU Y., SUN W., ZHANG Y., DONG H., ZHENG C.: High-speed near dry electrical discharge machining. Journal of Materials Processing Technology, vol. 233, 2016, 9–18.
83. SIWCZYK M.: Obróbka elektroerozyjna: poradnik technologia, Firma Naukowo – Techniczna “Mieczysław Siwczyk”, 2005.
84. SKOCZYPIEC S., FURYK K., RUSZAJ A., WYSZYŃSKI D.: Badania wpływu parametrów impulsów elektrycznych na strukturę warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej. Monografia: Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, Gorzów Wlkp. – Warszawa 2011, s. 68-75.
85. SKOCZYPIEC S., LIPIEC P., BIZOŃ W., WYSZYŃSKI D.: Selected Aspects of Electrochemical Micro-machining Technology Development. Materials 2021, 14, 2248.
86. SMAK K., SZABLEWSKI P., LEGUTKO S., KRAWCZYK B., MIKO E.: Investigation of the Influence of Anti-Wear Coatings on the Surface Quality and Dimensional Accuracy during Finish Turning of the Inconel 718 Alloy. Materials 2023, 16, 715; <https://doi.org/10.3390/ma16020715>.
87. SNOEYS R., DAUW D., KRUTH J. P.: Improved Adaptive Control System for EDM Processes. CIRP Annals, vol. 29, issue 1, 1980, 97-101.
88. SON S., LIM H., KUMAR A. S., RAHMAN M. : Influences of pulsed power condition on the machining properties in micro EDM. Journal of Materials Processing Technology, vol. 190, nr. 1–3, 2007, 73–76.
89. SPADŁO S.: Sposób obróbki gładkościowej powierzchni, zwłaszcza o złożonych kształtach. Pat.172559, 1997.
90. SPADŁO S.: Teoretyczno – eksperymentalne aspekty obróbki elektroerozyjno – mechanicznej, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2006.
91. SPADŁO S., DUDEK D.: Analyzing the technical characteristics of EDM tools. Proceedings of conference 8th European conference of young research and scientific workers - TRANSCOM, Žilina 2009, 193-196.
92. SPADŁO S., DUDEK D.: Badania dokładności kształtu oraz parametrów struktury geometrycznej otworów cylindrycznych drążonych metodą EDM. Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych 2010, zeszyt 16, s. 11-17.
93. SPADŁO S., DUDEK D.: The superficial layer forming by hybrid (Electroerosion-Mechanical) machining. Proceedings of 5th Annual International Travelling Conference for Young Researchers and PhD Students – ERIN, Tatranska Kotlina 2011, 355-362.

94. SPADŁO S., DUDEK D.: Badania wpływu warunków przepłukiwania szczeliny roboczej w obróbce EDM na dokładność geometryczną drażonych otworów. Materiały konferencyjne XIII International PhD Workshop OWD 2011 Conference Archives PTETiS, Wisła 2011, vol. 29, s. 477-480.
95. SPADŁO S., DUDEK D.: Badania błędów zarysu kształtu i struktury geometrycznej powierzchni otworów cylindrycznych drażonych metodą EDM. Warstwa wierzchnia technologicznie kształtowana, Gorzów Wlkp. – Warszawa 2011, s. 98-107.
96. SPADŁO S., DUDEK D.: Investigation of the Shape Accuracy of Cylindrical Holes Machined by EDM Process. Non-Conventional Machining Processes. Journal of Machine Engineering, vol. 12, no. 2, 2012, 98-104.
97. SPADŁO S., DUDEK D., ŁAKOMIEC K., MŁYNARCZYK P.: Badania wpływu oddziaływań elektrod szczotkowych na konstytuowanie struktury geometrycznej obrabianej powierzchni. Obróbka elektroerozyjna rozwój i osiągnięcia. Inżynieria Maszyn, tom 16, zeszyt 3, 2012, s. 119-127.
98. SPADŁO S., DUDEK D., ŁAKOMIEC K., MŁYNARCZYK P.: Konstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni w obróbce elektroerozyjno-mechanicznej Rozdział w monografii: Innovative Manufacturing Technology. Innowacyjne technologie wytwarzania, Wydawnictwo Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania 2012, s. 285-293.
99. SPADŁO S., DUDEK D., MŁYNARCZYK P.: Analyzing The shape deviation cylindrical holes machined by EDM (electro discharge machining) process. Proceedings of conference 9th European conference of young research and scientific workers - TRANSCOM, Žilina 2011, 175-178.
100. SPADŁO S., KUŚMIERZ J., ŁAKOMIEC K., DUŚ-SPADŁO J.: Wybrane aspekty techniczno-prawne badań odporności instalacji elektrycznej i elektronicznej pojazdów militarnych na zakłócenia elektromagnetyczne (EMC). Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, tom 12, zeszyt 12, 2011, s. 334-339.
101. SPADŁO S., ŁAKOMIEC K.: Metody badań odporności zapalników na zakłócenia elektromagnetyczne (EMC). Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej 2006, zeszyt 11, s. 273-280.
102. SPADŁO S., ŁAKOMIEC K.: Badania porównawcze wpływu metody stopowania na jakość warstw stopowanych. Logistyka 2014, zeszyt 6, s. 1-6.
103. SPADŁO S., ŁAKOMIEC K., DUŚ J.: Uwarunkowania prawne i techniczne badań odporności urządzeń elektrycznych i elektronicznych na zakłócenia elektromagnetyczne (EMC). Materiały: VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Systemy przeciwlotnicze i obrony powietrznej" CRAAS 2006, s. 138-151.
104. SPADŁO S., MŁYNARCZYK P., ŁAKOMIEC K.: Influence of the of electrical discharge alloying methods on the surface quality of carbon steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 89, issue 5, 2017, 1529-1534.
105. ŚWIERCZ R., CHMIELEWSKI T., SALACINSKI T., WINIARSKI M.: Surface Finishing Using Ceramic Fibre Brush Tools. In Proceedings of the METAL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 24–26 May 2017.
106. ŚWIERCZ R., ONISZCZUK-ŚWIERCZ D.: Experimental Investigation of Surface Layer Properties of High Thermal Conductivity Tool Steel after Electrical Discharge Machining. Metals 2017, 7, 550.
107. ŚWIERCZ R., ONISZCZUK-ŚWIERCZ D., CHMIELEWSKI T., SALACIŃSKI T.: Investigations on Surface Integrity Processed by EDM. Metal 2018, Proceedings of the 27th International Conference on Metallurgy and Metals, Tanger 2018, 1252-1257.
108. ŚWIERCZ R., ONISZCZUK-ŚWIERCZ D., CHMIELEWSKI T.: Multi-Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function. Micromachines 2019, 10, 72.
109. WANG X., YI S., GUO H., LI C., DING S.: Erosion Characteristics of Electrical Discharge Machining Using Graphene Powder in Deionized Water as Dielectric. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020, 108, 357–368.
110. WENG F. T., SHYU R. F., HSU C. S.: Fabrication of micro-electrodes by multi-EDM grinding process. Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, issues 1–3, 2003, 332-334.
111. Xia H., Hashimoto H., Kunieda M., Nishiwaki N.: Measurement of Energy Distribution in Continuous EDM Process. Journal of JSPE, vol. 62, 1996, 1141-1145.
112. ZABRORSKI S., POROŚ D.: Wycinanie elektroerozyjne elementów z węglików spiekanych. Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne niekonwencjonalnych technik wytwarzania, Bydgoszcz 2006, s. 35-41.
113. Katalogi i prospekty firmy Agie Charmilles.
114. Katalogi i prospekty firm: Steelfluid, Sodick, Soditronik.
115. Katalogi i prospekty firmy Zakład Automatyki Przemysłowej BP.
116. Normy
 - PN-M-55122:1997 Obróbka erozyjna – Obróbka elektroerozyjna – Terminologia i klasyfikacja;

- PN – EN ISO 4287 – Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni;
 - PN-EN ISO 25178-2 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) –Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
117. Materiały pomocnicze Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkość Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej.